

УДК 556.334.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4455
Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Особенности формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля (Западная Якутия)

А.М. Янников✉, А.Ю. Корепанов, А.С. Стручкова

Институт «Якутнiproalmaz» АК «АЛРОСА» ПАО, Россия, г. Мирный

✉Yannikov90@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Коренные месторождения алмазов, отрабатываемые АК АЛРОСА на территории Западной Якутии, имеют повсеместное обводнение различной интенсивности подмерзлотными и межмерзлотными крепкими и весьма крепкими рассолами. В настоящее время образующиеся дренажные воды закачиваются обратно в недра в толщу многолетнемерзлых пород, что приводит к формированию природно-техногенных водоносных горизонтов, требующих постоянного контроля, мониторинга и изучения. **Цель.** Выявление особенностей формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля, определение объема вод криолитозоны, вовлеченных в этот процесс, а также их характеристика для подтверждения экологичности способа обращения с дренажными рассолами. **Объект.** Техногенные водоносные горизонты, формирующиеся в пределах второго яруса криогенной толщи в процессе закачки дренажных рассолов коренных месторождений алмазов. **Методы.** Полевые работы состояли в ежеквартальном режимном опробовании наблюдательных и закачных скважин. Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения криогидрогеологических условий и гидродинамического режима осуществлены методами моделирования в ПО Feflow. Дополнительным методом выступал аналитический балансовый расчёт по параметру изменяющейся минерализации. **Результаты.** Взаимодействие дренажных вод с водами криолитозоны приводит к площадным изменениям минерализации без существенных изменений доминирующих анионов и катионов в пределах изучаемых объектов, формируя на периферийных частях равновесную природно-техногенную систему относительно фоновых температурных условий. Объем сформировавшихся техногенных водоносных горизонтов превысит 300 млн м³. Процесс вовлечения вод криогенной толщи, несмотря на значительные объёмы, имеет положительное влияние на экологическое состояние территории, т. к. в периферийных частях образующихся водоносных горизонтов формируются равновесные криогидрогеологические условия, характерные для природных криопэгов региона исследований.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, рассолы, дренажные воды, участки закачки, техногенные водоносные горизонты, криолитозона

Для цитирования: Янников А.М., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С. Особенности формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 61–72. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4455

UDC 556.334.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4455

Features of the formation of natural-technical systems within the injection areas of the Daldyn kimberlite field (Western Yakutia)

A.M. Yannikov✉, A.Yu. Korepanov, A.S. Struchkova

Institute "Yakutniproalmaz" PJSC ALROSA, Mirny, Russian Federation

✉YannikovAM@alrosa.ru

Abstract. Relevance. Primary diamond deposits mined by PJSC ALROSA in Western Yakutia have widespread watering of varying intensity with sub-permafrost and inter-permafrost strong and very strong brines. Currently, the resulting drainage waters are pumped back into the depths of the permafrost, which leads to the formation of natural-technogenic aquifers that require constant control, monitoring and study. **Aim.** Identification of the features of the formation of natural-technogenic systems within the injection areas of the Daldyn kimberlite field, determination of the volume of permafrost waters involved in this process, as well as their characteristics to confirm the environmental friendliness of the method of handling drainage brines. **Methods.** Field work consisted of quarterly routine testing of observation and injection wells. Assessment of technogenic influence, as well as subsequent forecasting of the dynamics of changes in cryohydrogeological conditions and hydrodynamic regime, was carried out using modeling methods in Feflow software. An additional method was analytical balance calculation based on the parameter of changing mineralization. **Results and conclusions.** The interaction of drainage waters with permafrost waters leads to areal changes in mineralization without significant changes in the dominant anions and cations within the studied objects, forming an equilibrium natural-technogenic system in the peripheral parts relative to background temperature conditions. The volume of formed man-made aquifers will exceed 300 million m³. The process of involving cryogenic waters, despite the significant volumes, has a positive impact on the ecological state of the territory, because in the peripheral parts of the resulting aquifers, equilibrium cryohydrogeological conditions are formed, characteristic of natural cryopegs in the region of study.

Keywords: permafrost, brines, drainage waters, injection sites, technogenic aquifers, permafrost zone

For citation: Yannikov A.M., Korepanov A.Yu., Struchkova A.S. Features of the formation of natural-technical systems within the injection areas of the Daldyn kimberlite field (Western Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 61–72. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4455

Введение

Вопросы обращения с дренажными водами одни из острейших в добывающей промышленности. Зачастую формирующиеся воды по ряду показателей не могут быть полноценно очищены, или очистка таких вод приводит к формированию сопутствующей остаточной рапы, утилизация которой требует отдельных технических решений. Поэтому в АК АЛРОСА в качестве основного метода обращения с дренажными водами выступает их закачка обратно в недра. Этот способ выбран по причине не только высокой минерализации образующихся вод (100–300 г/литр и выше), но и из-за локальных горно-геологических и криогидрогеологических особенностей кимберлитовых трубок Западной Якутии. Закачка производится в два типа коллекторов: в региональные подмерзлотные водоносные комплексы и в коллекторы толщи многолетнемерзлых пород (ММП) [1].

При использовании в качестве рассолопоглощающей толщи ММП в результате взаимодействия крепких и весьма крепких рассолов (по Е.В. Пиннекеру) с водами криолитозоны происходит формирование природно-техногенных систем, требующих постоянного контроля, мониторинга и изучения [2]. Техногенное влияние отработки на криогидрогеологическую среду заключается в:

- образовании депрессионных воронок из-за работы систем опережающего водопонижения и разгрузки массива вмещающих пород, что характерно для всех территорий интенсивного промышленного освоения;
- формировании репрессионных куполов в результате процесса обратной закачки, компенсирующих и ограничивающих развитие депрессий;

- формировании техногенных водоносных горизонтов в нижней (подошвенной) части толщи ММП с последующим вертикальным массопереносом, приуроченным к зонам динамического воздействия региональных разрывных нарушений в ниже залегающие водоносные комплексы [3, 4].

Необходимо отметить, что реализованная в пределах Якутской алмазодобывающей провинции система откачка/закачка по своим масштабам и объемам перекачиваемых вод не имеет аналогов как в нашей стране, так и за рубежом [5–9 и др.]. Изучение процессов трансформации криогидрогеологических условий в пределах участков закачки необходимо для подтверждения экологичности принятого способа обращения с крепкими и весьма крепкими дренажными водами. Это не только позволяет безопасно эксплуатировать уже построенные участки, но и дает возможность масштабировать имеющийся опыт с последующим тиражированием на смежные направления.

Для закачки рассолов трубок Далдынского кимберлитового поля используются породы второго яруса толщи ММП. Интервалы формируемых техногенных водоносных горизонтов выделяются в разрезе на глубинах 150–280 м от дневной поверхности. Всего по указанному принципу в период с 1985 по 2022 гг. в пределах Далдынского кимберлитового поля было построено четыре участка: «Октябрьский», «Киенгский», «Левобережный» и «Левобережный-2». В настоящее время в эксплуатации находятся участки «Киенгский», «Левобережный» и «Левобережный-2». Закачка рассолов в толщи ММП привела к формированию межмерзлотных техногенных горизонтов, приуроченных к

перечисленным участкам. Причём в результате растворения льдистой составляющей в пределах участков «Киенгский» и «Левобережный» были сформированы подтверждённые вертикальные зоны массопереноса в ниже залегающий подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ВВК). Ввиду невысоких фильтрационных параметров наблюдается локальное изменение напоров в пределах прямого воздействия от участков закачки. Расход перетекания из техногенного водоносного горизонта в ВВК на участке «Киенгский» в зоне динамического влияния Октябрьского разлома составляет $490 \text{ м}^3/\text{сут}$; а на участке «Левобережный» – $4570 \text{ м}^3/\text{сут}$, что обеспечивает наличие зоны техногенного питания для частично сдренированного ВВК [10].

Процесс формирования техногенных водоносных горизонтов сопряжён с вовлечением вод криолитозоны, изначально находившихся в твёрдой фазе. Процесс вовлечения подтверждается изменением химического состава вод как в плане, так и в разрезе, выявленном при режимном опробовании по сети наблюдательных и закачных скважин.

Целью проводимых исследований являлось выявление особенностей формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки «Киенгский» и «Левобережный» Далдынского кимберлитового поля, определение объема вод криолитозоны, вовлеченных в этот процесс, а также их характеристика для подтверждения экологичности способа обращения с дренажными рассолами.

Рациональное недропользование, а также необходимость соблюдения экологической безопасности выбранного способа обращения с дренажными водами требуют выполнения комплекса исследований, включающего в себя следующие задачи:

- постоянный контроль над параметрами закачиваемых вод (температура и минерализация);
- режимные замеры уровня режима по сети закачных и наблюдательных скважин в пределах каждого участка закачки;
- проведение геофизических исследований методами наземной электроразведки, ГИС, расходомерии и термометрии по стволам скважин;
- выполнение пробоотбора по стволам закачных и наблюдательных скважин для контроля минерализации формируемого техногенного водоносного горизонта;
- проведение гидрогеологического моделирования для получения качественного и долгосрочного прогноза, а также подтверждения полезной емкости участков;
- определение объема вовлеченных вод криолитозоны в пределах участков закачки.

Геокриологические условия территории исследования

Территория Далдынского кимберлитового поля входит в состав северной геокриологической зоны Сибирской платформы (северо-континентальная подзона), которая характеризуется [11]:

- сплошным распространением ММП;
- непрерывностью мощной криогенной толщи, составляющей до 800 м (в пределах перспективной площади Сугунахской структуры);
- температурой пород первого яруса криолитозоны в неизмененных условиях от -2 до -6 °С.

Основной чертой климата региона является резкая континентальность, северная часть территории Далдынского кимберлитового поля характеризуется субарктическим климатом. Низкая среднегодовая температура воздуха и отрицательный годовой радиационный баланс ($-0,5 \dots -2,0 \text{ ккал}/\text{см}^2 \cdot \text{мес}$) благоприятствуют сохранению, а также локальному преобразованию температурных полей мерзлых массивов. Температурный режим мерзлой толщи имеет прямую связь с температурой земной поверхности и формируется, кроме всего, под воздействием климатических, ландшафтных, геоморфологических и других факторов.

Многолетнемёрзлые породы представлены карбонатно-глинистыми отложениями моркокинской, реже мархинской свит, а на участке «Киенгский» еще и породами онхойюряхской свиты и олдондинской свиты нижнего ордовика. Верхний ярус слагают ММП, содержащие льды различных типов, заполняющие поры, каверны, трещины [12]. Нижний ярус состоит из охлажденных пород, пустоты которых заполнены солеными водами и рассолами с отрицательной температурой – криопэгами. Промежуточное значение занимает ярус морозных недонасыщенных пород. Необходимо отметить, что в процессе различных исследований последних лет в регионе представление о строении верхнего яруса криолитозоны несколько изменилось. Некоторыми скважинами в толще ММП зафиксированы реликтовые линзы соленых вод и рассолов в нижнеордовикских отложениях. Изолированность и линзообразный характер таких водонасыщенных толщ доказаны с помощью опытно-фильтрационных исследований. Наличие реликтовых линз послужило основанием для выделения межмерзлотного типа подземных вод [12, 13]. Они служат зоной постепенного перехода от ММП к водонасыщенным и одновременно охлажденным породам, имеющим отрицательную температуру. Мощность этой переходной зоны незначительная и не превышает 10 м. Кроме того, в мерзлой толще встречаются единичные маломощные (до 1–5 м) линзы талых пород, не содержащие гравитационную воду. Они могут залегать на различных глубинах в зависимости от мощности яруса ММП.

Использование толщи ММП для закачки дренажных вод в пределах Далдынского кимберлитового поля, прежде всего, связано с большой глубиной залегания (не менее 1200 м от дневной поверхности) высокопроницаемых коллекторов, пригодных для закачки.

После проведенного комплекса исследований, выполненных коллективом авторов ИМЗ СО РАН и ИЗК СО РАН, была обоснована принципиальная возможность использования второго яруса криолитозоны для организации закачки. Первый участок, отработанный по этому принципу и находящийся сейчас на стадии рекультивации, – «Октябрьский» [14].

Методы

Выполненные исследования состояли из двух блоков: полевого и камерального. Полевые работы состояли в режимном опробовании наблюдательных и закачных скважин, осуществляемом на ежеквартальной основе. Объемы выполненных работ приведены в табл. 1. Отбор проб рассолов осуществлялся с целью изучения качественного состава подземных вод в результате закачки дренажных вод. Отбор проб производился пробоотборниками марки ВПП-300, ПО-48, ПСП-76.

Определение химического состава отобранных рассолов выполнялось в специализированной аккредитованной лаборатории института Якутнипроалмаз. Опробование проводилось комплексно по всем скважинам участка, что позволило получить результаты состава применительно к центральной, фланговым и периферийным частям техногенных водоносных горизонтов.

Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения криогидрогеологических условий и гидродинамического режима в пределах участков закачки были осуществлены методами моделирования в ПО Feflow. На основании анализа имеющихся данных по мерзлотно-гидрогеологическим условиям территории исследования закачки дренажных вод, результатов бурения и освоения скважин, результатов опытно-промышленных работ были разработаны

гидрогеологические модели, позволившие решить задачи определения полезной ёмкости каждого из находящихся в эксплуатации участков, а также определить срок их эксплуатации. Построение и последующая калибровка моделей осуществлялась согласно общепринятым методикам, с учётом локальных особенностей структурно-тектонического строения, а также литолого-фациальных и криогидрогеологических условий каждого отдельного участка [15]. С учётом планового расположения скважин с помощью ПО Feflow была составлена схема распределения минерализации в сформированном техногенном водоносном комплексе. Таким образом, модель, построенная с учётом изменяющейся минерализации рассолов техногенного водоносного горизонта, – основной инструмент определения объема вовлеченных вод криолитозоны.

Дополнительным методом выступал аналитический балансный расчёт, основанный на изменяющейся минерализации вод в пределах формируемого техногенного водоносного горизонта. Изначальная минерализация закачиваемых дренажных вод, хоть и подвержена сезонным колебаниям, в среднем составляет ~350 г/л. Площадное опробование позволяет оценить фактическое распределение минерализации, а известный объём изначально закачанных вод позволяет определить объём вод, необходимый для фиксируемых изменений.

Данный метод был основан на допущении, что зафиксированное распределение периферийных частей техногенных водоносных комплексов происходит из-за разбавления закачиваемых дренажных рассолов в процессе взаимодействия с водами криолитозоны, без учёта влияния плотностной седиментации вод. Основным критерием оценки количества вовлеченных вод криолитозоны были объём и расход дренажных рассолов тр. Удачная, закачанных в пределах изучаемых участков. На основании вышесказанного в рамках статьи были выполнены прогнозные расчёты изменения минерализации в пределах отдельных блоков, а также определен единичный расход, требуемый для формирования фиксируемой минерализации.

Таблица 1. Объёмы полевых исследований

Table 1. Volumes of field studies

Кимберлитовое поле Kimberlite field	Дренажные воды месторождения Deposit drainage waters	Участок Site	Площадь, км ² Site area, km ²	Количество скважин, шт Amount of wells, pcs	Количество проб рассолов, шт. Amount of brine samples, pcs
Далдынское Daldyn	тр. Удачная pipe Udachnaya	Октябрьский Oktyabrsky	15	участок рекультивирован the site has been reclaimed	
		Киенгский Kiengsky	35	65	260
		Левобережный Levoberezhny	50	45	180
		Левобережный-2 Levoberezhny-2	40	20	80

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам выполненного комплекса работ по участкам были определены наиболее проницаемые интервалы, характеризующиеся коллекторскими свойствами и способные обеспечить требуемую производительность закачки. Как правило, коллекторы представлены карбонатными (известняки и доломиты) и терригенно-карбонатными (алевролиты, реже мергели) породами, в интервале которых происходит формирование техногенных водоносных горизонтов. Для участков закачки Далдынского кимберлитового поля («Октябрьский», «Киенгский», «Левобережный» и «Левобережный-2») целевые коллекторы находятся в интервалах мархинской ($E_3 mrg_4$) и моркокинской ($E_3 mrg_k$) свит верхнего кембрия.

На настоящее время суммарно во втором ярусе криолитозоны в пределах Далдынского кимберлитового поля было размещено свыше 44 млн m^3 дренажных вод, из которых:

- 10,6 млн m^3 в участок «Октябрьский»;
- 13,0 млн m^3 в участок «Киенгский»;
- 21,0 млн m^3 в участок «Левобережный»;
- 0,4 млн m^3 в участок «Левобережный-2».

Параметры эксплуатации участков, а также процент использования полезной ёмкости, определённые при помощи цифровых моделей, приведены в табл. 2.

Характеристика динамики изменений режима приведена по двум уникальным объектам – участкам «Киенгский» и «Левобережный». Уникальность данных участков обусловлена рядом фактов:

- оба участка интенсивно эксплуатировались на протяжении длительного периода времени, в результате полезная ёмкость была использована более чем на 80 %;
- закачка большого объема дренажных рассолов в пределах ограниченной площади привела к формированию в зонах динамического воздействия региональных разрывных нарушений зон вертикальной фильтрации со значительными расходами перетекания в ниже залегающий

подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс, сформировав новые природно-техногенные геосистемы, позволяющие рассматривать закачку во второй ярус криолитозоны именно как способ обращения с дренажными водами, а не изоляции (как считалось ранее). Данный факт подтверждается режимными наблюдениями за уровнем режимом по скважинам, оборудованным для отдельных наблюдений за подмерзлотным верхнекембрийским водоносным комплексом и техногенным водоносным горизонтом. Именно характер изменения уровня режима, а также применение современных методов гидрогеологического моделирования позволили определить параметры вертикального перетекания. Формирование таких систем требует дополнительного изучения, т. к. данный факт был выявлен сравнительно недавно – менее 10 лет назад;

- по причине интенсивности эксплуатации оба участка прошли все стадии формирования техногенных водоносных горизонтов (рис. 1, 2) с максимальной техногенной нагрузкой на криолитозону, что позволяет оценить степень воздействия процесса закачки на геологическую среду.

Необходимо отметить, что перед началом эксплуатации температура пород в пределах участков «Киенгский» и «Левобережный» была типична для территории исследований и составляла от -1 до -6 °С.

Первоначально при закачке рассолов распространение их в свободном ото льда трещинном пространстве ММП происходит при неполном насыщении под действием силы тяжести по хорошо проницаемым зонам [14]. При этом происходит таяние ледового заполнителя трещин, пор, каверн, увеличение их раскрытия, соединение отдельных проводящих зон как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Со временем за счет таяния льда формируется область полного насыщения свободного пространства в толще ММП рассолами, смешанными с водой растаявшего льда.

Таблица 2. Параметры эксплуатации участков закачки Далдынского кимберлитового поля

Table 2. Parameters of operation of injection sites of the Daldyn kimberlite field

Участок Site	Объём закачанных рассолов, m^3 Volume of injected brines, m^3	Оценённый объём, m^3 Estimated volume, m^3	% заполне- ния Fill percentage	Период закачки, гг. Injection period, years	Прогнозный срок эксплуа- тации, гг. Expected ser- vice life, years	Интервал формиро- вания техногенного во- доносного горизонта, м Interval of formation of technogenic aquifer, m
Октябрьский Oktyabrsky	10600000	10600000	100	1985–2001	1985–2001	150–270
Киенгский Kiengsky	13000000	15500000	84	2001–2013	2001–2033	214–273
Левобережный Levoberezhny	21000000	25000000	84	2012–2023	2012–2027	180–295
Левобережный-2 Levoberezhny-2	400000	17000000	2	2021–2023	2021–2032	148–267

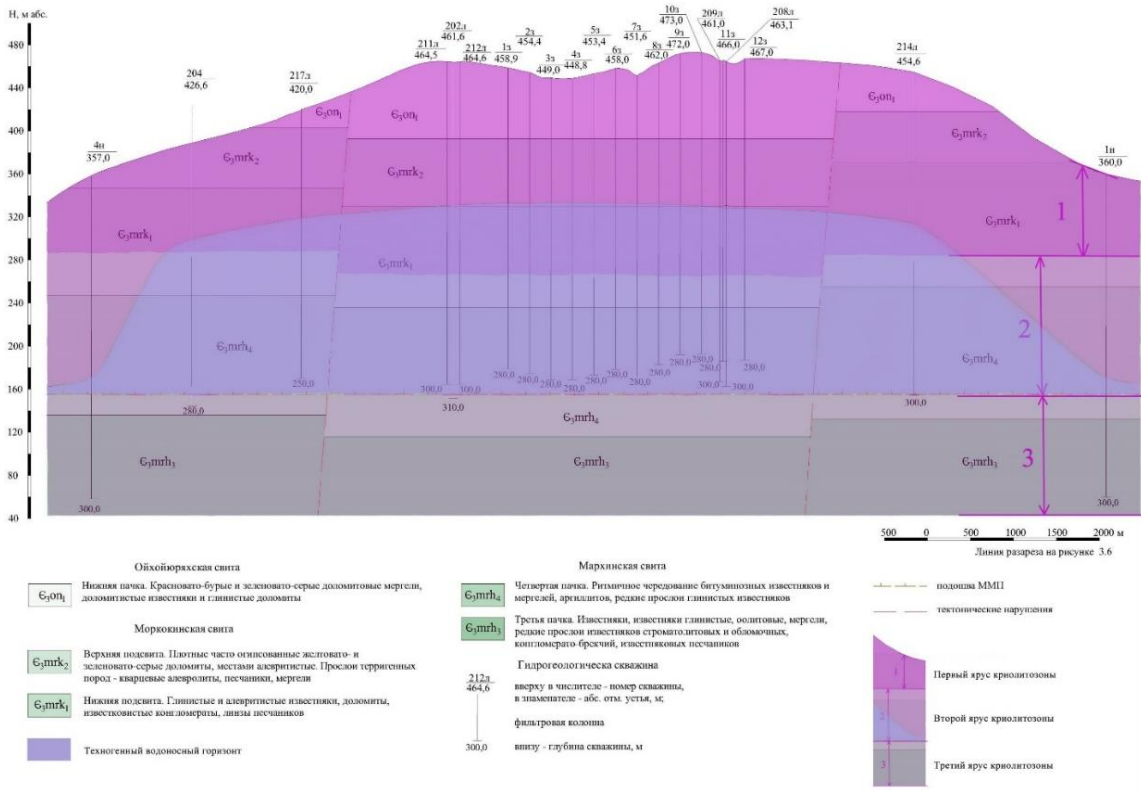


Рис. 1. Криогидрогеологический разрез участка «Левобережный»
 Fig. 1. Cryohydrogeological section of the Levoberezhny site

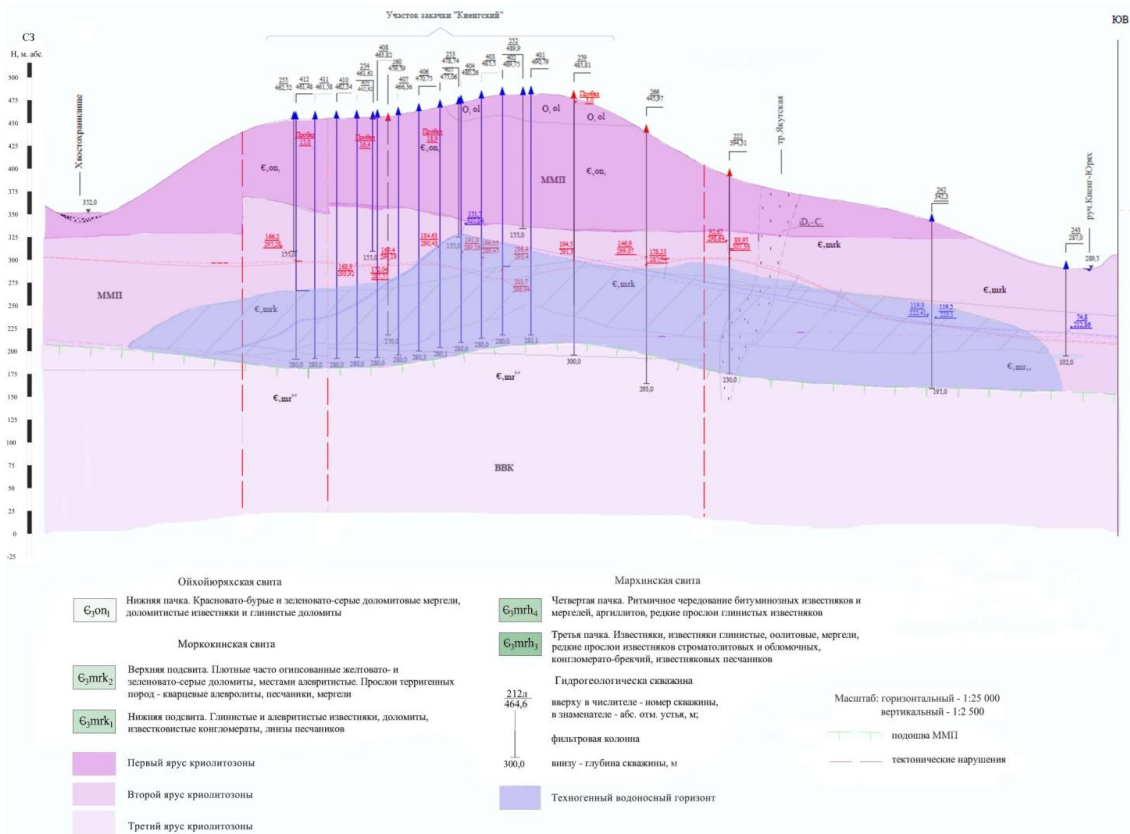


Рис. 2. Криогидрогеологический разрез участка «Киенгский»
 Fig. 2. Cryohydrogeological section of the Kiengsky site

С этого времени движение рассолов будет происходить под действием градиента давлений и определяться законами Дарси и сохранения массы [16, 17]. В рассматриваемых условиях закачки дренажных вод в толще ММП формируется техногенный водоносный горизонт, содержащий рассолы с изменяющейся в пространстве и времени плотностью.

Для выявления тенденций по изменению геотермического режима по скважинам участка «Левобережный» был выполнен сопоставительный анализ изменения температур на начало эксплуатации и по состоянию на конец 2022 г. (табл. 3). Режимные геотермические наблюдения в районе работ позволили выявить характер трансформации температурного режима, связанной с закачкой дренажных рассолов. По сводным графикам скважин закачного ряда отчетливо можно отметить незначительное изменение температуры.

В период начала закачки в 2012 г. температура по закачным скважинам по стволу составляла от –2,5 до –4,8 °С, понижаясь с глубиной, к 2022 г. температура на интервалах уменьшилась и составляла от –3 до –6 °С. По наблюдательным скважинам в 2012 г. температура изменялась от –1,9 до –4,9 °С, в 2022 г. от –2,5 до –5,4 °С.

На участке закачки «Киенгский» в 2003 г. была начата эксплуатация, температура по стволу закачных скважины изменялась от –1,6 до –2,38 °С. Самая интенсивная закачка была в 2012 г., колебания температуры были в пределах от –2,6 до –2,8 °С, в пе-

риод с 2013 до 2022 гг. эксплуатация участка не производилась. С возобновлением закачки на участке температуры находятся в пределах от –1,95 до –2,52 °С. По наблюдательным скважинам в 2003 г. колебания составили от –1,5 до 3,3 °С, в 2012 г. – от –2,9 до –3,64 °С, в 2022 г. – от –2,2 до –3,44 °С.

Полученные по участкам «Киенгский» и «Левобережный» данные позволяют говорить о влиянии процесса закачки на второй ярус криолитозоны с точки зрения изменения геотермического режима. Проведенным циклом наблюдений установлено, что на уровне рассолопоглощающих интервалов толщи ММП произошло общее снижение температур горных пород на 1,5–2,2 °С. Это связано главным образом с направлением миграции закачиваемых рассолов в криогенных толщах пород, а также с характером тепломассопереноса на участке закачки. Объёмы закачки позволяют сформировать выдержанные аномалии значительной площади, сопоставимые с площадью участков (35 км² – участок «Киенгский»; 50 км² – участок «Левобережный»), т. к. продолжительность и интенсивность воздействия уже не компенсируются инертностью процессов криолитозоны (табл. 3).

Необходимо отметить, что фиксируемое по скважинам участка «Киенгский» распределение температур свидетельствует о достаточно однородном распределении закачиваемых вод, т. е. о сходных гидродинамических параметрах в интервале 120–270 м.

Таблица 3. Изменения температуры по стволу скважин

Table 3. Temperature changes along the wellbore

Глубина, м Depth, m	участок «Киенгский»/Kiengsky site						участок «Левобережный»/Levoberezhny site			
	скважины/wells									
	закачные injection			наблюдательные observation			закачные injection		наблюдательные observation	
	температура по стволу скважины/wellbore temperature, °C									
	2003	2012	2022	2003	2012	2022	2012	2022	2012	2022
100	-1,6	-2,8	-1,95	-1,5	-2,9	-2,2	-2,5	-3	-1,9	-2,5
110	-1,8	-2,7	-2,2	-2,17	-3,4	-2,8	-2,5	-3	-2,2	-3,2
120	-2	-2,66	-2,4	-2,6	-3,55	-3	-2,5	-3	-2,8	-3,6
130	-2,05	-2,66	-2,4	-3,1	-3,62	-3,4	-2,6	-3,1	-3,1	-4,1
140	-2,12	-2,66	-2,5	-3,3	-3,64	-3,44	-2,65	-3,4	-3,3	-5,1
150	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-2,7	-3,1	-3,4	-5,5
160	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-2,7	-3,5	-3,8	-5,6
170	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,2	-3,3	-3,9	-4,8
180	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,2	-4,6	-4	-4,8
190	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,8	-4,7	-4,4	-4,9
200	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,1	-4,75	-4,9	-5,3
210	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-4,9	-4,9	-5,3
220	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,6	-6	-4,9	-5,4
230	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,6	-6	-4,3	-5,4
240	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,7	-5,6	-4,3	-5,4
250	-2,3	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,8	-5,6	-4,3	-5,3
260	-2,3	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-5,4	-4	-5,2
270	-2,38	-2,65	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-5	-4	-5,2

Наблюдаемый процесс уменьшения температуры связан с режимом эксплуатации участков [18, 19]. Дренажные воды, собираемые в руднике, транспортируются по магистральным трубопроводам на расстояния до 20 км. Как отмечалось ранее, в пределах Далдынского кимберлитового поля доминируют отрицательные температуры окружающего воздуха: среднегодовая температура воздуха за многолетний период составляет $-9,5$ °С; среднемесячная температура воздуха самого холодного месяца – января, составляет $-30,6$ °С, что, в свою очередь, приводит к понижению температуры закачиваемых вод до $-8/-10$ °С (в отдельные месяцы температура может опускаться до -15 °С), высокая минерализация до 300–350 г/литр препятствует их замерзанию и позволяет производить закачку.

Учитывая принцип продвижения закачиваемых рассолов в породах второго яруса криолитозоны, а также результаты режимных наблюдений, ставших основой для прогнозного гидродинамического моделирования, можно с уверенностью констатировать, что эксплуатация участков привела к вовлечению в процесс формирования техногенных водоносных горизонтов существенных объёмов вод криолитозоны. Подтверждением данного факта служит существенное уменьшение минерализации вод (с 300–350 до 40–60 г/литр), фиксируемое при опробовании наблюдательных скважин периферийных частей участков.

Химический состав техногенных вод, отобранных из скважин периферийных частей участка «Киенгский», характеризуется как хлоридный магниево-кальциевый. Формула среднего солевого состава вод имеет следующий вид:

- юго-западная часть участка:

$$M42ph4.8 \frac{Cl99SO_4 1}{Ca50Mg29(Na+K)21}; \frac{Ca}{Mg} 1.76; \frac{Na+K}{Cl} 0.22;$$

- северная часть участка:

$$M88ph5.0 \frac{Cl99SO_4 1}{Ca52Mg29(Na+K)19}; \frac{Ca}{Mg} 1.8; \frac{Na+K}{Cl} 0.19;$$

- восточная часть участка:

$$M44ph5.3 \frac{Cl98SO_4 2}{Ca54Mg32(Na+K)14}; \frac{Ca}{Mg} 1.7; \frac{Na+K}{Cl} 0.14;$$

- юг-юго-восточная часть участка:

$$M53ph5.0 \frac{Cl99SO_4 1}{Ca52Mg28(Na+K)20}; \frac{Ca}{Mg} 1.91; \frac{Na+K}{Cl} 0.21.$$

Опробование скважин участка «Левобережный» указывает на схожие трансформационные изменения:

- скважины, удаленные от закачных на расстояние до 1000 м:

$$M141 \frac{Cl99}{Ca50Mg28(Na+K)21} pH5.3;$$

$$\frac{rSO_4 * 100}{rCl} 0.58 \frac{(rNa+rK)*100}{M} 0.4 \frac{rNa+rK}{rCl} 0.22 \frac{rCa}{rMg} 2 \frac{rCl}{Br} 61.07;$$

- скважины в периферийных частях участка:

$$M106 \frac{Cl99}{Ca45Mg34(Na+K)21} pH4.9 \frac{rSO_4 * 100}{rCl} \times \\ \times 0.48 \frac{(rNa+rK)*100}{M} 0.39 \frac{rNa+rK}{rCl} 0.21 \frac{rCa}{rMg} 1.53 \frac{rCl}{Br} 59.07.$$

С учётом планового расположения скважин, а также моделирования в специализированном ПО была составлена схема распределения минерализации в сформированном техногенном водоносном комплексе (рис. 3).

Отдельно необходимо отметить, что схожие закономерности распределения минерализации были выявлены даже на начальных стадиях формирования техногенного водоносного горизонта при изучении участка «Ноябрьский» Алакит-Мархинского кимберлитового поля [20].

Происходящие площадные изменения минерализации, наблюдаемые в техногенных водоносных горизонтах, связаны с взаимодействием закачиваемых рассолов и преимущественно пресных вод криогенной толщи, находящихся первоначально в твёрдом фазовом состоянии.

Для определения минерализации природно-техногенного водоносного горизонта была использована формула (1), исходя из которой известна минерализация закачиваемых вод и их ежесуточный объём, а с учётом известного значения минерализации в конкретной области (зоне) участка можно определить единичный расход и в пересчёте на время – объём вод криогенной толщи, вовлечённый в процесс разбавления закаченных дренажных рассолов.

$$M_{CM} = \frac{M_{ТВ} * Q_{ТВ} + M_{Р} * Q_{Р}}{Q_{ТВ} + Q_{Р}}, \quad (1)$$

где M_{CM} – минерализация техногенного водоносного горизонта, сформировавшаяся в результате смешения дренажных рассолов и вод криогенной толщи; $M_{ТВ}$ – средняя минерализация вод криогенной толщи, замеренная в льдистой фракции керна материала в процессе бурения, которая составляет 2 г/л; $Q_{ТВ}$ – расход вод криолитозоны, возникающий в результате плавления льда; $M_{Р}$ – минерализация дренажных рассолов, составляет 350 г/л; $Q_{Р}$ – расход закачки дренажных рассолов (средневзвешенное значение расхода за год).

Оценка единичного расхода вовлекаемых вод криолитозоны была выполнена по зависимости и отображена на диаграмме (рис. 4).

Объёмы вод криогенной толщи, которые будут вовлечены в процесс формирования природно-техногенных водоносных горизонтов в пределах участков закачки (при условии соблюдения сроков эксплуатации и объёмов закачиваемых вод, приведенных в табл. 2), были определены при помощи моделирования в ПО Feflow и сопутствующих аналитических расчётов по приведенным ранее закономерностям.

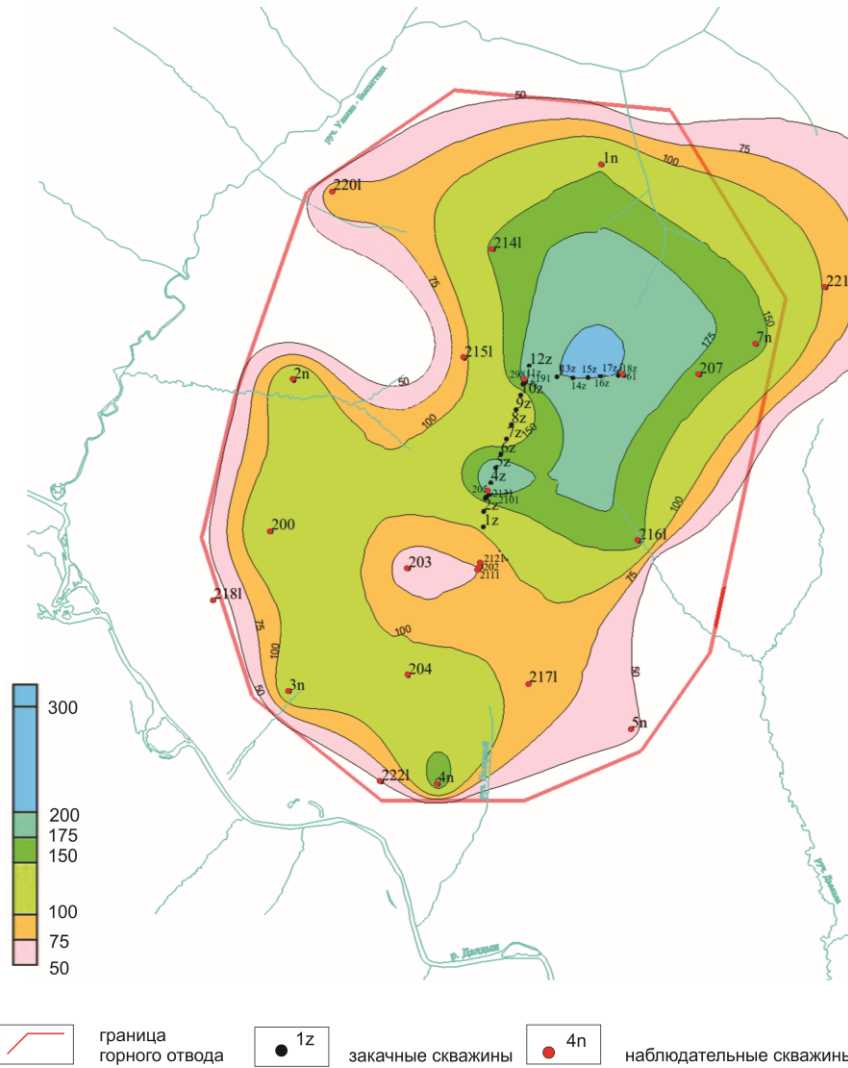


Рис. 3. Схема распределения минерализации природно-техногенного водоносного горизонта на участке «Левобережный» (г/л)
Fig. 3. Scheme of distribution of mineralization of the natural-technogenic aquifer in the Levoberezhny site (g/l)

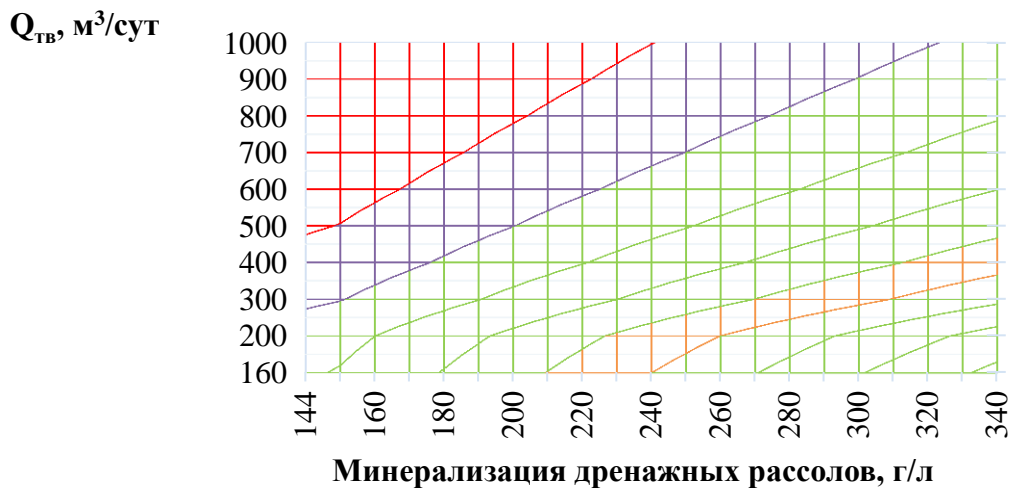


Рис. 4. Минерализация смешанных вод в зависимости от величины вовлекаемых вод криолитозоны и изначальной минерализации дренажных рассолов: красный цвет – 40–60 г/л; желтый – 60–80 г/л; зеленый – 80–200 г/л
Fig. 4. Mineralization of mixed waters depending on the size of the involved permafrost waters and the initial mineralization of drainage brines: red color – 40–60 g/l; yellow – 60–80 g/l; green – 80–200 g/l

Площадное распределение параметра минерализации вод природно-техногенного водоносного горизонта было руководящим фактором по определению единичного расхода вод криогенной толщи, а методы современного моделирования позволили выполнить временную привязку к параметрам эксплуатации участка, а именно к изменяющейся во времени производительности закачки, а не базироваться только на усреднённых величинах объёма закачанных вод и их минерализации, которые дают более высокую погрешность.

Прогнозный объём вод криолитозоны, вовлечённый в процесс формирования природно-техногенных геосистем (при полном заполнении участков) для техногенного водоносного горизонта, связанного зонами вертикальной фильтрации с природным подмерзлотным верхнекембрийским водоносным комплексом в пределах Далдынского кимберлитового поля, составит:

- для участка «Октябрьский» от 40,0 до 45,0 млн м³;
- для участка «Киенгский» от 65,0 до 70,0 млн м³;
- для участка «Левобережный» от 85,0 до 100,0 млн м³;
- для участка «Левобережный-2» от 75,0 до 85,0 млн м³;

Полученная в процессе исследования информация позволяет оценить техногенное воздействие в пределах Далдынского кимберлитового поля. На первом этапе площади участков «Киенгский» и «Левобережный», сформированных во втором ярусе криолитозоны в пределах природно-техногенных систем, составят порядка 85–90 км² и могут быть охарактеризованы как локальные. Однако дальнейшее развитие системы закачки рудника Удачный (планируемое в период 2030–2050 гг.) с использованием дополнительных, в том числе и перспективных, участков: «Левобережный-2», «Далдынский», «Правобережный» и «Сугунахский» [21], увеличит их суммарную площадь до 250 км², что позволит отнести данное воздействие к региональному, т. е. верхнекембрийский водоносный комплекс получит область обеспеченного питания, связанного с формированием техногенных водоносных горизонтов в пределах участков закачки с суммарным объёмом, с учётом вовлечённых вод криолитозоны до 500 млн м³ (0,5 км³). Этот процесс компенсирует сформировавшуюся в интервале верхнекембрийского комплекса депрессионную воронку, уменьшив её радиус, и приведёт к росту притоков (до 30–40 %) к карьерам трубок Зарница и Удачная. Однако, учитывая невысокие параметры водопроводимости коллекторов данного водоносного комплекса, в абсолютных цифрах суммарные притоки будут составлять до 80 м³/сут (0,2 % от суммарного прогнозного притока к месторождениям Далдынского кимберлитового поля, формирующегося в результате дренажа верх-

некембрийского, среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов).

Выводы

Закачка крепких и весьма крепких дренажных рассолов приводит к формированию техногенных водоносных горизонтов в интервалах высокопроницаемых пород второго яруса криогенной толщи. Этот процесс приводит к локальной трансформации криогидрогеологических условий, связанных с температурой и минерализацией закачиваемых вод. Взаимодействие дренажных вод с водами криолитозоны приводит к площадным изменениям минерализации без существенных изменений доминирующих анионов и катионов в пределах изучаемых объектов, формируя на периферийных частях равновесную природно-техногенную систему относительно фоновых температурных условий.

Наибольшие изменения изначальных криогидрогеологических условий, так же как и наибольшая техногенная нагрузка на геологическую среду, ожидаемо приурочены непосредственно к эпицентру закачки, что приводит к формированию линейных зон вертикальной фильтрации в ниже залегающие природные водоносные комплексы.

Выполненные исследования и прогнозные расчёты подтверждают значительное техногенное воздействие и сопряжённую трансформацию в пределах Далдынского кимберлитового поля, что обусловлено криогидрогеологическими условиями обрабатываемых месторождений. Объём сформировавшихся техногенных водоносных горизонтов составит более 300 млн м³. Процесс вовлечения вод криогенной толщи, несмотря на значительные объёмы, имеет положительное влияние на экологическое состояние территории, т. к. в периферийных частях образующихся водоносных горизонтов формируются равновесные криогидрогеологические условия, характерные для природных криопэгов региона исследований.

Проведённые исследования и результаты прогнозного моделирования позволяют сделать вывод, что использование метода закачки дренажных вод способствует уменьшению степени 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 в результате исключения попадания в поверхностные воды дренажных рассолов на всем жизненном цикле обработки месторождений.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. – Мирный: Мирнинская городская типография, 2013. – 568 с.
2. Вигандт В.А. Опыт сооружения и эксплуатации обратной закачки дренажных вод карьера «Мир» // Горный журн. – 1994. – № 9. – С. 60–62.
3. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. – 296 с.
4. Дроздов А.В., Гензель Г.Н. Проблемы эксплуатации системы обратной закачки дренажных вод карьера и рудника Мир // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2015. – № 4. – С. 304–316.
5. Гидрогеоэкологический контроль на полигонах закачки промышленных сточных вод (Методическое руководство) / под ред. В.П. Ильченко. – М.: ИРЦ Газпром, 2000. – 122 с.
6. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media / B. Pouladi, O. Bour, L. Longuevergne, B.J. de La, N. Simon // Journal of Hydrology. – 2021. – Vol. 598. – Article 126450. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126450.
7. Capes D. C., Steelman C.M., Parker B.L. Hydrologic interpretation of seasonally dynamic ambient temperature profiles in sealed bedrock boreholes // Journal of Hydrology. – 2018. – Vol. 567. – P. 133–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.005>.
8. Rajabi M.M., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T. Model-data interaction in groundwater studies: Review of methods, applications and future directions // Journal of Hydrology. – 2018. – Vol. 567. – P. 457–477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.053>.
9. Utilizing cores for characterising the temperature and permeability regimes in a litho-stratigraphic model of the Montserrat geothermal system, Montserrat (Lesser Antilles arc, West Indies) / R.A. Basant, B.Y. Lynne, R. Ramsook, G.A. Ryan, O.O. Blake, J.E.P. Utley // Geothermics. – 2022. – Vol. 100. – Article 102341. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102341.
10. Янников А.М. Гидрогеология Далдынского кимберлитового поля: Республика Саха (Якутия). – Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2023. – 305 с.
11. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. – 507 с.
12. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. – М.: Недра, 1970. – 384 с.
13. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. – Новосибирск: Наука, 1994. – 167 с.
14. 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 (82). – С. 20–35. DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>
15. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемерзлые породы / С.В. Алексеев, А.В. Дроздов, Т.И. Дроздова, Л.П. Алексеева // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI. – № 2. – С. 61–65.
16. The role of seawater freezing in the formation of subsurface brines / B. Herut, A. Starinsky, A. Katz, A. Bein // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1990. – Vol. 54. – Iss. 1. – P. 13–21. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90190-V](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90190-V).
17. Han L., Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation // Journal of Hydrology. – 2022. – Vol. 604. – Article 127203. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127203.
18. Готовцев С.П., Климовский И.В., Шепелев В.В. О важности организации геометрического мониторинга при подземном захоронении дренажных вод в мерзлую толщу // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2015. – № 3. – С. 37–41.
19. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology / V.F. Bense, T. Read, O. Bour, T. le Borgne, T. Coleman, S. Krause, A. Chalarí, M. Mondanos, F. Ciocca, J.S. Selker // Water Resour. Res. – 2016. – Vol. 52. DOI: 10.1002/2016WR018869.
20. Использование ММП для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» / А.М. Янников, С.А. Яникова, М.Ю. Овчинникова, А.Ю. Корепанов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2021. – № 3. – С. 284–299.
21. Янников А.М. Перспективы использования многолетнемерзлых пород Далдынского кимберлитового поля для закачки дренажных вод трубок Зарница и Удачная // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 2. – С. 43–55. DOI: 10.31857/S0869780923020108.

Информация об авторах

Алексей Михайлович Янников, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» ПАО, Россия, 678170, г. Мирный, ул. Ленина, 39; YannikovAM@alrosa.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>

Алексей Юрьевич Корепанов, заведующий лабораторией горно-геологических проблем разработки месторождений Института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» ПАО, Россия, 678170, г. Мирный, ул. Ленина, 39; KorepanovAYu@alrosa.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3593-2524>

Агита Сергеевна Стручкова, заведующий сектором гидрогеологического и гидродинамического моделирования Института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» ПАО, Россия, 678170, г. Мирный, ул. Ленина, 39; StruchkovaAS@alrosa.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>

Поступила в редакцию: 30.10.2023

Поступила после рецензирования: 11.03.2024

Принята к публикации: 03.09.2024

REFERENCES

1. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Mining and geological features of primary diamond deposits of Yakutia*. Mirny, Mirny Town Printing House, 2013. 568 p. (In Russ.)
2. Wigandt V.A. Experience in the construction and operation of reinjection of drainage water from the Mir quarry. *Gornyi Zhurnal*, 1994, no. 9, pp. 60–62. (In Russ.)
3. Drozdov A.V. *The burial of drainage brine in perennial rocks (on the example of cryolitozones of the Siberian platform)*. Irkutsk, IGTU Publ., 2007. 296 p. (In Russ.)
4. Drozdov A.V., Genzel G.N. Problems in operation of drainage water reinjection system at Mir pipe and open pit. *Geokologiya, inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2015, no. 4, pp. 304–316.
5. *Hydrogeoecological control at the landfills of industrial wastewater rolling (methodological guidance)*. Ed. by V.P. Ilchenko. Moscow, IRC Gazprom Publ., 2000. 122 p
6. Pouladi B., Bour O., Longuevergne L., De La Bernardie J., Simon N. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 598, article 126450. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126450.
7. Capes D.C., Steelman C.M., Parker B.L. Hydrologic interpretation of seasonally dynamic ambient temperature profiles in sealed bedrock boreholes. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 567, pp. 133–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.005>
8. Rajabi M.M., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T. Model-data interaction in groundwater studies: Review of methods, applications and future directions. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 567, pp. 457–477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.053>.
9. Basant R.A., Lynne B.Y., Ramsook R., Ryan G.A., Blake O.O., Utley J.E.P. Utilizing cores for characterising the temperature and permeability regimes in a litho-stratigraphic model of the Montserrat geothermal system, Montserrat (Lesser Antilles arc, West Indies). *Geothermics*, 2022, vol. 100, article 102341. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102341.
10. Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Daldyn Kimberlite field: Republic of Sakha (Yakutia)*. Mirnyi, ZYaNTS/YaNA Publ., 2023. 305 p. (In Russ.)
11. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk, IGTU Publ., 2008. 507 p. (In Russ.)
12. *Hydrogeology of the USSR. Vol. XX. Yakut ASSR*. Moscow, Nedra Publ., 1970. 384 p. (In Russ.)
13. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. *Cryolithozone of the Yakut diamondiferous province*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. 167 p. (In Russ.)
14. Yannikov A.M., Struchkova A.S., Korepanov A.Yu. Modeling hydrodynamic regime of the technogenic aquifer within the Noyabrskiy site of the Aikhal mine. *Earth sciences and subsoil use*. 2023, no. 46 (1), pp. 20–35. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>
15. Alekseev S.V., Drozdov A.V., Drozdova T.I., Alekseeva L.P. The first experience of burying saline drainage waters of the Udachnaya pipe open pit in permafrost. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 2, pp. 61–65. (In Russ.)
16. Herut B., Starinsky A., Katz A., Bein A. The role of seawater freezing in the formation of subsurface brines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, vol. 54, Iss. 1, pp. 13–21. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90190-V](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90190-V).
17. Han L., Menzel L. Hydrological variability in southern Siberia and the role of permafrost degradation. *Journal of Hydrology*, 2022, vol. 604, article 127203. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127203.
18. Gotovtsev S.P., Klimovsky I.V., Shepelev V.V. On the importance of organizing geometric monitoring during underground burial of drainage water in the frozen mass. *Arctic and Subarctic Natural*, 2015, no. 3, pp. 37–41. (In Russ.)
19. Bense V.F., Read T., Bour O., Le Borgne T., Coleman T., Krause S., Chalari A., Mondanos M., Ciocca F., Selker J.S. Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology. *Water Resour. Res.*, 2016, vol. 52. DOI: 10.1002/2016WR018869.
20. 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 (Aykhal mine). *Bulletin of Perm University. Geology*, 2021, no. 3, pp. 284–299. (In Russ.)
21. Yannikov A.M. Prospects for the use of perennemier-mowed rocks of the Daldynsky Kimberlite Field for pumping drainage water tubes Zarnitsa and Successful. *Geokologiya, inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2023, no. 2, pp. 43–55. (In Russ.)

Information about the authors

Alexey M. Yannikov, Cand. Sc., Deputy Director for Scientific Work, Yakutniproalmaz Institute of JSC ALROSA PJSC, 39, Lenin street, Mirny, 678170, Russian Federation. YannikovAM@alrosa.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>

Aleksey Yu. Korepanov, Head of the Laboratory of Mining and Geological Problems of Field Development, Institute "Yakutniproalmaz" AK "ALROSA" PJSC, 39, Lenin street, Mirny, 678170, Russian Federation. KorepanovA-Yu@alrosa.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3593-2524>

Agita S. Struchkova, Head of the hydrogeological and hydrodynamic modeling sector of the Yakutniproalmaz Institute, ALROSA PJSC, 39, Lenin street, Mirny, 678170, Russian Federation. StruchkovaAS@alrosa.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>

Received: 30.10.2023

Revised: 11.03.2024

Accepted: 03.09.2024