

ДИНАМИКА И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НИЖНЕКЕМБРИЙСКОГО ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА В ПРЕДЕЛАХ ДАЛДЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ

А.М. Янников¹, И.В. Зырянов², А.Ю. Корепанов¹, А.С. Стручкова¹

¹ Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный,
Республика Саха (Якутия), Россия, e-mail: yannikov90@mail.ru

² Политехнический институт – филиал в Мирном
Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова,
Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

Аннотация: Ведение добычных работ на трубке «Удачная» в пределах Далдынского кимберлитового поля производится подземным способом с использованием опережающего водопонижения в интервале среднекембрийского водоносного комплекса в рамках шахтного поля. Приток природных насыщенных рассолов с минерализацией от 380 до 410 г/л составляет 270—300 м³/ч, при увеличении глубины отработки месторождения приток увеличивается. Проблема безопасной утилизации высокоминерализованных вод является актуальной и требует своевременного проработанного технического решения. В настоящее время для решения вопроса утилизации дренажных вод в промышленном режиме реализована закачка вод в толщу многолетнемерзлых пород (ММП). Начиная с 2021 г., для закачки дренажных вод рудника «Удачный» стали использоваться коллекторы регионального нижнекембрийского водоносного комплекса, залегающие на глубине 1400–1700 м от дневной поверхности. Рассмотрены дальнейшие перспективы использования нижнекембрийского водоносного комплекса для закачки. При помощи программ гидрогеологического моделирования выполнен комплексный прогноз изменения гидродинамического режима на десятилетний период, рассмотрены три этапа опытной эксплуатации участков закачки, а также выполнен анализ структурно-тектонического строения территории и охарактеризованы основные гидродинамические параметры целевых коллекторов.

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, Далдынское кимберлитовое поле, трубка «Удачная», высокоминерализованные природные рассолы, нижнекембрийский водоносный комплекс, карбонатные коллекторы, опережающее водопонижение, системы осушения.

Для цитирования: Янников А. М., Зырянов И. В., Корепанов А. Ю., Стручкова А. С. Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынского кимберлитового поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 60–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_60.

Water drive dynamics and time history prediction in the Low Cambrian aquifer within Daldyn kimberlite field

A.M. Yannikov¹, I.V. Zyryanov², A.Yu. Korepanov¹, A.S. Struchkova¹

¹ «Yakutniproalmaz» Institute, PJSC «ALROSA», Mirny, Russia,
e-mail: yannikov90@mail.ru

² Mirny Polytechnic Institute, Branch of Ammosov North-Eastern Federal University,
Mirny, Russia

Abstract: Udachnaya pipe mining within Daldyn kimberlite field uses the underground method with advanced water depression inside the Middle Cambrian aquifer inside the boundaries of the mine field. The rate of inflow of saturated brines with mineralization from 380 to 410 g/l reaches 270–300 m³/h and increases with growing depth of mining. Safe management of highly mineralized water is a challenging problem and needs a prompt and well-thought-of engineering solution. Currently drain water management includes commercial-scale injection of water in the permafrost strata. Since 2021 Udachny mine injects drain water in the permeable zones of the regional Low Cambrian aquifer at the depth of 1400–1700 m below ground surface. This study discusses the further prospects of using the Low-Cambrian aquifer for the injection of water. The computer-assisted hydrogeological modeling produced an integrated prediction of water drive changes within a period of ten years. Three stages of pilot operation of injection sites are investigated, the tectonic structure of the area is analyzed, and the basic hydrodynamic parameters of the target permeable zones are characterized.

Key words: Yakutian Diamond Province, Daldyn kimberlite field, Udachnaya mine, highly mineralized natural brines, Low Cambrian aquifer, permeable carbonate zones, advanced water depression, drainage systems.

For citation: Yannikov A. M., Zyryanov I. V., Korepanov A. Yu., Struchkova A. S. Water drive dynamics and time history prediction in the Low Cambrian aquifer within Daldyn kimberlite field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(9):60-73. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_60.

Введение

Особенности криогидрогеологического строения трубки «Удачная» в совокупности с применяемой технологией отработки месторождения обуславливают формирование высокоминерализованных дренажных вод, являющихся, по сути, неизменными природными ресурсами среднекембрийского водоносного комплекса, объемы которых составляют порядка 2,63 млн м³ в год.

В настоящее время для решения вопроса утилизации дренажных вод в промышленном режиме реализована закачка вод в толщу многолетнемерзлых пород

(ММП), начиная с 2021 г., в опытно-промышленном режиме осуществляется использование для этих целей коллекторов регионального нижнекембрийского водоносного комплекса. Одной из главных задач для обеспечения безопасности на карьере является изучение гидрогеологических условий месторождения, что необходимо для строительства системы осушения [1–4].

На наш взгляд, наиболее удобным и экологически безопасным вариантом является использование нижнекембрийского водоносного комплекса для закачки высокоминерализованных вод, так

как главным фактором, обеспечивающим безопасность проводимых работ, являются не только глубина залегания коллекторов, свыше 1200 м от дневной поверхности, но и потенциальная «бесконечная емкость» регионального водоносного комплекса. Для обоснования предложенного решения рассмотрим геолого-гидрогеологические условия территории исследований, а также выполним анализ гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса с последующим моделированием и прогнозом динамики изменения гидрогеологической ситуации.

Геолого-гидрогеологические условия территории исследований

Геологические условия изучаемой площади, а именно наличие двух этажей строения (кристаллического фундамента и осадочного чехла) определяются ее нахождением в пределах древнего кратона — Сибирской платформы, а именно приуроченностью к сочленению северо-восточной части Тунгусской синеклизы и юго-западной части Анабарской антеклизы [5].

Осадочный чехол изучаемой площади сложен палеозойскими, в основном кембрийскими карбонатно-терригенными и карбонатными породами, а также четвертичными субаэральными отложениями различных генетических типов. Общая мощность осадочной толщи в районе исследований составляет 2200—2500 м. Выделяемые структурные этажи маркируются перерывами в осадконакоплении, а также угловыми и стратиграфическими несогласиями [6].

Кристаллический фундамент в пределах территории исследований вскрыт скважинами № 703 и № 2531 в интервалах 2421,0—2593,0 и 2478,0—2480,0 м соответственно. Вскрытые породы представлены кристаллическими сланцами

и гранито-гнейсами, в составе гнейсов зафиксированы розовые калиевые полевые шпаты, кварц, роговая обманка, а также значительное количество биотита и астрофиллита.

Гидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к зоне сочленения Оленекского и Верхневилюйского бассейнов. В пределах осадочного чехла выделяются следующие водоносные горизонты и комплексы [7, 8]:

1. Надмерзлотные воды на территории исследований формируются в пределах сезонно-талого слоя (СТС), в несквозных подрусовых (реки Далдын и Сытыкан) и подозерных таликах.

2. Межмерзлотные воды в районе исследований представлены техногенными водоносными горизонтами, образованными в результате закачки дренажных вод на участках «Октябрьский», «Киенгский» и «Левобережный».

3. Водоносные комплексы подмерзлотных вод.

3.1. Верхнекембрийский подмерзлотный водоносный комплекс характеризуется повсеместным распространением, приурочен к карбонатным разностям отложений моркокинской (E_3 mrgk) и мархинской (E_3 mrh) свит верхнего кембрия, характеризующихся частым тонким переслаиванием глинистых и карбонатных пород лагунной фации. Рассолы верхнекембрийского водоносного комплекса обнаруживаются в интервале глубин 250—300 м, общая мощность комплекса составляет от 200 до 350 м, причем эффективная мощность выделяемых коллекторов редко превышает 50—60 м. Верхнекембрийский водоносный комплекс представлен тремя водоносными горизонтами, которые приурочены в основном к отложениям мархинской свиты: подмерзлотный горизонт (региональный); горизонт (спорадический); горизонт (региональный).

Воды подмерзлотного горизонта представлены хлоридными рассолами смешанного катионного состава с минерализацией от 22 до 252 г/дм³. Наиболее крепкие рассолы приурочены к юго-западной части Октябрьского участка зачатки за пределами трапповой дайки, с меньшими значениями — к зонам тектонических нарушений. Основной диапазон минерализации составляет 80—250 г/дм³. Причем с увеличением глубины залегания коллекторов увеличивается и параметр минерализации рассолов [9, 10]. Характерной отличительной особенностью верхнекембрийского водоносного комплекса является малая водообильность и весьма низкие фильтрационные параметры: водопроводимость, как правило, изменяется от 0,0003 до 0,03 м²/сут, проницаемость 0,011—0,5 мД, а открытая пористость пород в среднем не превышает 7—14%. Подземные воды верхнекембрийского комплекса обладают незначительными напорами над кровлей (20—54 м).

С 1984 г. подмерзлотный водоносный горизонт (ВБК) дренируется карьером «Удачный». Комплекс не оказал существенного влияния на обводненность месторождения, так как притоки природных рассолов верхнекембрийского водоносного комплекса в карьер не превышали 40 м³/ч.

В настоящее время водоносный комплекс в пределах карьерного поля существенно дренирован, притоки в карьер не превышают 1 м³/ч.

3.2. Второй от поверхности среднекембрийский водоносный комплекс. Абсолютная отметка кровли составляет –200/–240 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачининской свиты, находящаяся на абсолютных отметках –1000/–1050 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600—650 м, однако эффективная мощность коллекторов составляет 200—250 м.

Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты нерасчлененной известняково-доломитовой толщи и удачининской свиты. Водоносный комплекс напорный [11, 12]. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350—450 м. Коэффициент проводимости (T) составляет от 2,5 до 40 (редко до 60,0) м²/сут. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника «Удачный» (радиусом 1000 м) в объеме 14 000 м³/сут. В настоящее время водоносный комплекс в пределах шахтного поля существенно дренирован только в интервале первого среднекембрийского водоносного горизонта (гор. –465 м), приуроченного к известняково-доломитовой пачке, приток к подземным горным выработкам рудника составляет 9000 м³/сут.

3.3. Третий от поверхности — нижнекембрийский водоносный комплекс. Абсолютная отметка кровли составляет –1050/–1100 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза эмяксинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках –1400/–1450 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300—350 м, однако эффективная мощность коллекторов составляет 100—150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты кумахской и эмяксинской свит [9]. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~1000—1200 м.

Коэффициент проводимости (T) составляет от 15 до 100 (редко до 150—200) м²/сут. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника «Удачный» (радиусом 1000 м) в объеме 64 000 м³/сут. В настоящее время водоносный комплекс не вскрыт.

Характеристика объектов исследований

Участки «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» находятся в бассейне реки Далдын, в пределах Далдынского кимберлитового поля, расположенного в юго-западной части Далдыно-Алакитского алмазоносного района. Выбор данных участков обусловлен наиболее благоприятными фильтрационными и структурно-тектоническими характеристиками, определенными по результатам проведенных опытно-фильтрационных работ [13].

Проведенные исследования показали, что выделенная зона вдоль оси Далдынской флексуры в интервале среднекембрийского (далее СВК) и нижнекембрийского (далее НВК) водоносных комплексов имеет повышенную проницаемость в районе трубки «Удачная», на юго-восточном и северо-западном флангах месторождения.

Результаты геологоразведочных работ указывают на принципиальную возможность использования коллекторов СВК и НВК в зоне Далдынской флексу-

ры в качестве структуры для обратной закачки дренажных вод.

Выделенные перспективные участки «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» расположены в пределах Далдынской флексуры к юго-востоку от рудника:

- участок «Среднекембрийский» (скважины № 2531, 1СК, 2СК) расположен в 5,5 км от месторождения;
- участок «Нижнекембрийский юго-восточный» (скважины № 125 – 126) расположен в 10,5 км (рис. 1).

В настоящее время участок «Среднекембрийский» состоит из 8 скважин, в том числе:

- 5 закачных скважин № 2531, 1НК, 2НК, 3НК, 4НК;
- 3 наблюдательных скважины № 111, 1СК, 2СК.

Глубина скважин на участке составляет от 1100 до 2300 м.

Участок «Нижнекембрийский юго-восточный» состоит из 7 скважин, в том числе:

- 5 закачных скважин № 5НК, 6НК, 7НК, 8НК, 9НК;

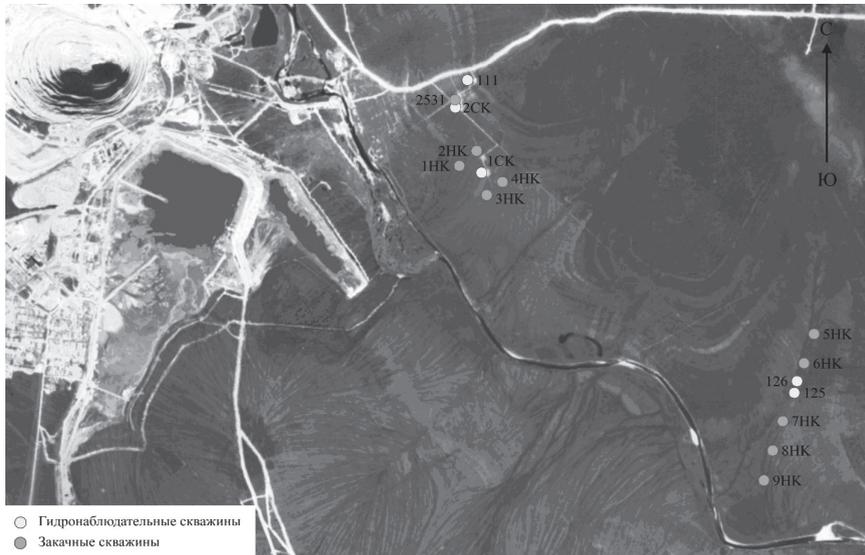


Рис. 1. Схема участков закачки «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный»

Fig. 1. Layout of injection sites Middle Cambrian and Low Cambrian Southeast

- 2 наблюдательных скважин № 125 и № 126.

Глубина скважин на участке составляет 900 – 1700 м.

По результатам проведенных гидрогеологических и геофизических исследований породы, обладающие наилучшими коллекторскими свойствами («рабочие интервалы»), залегают в интервале глубин от 1479 до 1982 м, причем наиболее проницаемые коллекторы приурочены к интервалу 1496 – 1694 м. Поглощающие интервалы представлены кавернозными и трещиноватыми известняками и доломитами кумахской ($E_1 k$) и эмяксинской ($E_1 em$) свит нижнего кембрия.

В настоящее время участки «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» эксплуатируются в опытно-режиме с суммарной производительностью закачки до 300 м³/ч в режиме свободного налива.

Методика исследований

Схематизация гидрогеологических условий трубки «Удачная» и участка закачки были определены в ходе проведенных опытно-фильтрационных работ. В плане область фильтрации представлена пластом, ограниченным с юго-западной стороны Октябрьским разломом, расположенным примерно в 2 км от трубки «Удачная» [10]. Согласно данным опытно-фильтрационных работ, тектонического и геологического строения в районе месторождения выделяется две полосы с разными фильтрационно-емкостными характеристиками. С юго-западной стороны, примыкающей к Октябрьскому разлому, располагается полоса с низкими коэффициентами фильтрации, с северо-восточной стороны по оси Далдынской флексуры располагается полоса более проницаемых пород. Граница между этими полосами проходит между Западным и Восточным

рудными телами. Исходные параметры расчетного комплекса приняты по материалам ранее выполненных научно-исследовательских работ и корректировались на этапе калибровки модели.

Моделирование гидрогеологических условий участков закачки «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» проведено с использованием лицензионной программы FEFLOW, реализующей пространственную фильтрацию подземных вод методом конечных элементов в многослойной толще для областей произвольной конфигурации с изменяющимися по известному закону ГУ I, II и III рода при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе, вертикального переноса.

Площадь района исследований составила 220 км², она определена радиусом влияния системы дренажа рудника «Удачный» и закачкой на описываемых участках. Фильтрационный поток исследуемой области моделировался неструктурированной (нерегулярной) треугольной сеткой с количеством 27 275 элементов в каждом слое с размерами ребер от 0,3 – 0,6 м на участках закачки и в районе карьера, до 300 – 700 м на остальной территории. Такая дискретизация обусловлена необходимостью учета радиусов закачных и дренажных скважин, что влияет на точность прогнозных расчетов [14, 15]. Сетка удовлетворяет критерию Делоне [16, 17].

Для решения прогнозной задачи на участке обратной закачки с учетом откачки подземных вод из рудника, обратной закачки в водоносный комплекс и возможного возврата закачанных вод необходимо выделить три объекта изучения:

- верхнекембрийский водоносный комплекс (ВВК);
- среднекембрийский водоносный комплекс (СВК);
- нижнекембрийский водоносный комплекс (НВК).

Кроме перечисленных водоносных комплексов на модели заданы вертикальные фильтрационные структуры: Октябрьский разлом, западное и восточное рудные тела, трещиноватая зона, примыкающая к ВРТ. Граничными условиями при моделировании выступали карьер, выработки рудника, дренажные и закачные скважины.

При решении обратной задачи было достигнуто пятипроцентное отклонение фактических и модельных параметров на декабрь 2021 г. Что вполне удовлетворительно для дальнейшего прогнозирования изменений гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса.

Результаты и их обсуждение

Для прогнозных расчетов водопонижения и сопутствующей закачки дренажных рассолов рудника «Удачный» была использована разработанная в процессе калибровки гидродинамическая модель. Расчетный период моделирования охватывает отработку месторождения подземным способом в пределах среднекембрийского водоносного комплекса с закачкой дренажных рассолов в нижнекембрийский водоносный комплекс.

Моделирование выполнялось в два этапа при следующих условиях:

1 этап — определение максимальных расходов закачки по участкам и суммарно. Закачка дренажных рассолов рудника «Удачный» задавалась на модели

ГУ 1 рода с поддержанием уровня на устьях скважин для определения максимальных расходов в трех возможных вариантах закачки:

- при свободном наливе во все скважины;
- при свободном наливе в скважины участка «Среднекембрийский»;
- при свободном наливе в скважины участка «Нижнекембрийский юго-восточный».

2 этап — определение избыточных давлений, необходимых для закачки 300 м³/ч. Закачка дренажных рассолов рудника «Удачный» задавалась на модели ГУ 2 рода:

- на участке «Среднекембрийский»;
- на участке «Нижнекембрийский юго-восточный».

3 этап — определение избыточных давлений, необходимых для закачки 600 м³/ч на участках «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный».

1 этап

По результатам моделирования определены максимальные расходы закачки как в оба участка (1 вариант), так и при условии раздельной эксплуатации участков «Среднекембрийский» (2 вариант) и «Нижнекембрийский юго-восточный» (3 вариант). Максимальные прогнозные объемы закачки приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, закачка 300 м³/ч по данным моделирования

Таблица 1

Максимальные прогнозные расходы закачки по скважинам при поддержании уровня на устье скважины
Maximum predicted injection flow rates per boreholes at maintaining of water level at borehole mouth

Вариант	Расходы закачки по скважинам, м ³ /ч										Суммарный расход закачки, м ³ /ч
	2531	1НК	2НК	3НК	4НК	5НК	6НК	7НК	8НК	9НК	
1	71,0	19,3	46,3	29,5	47,6	10,8	50,0	9,4	42,0	20,0	345,9
2	74,3	21,0	49,6	33,1	52,4						230,5
3						12,0	55,0	10,0	48,0	22,0	147,0

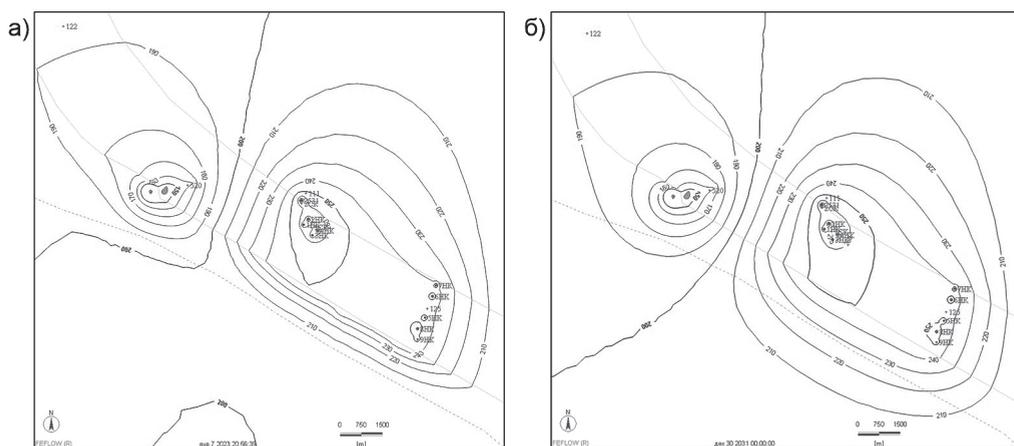


Рис. 2. Положение уровня подземных вод НВК на 1-й год (а) и 10-й год (б) при одновременной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный»

Fig. 2. Ground water level in the Low Cambrian aquifer (LCA) in the 1st (left) and 10th (right) years of simultaneous operation of Middle Cambrian and Low Cambrian Southeast sites

возможна только при работе обоих участков. Стационарный режим при закачке достигается в течение 1–2 лет. Изменение пьезометрической поверхности НВК при условии эксплуатации обоих участков (закачка ведется во все 10 скважин) через 1 год и 10 лет после начала закачки приведено на рис. 2.

2 этап

Для определения избыточного давления на устье скважин при условии раздельной эксплуатации участков «Сред-

некембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» выполнено моделирование гидрогеологических условий с заданием граничного условия 2 рода с суммарным расходом 300 м³/ч (на каждом участке) и распределением его в скважины пропорционально возможным максимальным расходам закачки при свободном наливе (табл. 2).

Исходя из проведенных расчетов, избыточное давление на устье скважины составит 68,4 м для участка «Среднекембрийский» и 124 м — для участка

Таблица 2

Заданные расходы закачки и полученные напоры

Preset injection flow rates and resultant heads

Среднекембрийский участок						
№ скважины	2531	1НК	2НК	3НК	4НК	Среднее
Q, м ³ /ч	100	27	65	41	67	
ΔS, м	91,0	62,5	72,7	53,5	62,2	68,4
ΔP, МПа	0,73	0,50	0,58	0,43	0,50	0,73
Участок Нижнекембрийский юго-восточный						
№ скважины	5НК	6НК	7НК	8НК	9НК	
Q, м ³ /ч	24	112	21	98	45	
ΔS, м	115,8	141,9	151,5	108,5	100,5	124
ΔP, МПа	0,93	1,14	1,21	0,87	0,80	0,93

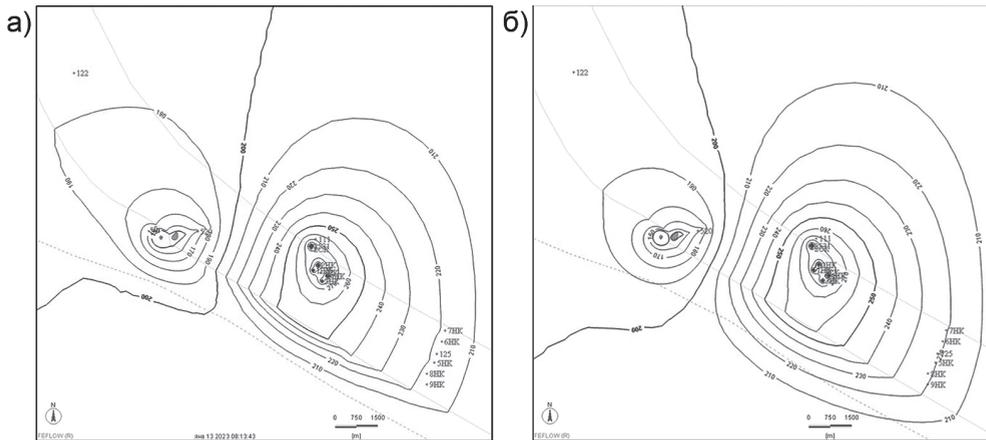


Рис. 3. Положение уровня подземных вод НВК на 1-й год (а) и 10-й год (б) эксплуатации скважин участка «Среднекембрийский»

Fig. 3. Ground water level in LCA in the 1st (left) and 10th (right) years of operations in Middle Cambrian site

«Нижнекембрийский юго-восточный». Стационарный режим фильтрации достигается через ~3 года с начала эксплуатации.

Изменение пьезометрической поверхности НВК при условии эксплуатации участка «Среднекембрийский» (закачка ведется во все 5 скважин) через 1 год и 10 лет после начала закачки приведено на рис. 3.

Изменение пьезометрической поверхности НВК при условии эксплуатации участка «Нижнекембрийский юго-восточный» (закачка ведется во все 5 скважин) через 1 год и 10 лет после начала закачки приведено на рис. 4.

3 этап

Для определения избыточного давления на устье скважин при условии сов-

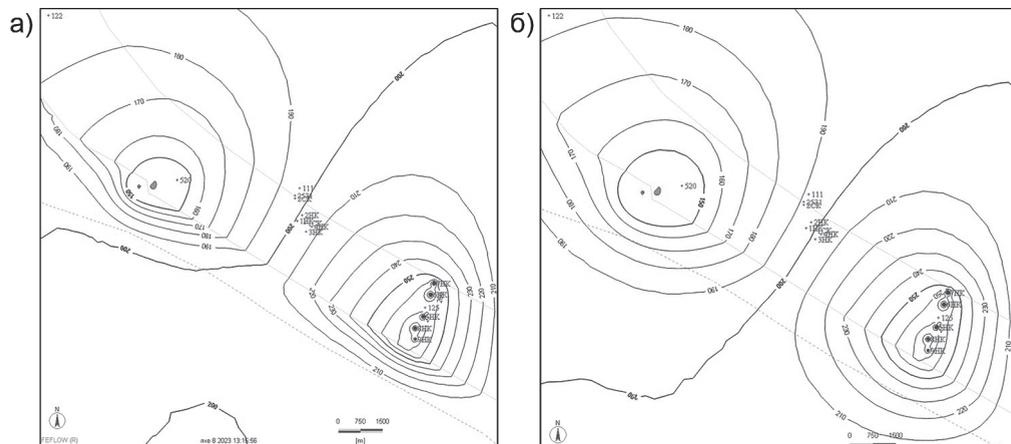


Рис. 4. Положение уровня подземных вод НВК на 1-й год (а) и 10-й год (б) эксплуатации скважин участка «Нижнекембрийский юго-восточный»

Fig. 4. Ground water level in LCA in the 1st (left) and 10th (right) years of operations in Low Cambrian South-east site

Таблица 3

Результаты расчетов прогнозного моделирования при закачке 600 м³/ч
Predictive modeling data at injection flow rate of 600 m³/h

Участок	Среднекембрийский					Нижнекембрийский юго-восточный					
	№ скважины	2531	1НК	2НК	3НК	4НК	5НК	6НК	7НК	8НК	
Q, м ³ /ч	100	27	65	41	67	24	112	21	98	45	сумма 600
S, м	117,5	92,5	102,5	86,4	95,0	145,2	171,5	181,1	139,0	129,0	среднее 126,0
P, МПа	0,94	0,74	0,82	0,69	0,76	1,16	1,37	1,45	1,11	1,03	среднее 1,01

местной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» выполнено моделирование гидрогеологических условий с заданием граничного условия 2 рода с суммарным расходом 600 м³/ч и распределением его в скважины пропорционально возможным максимальным расходам закачки при свободном наливе (табл. 3).

Результаты расчетов показали, что увеличение давления происходит в первые полгода, с выходом в квазистационарный режим через 3 года, далее избыточный напор на устьях скважин по данным моделирования практически не меняется.

Изменение пьезометрической поверхности НВК при условии эксплуатации обоих участков (закачка ведется во все 10 скважин) с суммарным расходом 600 м³/ч через 1 год и 10 лет после начала закачки приведено на рис. 5.

Заключение

На основании результатов проведенных исследований, правомочно сделать следующие выводы:

1. Проблема безопасной утилизации высокоминерализованных вод является актуальной и требует своевременного проработанного технического решения [18, 19]. Одним из решений может явиться закачка вод в глубокозалегающие

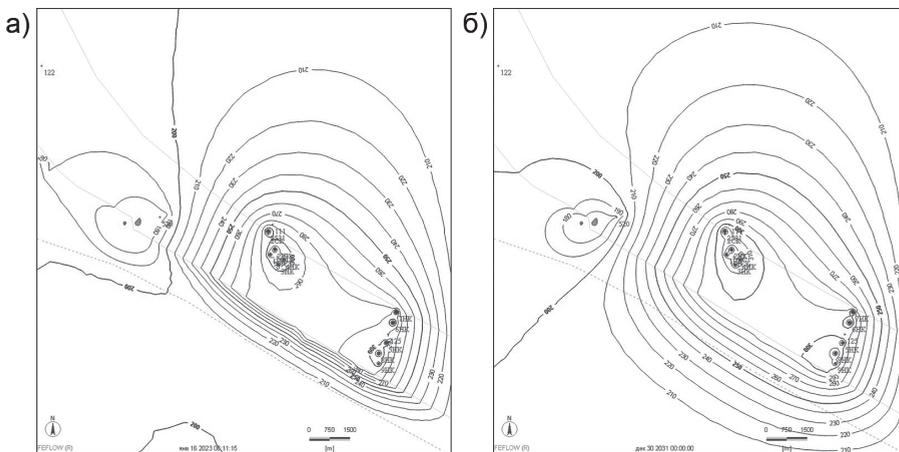


Рис. 5. Положение уровня подземных вод НВК на 1-й год (а) и 10-й год (б) при совместной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» (закачке 600 м³/ч)

Fig. 5. Ground water level in LCA in the 1st (left) and 10th (right) years of simultaneous operation of Middle Cambrian and Low Cambrian Southeast sites at injection flow rate of 600 m³/h

водоносные комплексы. Проведенный анализ геолого-гидрогеологического и структурно-тектонического строения территории, а также проведенные опытно-фильтрационные работы и специализированные исследования позволяют с большой уверенностью говорить о целесообразности применения данного метода.

2. В результате решения обратной задачи расчетные значения коэффициентов фильтрации в НВК в пределах участков закачки составляют 0,167 м/сут. Для периферии значение коэффициента фильтрации составляет 0,001–0,1 м/сут. Значение коэффициента водопроницаемости в интервале НВК принято от 10 до 90 м²/сут. Относительная погрешность модельных и фактических уровней, а также водопритоков к руднику не превысила 5%.

3. Уровень подземных вод в эпицентре закачки за десятилетний период эксп-

луатации в наблюдательных скважинах не превысит экологически безопасных отметок.

4. В результате закачки в нижнекембрийском водоносном комплексе сформируется региональный пьезометрический репрессивный купол.

5. Структурно-геологические и гидрогеологические особенности участков позволяют говорить о том, что при условии поддержания закачных скважин в рабочем состоянии (своевременные чистки скважин) и недопущении закачки рассолов с высоким содержанием взвесей, приводящих к существенному снижению фильтрационных параметров коллекторов, возможна долговременная эксплуатация участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный», как в раздельном, так и в совместном режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янников А. М., Янникова С. А., Корепанов А. Ю. Влияние тектонических нарушений на проектируемые системы опережающего водопонижения на примере трубки «Юбилейная» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-2. — С. 174–186. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_174.

2. Skousen J., Zipper C. E., Rose A., Ziemkiewicz P. F., Nairn R., McDonald L. M., Kleinmann R. L. Review of passive systems for acid mine drainage treatment // *Mine Water and the Environment*. 2017, vol. 36, no. 1, pp. 133–153.

3. Gubina N. A., Ylesin M. A., Karmanovskaya N. V. Ways to increase the productivity and quality of mine water treatment // *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2018, vol. 9, no. 3, pp. 423–427. DOI: 10.14505/jemt.v9.3(27).03.

4. Deal P. T., Sabatini D. A. Utilizing indicator kriging to identify suitable zones for manual drilling in weathered crystalline basement aquifers // *Groundwater for Sustainable Development*. 2020, vol. 11, article 100402. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100402.

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

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

7. Alexeev S. V., Alexeeva L. P., Vakhromeev A. G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects // *Geochemistry*. 2020, vol. 117, article 104588. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104588.

8. Arefieva O. D., Shapkin N. P., Gruschakova N. V., Prokuda N. A. Mine water: chemical composition and treatment // *Water Practice and Technology*. 2016, vol. 11, no. 3, pp. 540–546.

9. Дроздов А. В. Горно-геологические особенности глубоких горизонтов трубки Удачная // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 3. — С. 153–165.

10. Янников А. М. Гидрогеология Алаakit-Мархинского кимберлитового поля. — Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2022. — 132 с.
11. Янников А. М., Янникова С. А., Зырянов И. В., Корепанов А. Ю. Перспективы использования глубокозалегающих водоносных горизонтов для закачки слабоминерализованных вод // Горная промышленность. — 2022. — № 1. — С. 76–81. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-76-81.
12. Янников А. М., Янникова С. А., Овчинникова М. Ю., Корепанов А. Ю. Использование ММП для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» // Вестник Пермского университета. Геология. — 2021. — № 3. — С. 284–299. DOI: 10.17072/pstu.geol.20.3.284.
13. Дроздов А. В., Мельников А. И. Роль разрывных дислокаций в обводнении алмазодобывающих рудников Якутии // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. — 2014. — № 2. — С. 71–81.
14. Pham H. T., Rühaak W., Schuster V., Sass I. Fully hydro-mechanical coupled Plug-in (SUB+) in FEFLOW for analysis of land subsidence due to groundwater extraction // SoftwareX. 2019, vol. 9, pp. 15–19.
15. Nagare R. M., Mohammed A. A., Park Y. J., Schincariol R. A. Modeling shallow ground temperatures around hot buried pipelines in cold regions // Cold Regions Science and Technology. 2021, vol. 187, article 103295.
16. Мельник В. В., Харисов Т. Ф., Замятин А. Л. Методические основы комплексных геомеханических исследований для выбора оптимальных параметров осушения обводненных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 127–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-127-137.
17. Bozau E., Sattler C.-D., van Berk W. Hydrogeochemical classification of deep formation waters // Geochemistry. 2015, vol. 52, pp. 23–30. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.10.018.
18. Лоншаков В. Г., Дружинин И. А., Тимушева Л. В. Обзор проблем в области гидрогеологии и пути их решения / Сборник научных трудов 2-й научно-практической конференции по вопросам гидрогеологии и водообеспечения. — Ижевск: Ижевский нефтяной научный центр, 2020. — С. 45–52.
19. Куликова А. А., Овчинникова Т. И. К вопросу снижения геоэкологических рисков на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2-1. — С. 251–262. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262. **МАН**

REFERENCES

1. Yannikov A. M., Yannikova S. A., Korepanov A. Yu. Influence of tectonic faults on the projected advanced water reduction systems on the example of the «Yubileynaya» pipe. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 174–186. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_174.
2. Skousen J., Zipper C. E., Rose A., Ziemkiewicz P. F., Nairn R., McDonald L. M., Kleinmann R. L. Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*. 2017, vol. 36, no. 1, pp. 133–153.
3. Gubina N. A., Ylesin M. A., Karmanovskaya N. V. Ways to increase the productivity and quality of mine water treatment. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2018, vol. 9, no. 3, pp. 423–427. DOI: 10.14505/jemt.v9.3(27).03.
4. Deal P. T., Sabatini D. A. Utilizing indicator kriging to identify suitable zones for manual drilling in weathered crystalline basement aquifers. *Groundwater for Sustainable Development*. 2020, vol. 11, article 100402. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100402.
5. Kolganov V. F., Akishev A. N., Drozdov A. V. *Gorno-geologicheskie osobennosti korenykh mestorozhdeniy almazov Yakutii* [Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia], LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015, 576 p.

6. Drozdov A. V., Iost N. A., Lobanov V. V. *Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdeniy Zapadnoy Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia], Irkutsk, Izd-vo IGTU, 2008, 507 p.

7. Alexeev S. V., Alexeeva L. P., Vakhromeev A. G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects. *Geochemistry*. 2020, vol. 117, article 104588. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104588.

8. Arefieva O. D., Shapkin N. P., Gruschakova N. V., Prokuda N. A. Mine water: chemical composition and treatment. *Water Practice and Technology*. 2016, vol. 11, no. 3, pp. 540–546.

9. Drozdov A. V. Mining and geological peculiarities of deep layers at Udachaya pipe. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 3, pp. 153–165. [In Russ].

10. Yannikov A. M. *Gidrogeologiya Alakit-Markhinskogo kimberlitovogo polya* [Hydrogeology of the Alakit-Markhin kimberlite field]. Mirnyi, Izd-vo ZYaNTS/YaNA, 2022, 132 p.

11. Yannikov A. M., Yannikova S. A., Zyrianov I. V., Korepanov A. Y. Prospects of using deep-lying aquifers for injection of low-mineralized waters. *Russian Mining Industry*. 2022, no. 1, pp. 76–81. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-76-81.

12. Yannikov A. M., Yannikova S. A., Ovchinnikova M. Yu., Korepanov A. Yu. The use of permafrost for injection of drainage waters of primary diamond deposits on the example of the Noyabrsky site. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 2021, no. 3, pp. 284–299. [In Russ]. DOI: 10.17072/psu.geol.20.3.284.

13. Drozdov A. V., Melnikov A. I. Rupture dislocation role in diamond mine water encroachment in Yakutia. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*. 2014, no. 2, pp. 71–81. [In Russ].

14. Pham H. T., Rühaak W., Schuster V., Sass I. Fully hydro-mechanical coupled Plug- in (SUB+) in FEFLOW for analysis of land subsidence due to groundwater extraction. *SoftwareX*. 2019, vol. 9, pp. 15–19.

15. Nagare R. M., Mohammed A. A., Park Y. J., Schincariol R. A. Modeling shallow ground temperatures around hot buried pipelines in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2021, vol. 187, article 103295.

16. Melnik V. V., Harisov T. F., Zamyatin A. L. Methodological bases of complex geomechanical studies for selecting optimal parameters of drainage of waterlogged areas fields. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 127–137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-127-137.

17. Bozau E., Sattler C.-D., van Berk W. Hydrogeochemical classification of deep formation waters. *Geochemistry*. 2015, vol. 52, pp. 23–30. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.10.018.

18. Lonshakov V. G., Druzhinin I. A., Timusheva L. V. Overview of hydrogeological challenges and ways of their solution. *Sbornik nauchnykh trudov 2-y nauchno-prakticheskoy konferentsii po voprosam gidrogeologii i vodoobespecheniya* [Collection of scientific papers of the 2nd Scientific and Practical Conference on Hydrogeology and Water Supply], Izhevsk, 2020, pp. 45–52. [In Russ].

19. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. On the issue of reducing geocological risks at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 251–262. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Янников Алексей Михайлович¹ — канд. геол.-минерал. наук, зав. лабораторией, e-mail: yannikov90@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2169-123X,

Зырянов Игорь Владимирович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, e-mail: iv.zyrianov@s-vfu.ru, Политехнический институт — филиал в Мирном

Северо-Восточного федерального университета
имени М.К. Аммосова,
Корепанов Алексей Юрьевич¹ – зав. сектором,
e-mail: korepanovayu@alrosa.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3593-2524,

Стручкова Агита Сергеевна¹ – зав. сектором,
e-mail: StruchkovaAS@alrosa.ru,

¹ Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО).

Для контактов: Янников А.М., e-mail: yannikov90@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.M. Yannikov¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Head of Laboratory, e-mail: yannikov90@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2169-123X,

I.V. Zyrianov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair,
e-mail: iv.zyrianov@s-vfu.ru, Mirny Polytechnic Institute,
Branch of Ammosov North-Eastern Federal University,
678174 Mirny, Russia,

A.Yu. Korepanov¹, Head of Sector,
e-mail: korepanovayu@alrosa.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3593-2524,

A.S. Struchkova¹, Head of Sector,
e-mail: StruchkovaAS@alrosa.ru,

¹ «Yakutnioproalmaz» Institute, PJSC «ALROSA»,
678174 Mirny, Russia.

Corresponding author: Yannikov A.M., e-mail: yannikov90@mail.ru.

Получена редакцией 12.07.2022; получена после рецензии 29.07.2022; принята к печати 10.08.2022.

Received by the editors 12.07.2022; received after the review 29.07.2022; accepted for printing 10.08.2022.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Пучков Л.А., Жежелевский Ю.А.

Подземная разработка месторождений полезных ископаемых. Т. 2

Год: 2022

Страниц: 720

ISBN: 978-5-98672-551-2

UDK: 622.27

Рассмотрены процессы подземных горных работ в угольной шахте. Приведены методы определения основных параметров процессов подземных горных работ угольных месторождений и их конструирования. Изложены современные и перспективные направления подземной разработки угольных месторождений и вопросы формирования рациональных вариантов технологических схем угольных шахт.

Дана методика обоснования основных параметров технологических схем шахт и охарактеризованы основные принципы воспроизводства запасов в шахтном поле. Для студентов вузов, обучающихся по специальности 130400 «Горное дело» (специализация «Подземная разработка пластовых месторождений»).