

УДК 556.334:004.94

Янников Алексей Михайлович

кандидат геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, 678174, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Ленина, 39 e-mail: <u>yannikov90@mail.ru</u>

Янникова Светлана Александровна

научный сотрудник, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО; аспирант, Воронежский государственный университет e-mail: <u>yannikovasa@yandex.ru</u>

Корепанов Алексей Юрьевич

начальник комплексного отдела горно-геологических проблем разработки месторождений, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО; аспирант, Воронежский государственный университет e-mail: <u>KorepanovAYu@alrosa.ru</u>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕКЕМБРИЙСКИХ ВОДОНОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБКИ «НЮРБИНСКАЯ» (ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)

Аннотация:

Отработка главного месторождения Накынского кимберлитового поля – трубки «Нюрбинская» – сопряжена со вскрытием коллекторов верхнекембрийских водоносных комплексов, являющихся источником поступления в карьер высокоминерализованных природных рассолов. Технические решения, реализованные в процессе добычи алмазов, оказывают влияние на гидродинамический режим водоносных комплексов: регионального подмерзлотного верхнекембрийского и спорадически распространенного межмерзлотного верхнекембрийского. Моделирование гидродинамического режима является важным методом, применяемым для обработки информации и выполнения прогноза и позволяющим разработать технические меры, способствующие эффективному осушению месторождения. При этом важно принимать во внимание динамику изменения уровенного режима непосредственно в районе карьера, учитывая особенности местной геологии и криогидрогеологии. Прогноз изменения гидродинамического режима осуществлялся при помощи программы гидрогеологического моделирования (ПО Feflow). При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик межмерзлотного верхнекембрийского и подмерзлотного верхнекембрийского водоносных комплексов. В результате была получена новая информация по локальному изменению гидродинамического режима вскрываемых карьером водоносных комплексов. Представлены карты-схемы пьезометрических поверхностей, прослежено развитие депрессионной воронки.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.099

Yannikov Alexey M.

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Yakutniproalmaz Institute, ALROSA PJSC, 39 Lenin Str., 678174 Mirny, Republic of Sakha (Yakutia) e-mail: <u>yannikov90@mail.ru</u>

Yannikova Svetlana A.

Researcher, Yakutniproalmaz Institute, ALROSA PJSC; Postgraduate Student, Voronezh State University e-mail: <u>yannikovasa@yandex.ru</u>

Korepanov Alexey Yu.

Head of the Integrated Department of Mining and Geological Problems of Field Development, Yakutniproalmaz Institute, ALROSA PJSC; Postgraduate Student, Voronezh State University e-mail: <u>KorepanovAYu@alrosa.ru</u>

MODELING OF THE HYDRODYNAMIC REGIME OF THE UPPER CAMBRIAN AQUIFER COMPLEXES DURING THE OPERATION OF THE NYURBINSKAYA PIPE (WESTERN YAKUTIA)

Abstract:

Development of the main deposit of the Nakyn kimberlite field – the Nyurbinskaya pipe – is associated with the opening of Upper Cambrian aquifer reservoirs, which are the source of highly mineralized natural brines entering the quarry. Technical solutions implemented in the process of diamond mining affect the hydrodynamic regime of the aquifer complexes: the regional subpermafrost Upper Cambrian and the sporadically distributed interpermafrost Upper Cambrian. Modeling of the hydrodynamic regime is an important method used for processing information and making a forecast, allowing for the development of technical measures that facilitate the effective drainage of the deposit. It is important to take into account the dynamics of changes in the level regime directly in the quarry area, taking into account the features of local geology and cryohydrogeology. The forecast of changes in the hydrodynamic regime was carried out using the hydrogeological modeling program (Feflow software). When constructing the hydrodynamic model, the hydrogeological characteristics of the interpermafrost Upper Cambrian and subpermafrost Upper Cambrian aquifer complexes were detailed. As a result, we obtained new information on the local change in the hydrodynamic regime of the aquifer complexes opened by the quarry. The paper presents the mapsschemes of piezometric surfaces and traces the development of the depression funnel.

Ключевые слова: Накынское кимберлитовое поле, трубка Нюрбинская, межмерзлотный водоносный комплекс, моделирование гидродинамического режима, водопонижение, природные рассолы. Key words: Nakyn kimberlite field, Nyurbinskaya pipe, interpermafrost aquifer, modeling of the hydrodynamic regime, dewatering, natural brines.

Введение

Среди всех кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции Накынское поле сегодня вызывает наибольший поисковый интерес. Оно находится в пределах Среднемархинского алмазоносного района, на междуречье рек Накын и Хання. Кимберлитовые тела Накынского поля имеют небольшие размеры, характеризуются слабой намагниченностью и перекрыты терригенными мезозойскими осадками мощностью от 50 до 80 м [1, 2].

В процесс отработки месторождений Накынского кимберлитового поля будут вовлечены кимберлиты трубок «Ботуобинская», «Нюрбинская» и тела «Майское». Главным месторождением в настоящее время является трубка «Нюрбинская» (рис. 1). Период эксплуатации трубки по текущему проекту длится до 2040 г., глубина карьера на конец отработки месторождения составит 570 м (+250 м а.о.).



Рис. 1 Плановое расположение объектов исследования

Согласно утвержденным проектам, добыча на этих месторождениях будет осуществляться открытым способом. В процессе будут вскрыты коллекторы двух водоносных комплексов: регионального подмерзлотного верхнекембрийского и спорадически распространенного межмерзлотного верхнекембрийского. В настоящее время оба комплекса вскрыты карьером трубки «Нюрбинская». Осушение, проводимое на территории месторождения, приводит к изменениям в гидродинамическом режиме рассматриваемых комплексов. Это требует тщательного изучения и прогнозирования для эффективного управления над формирующимися дренажными водами.

Цель работы заключалась в моделировании изменения гидродинамического режима верхнекембрийских водоносных горизонтов в период эксплуатации трубки «Нюрбинская», что необходимо для определения объемных показателей процесса закачки дренажных рассолов, которые в настоящее время закачиваются во второй ярус криогенной толщи на территории Ботуобинского участка.

Задачи исследования:

1. Детализация гидрогеологических характеристик вскрываемых водоносных комплексов.

2. Моделирование изменения уровней водоносных комплексов в процессе эксплуатации месторождения.

3. Определение модельных водопритоков в карьер.

4. Установление соответствия полученных на модели значений и фактических.

5. Определение размеров и границ распространения депрессионных воронок, приуроченных к ПВВК и МВВК.

Для успешного выполнения этих задач важно обеспечить точность и полноту исходных данных, а также использовать современные методы и технологии моделирования и анализа.

Краткая характеристика объекта исследований

Кимберлитовая трубка «Нюрбинская» отрабатывается открытым способом с 2002 г. В настоящее время глубина карьера превысила 400 м (абсолютная отметка дна карьера -190 м). Производительность карьера составляла порядка 1 – 1,5 млн т в год [2, 3]. Размеры карьера: по поверхности 1200×1000 м; по дну 80×200 м.

Структурно-тектонические условия карьерного поля определяют Ботуобинский, Диагональный и Широтный разломы. Остальные фиксируемые тектонические нарушения по своей сути являются оперяющими для обозначенных региональных структур (рис. 2). Зафиксированные группы разрывных нарушений хорошо коррелируются с наблюдаемыми притоками и характеризуются зонами динамического воздействия, контролируемыми открытой трещиноватостью в областях развития оперяющих подчиненных разломов, и, как следствие, обладающими большими фильтрационными параметрами. Наибольшее влияние на гидрогеологические условия месторождения оказывает Ботуобинский разлом, динамическая зона которого хорошо коррелирует с плановым распространением межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса [4].

В процессе отработки карьера произошло полное вскрытие межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (МВВК) и частичное – верхнекембрийского подмерзлотного водоносного комплекса (ПВВК). Схема расположения водоносных комплексов в разрезе с основными гидродинамическими и гидрохимическими характеристиками представлена на рис. 3.

Межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс был вскрыт открытыми горными работами на карьере «Нюрбинский» в пределах эксплуатационного горизонта (+55,0...+47,5 м) на абсолютной отметке +47,5 м в 2010 г.

Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс был вскрыт открытыми горными работами на карьере «Нюрбинский» в 2020 г.

ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ



Рис. 2. а) Структурный план центральной части Накынского кимберлитового поля: 1 – известные кимберлитовые тела;

2-7 - осевые зоны разрывных нарушений, выделенные по данным магниторазведки,

сейсморазведки и картирования микротектонических нарушений: Вилюйско-Мархинской зоны низкого порядка;

- 3 Вилюйско-Мархинской зоны высокого порядка;
- 4 Средне-Мархинской зоны низкого порядка;
- 5 Средне-Мархинской зоны высокого порядка (поперечные);
- 6 кимберлитконтролирующий Диагональный; 7 граница исследуемой площади;

б) Карьер тр. «Нюрбинская»:

1 – Ботуобинский разлом; 2 – Диагональный разлом; 3 – Широтный разлом

В настоящее время выполняется разнос бортов карьера до итогового контура, чтобы достичь проектной глубины. В результате увеличивается площадь вскрытия водоносных горизонтов и усиливается приток.

Разгрузка упомянутых водоносных комплексов происходит в выработанное пространство карьера. Расходы МВВК составляют 35 – 39 м³/сут, ПВВК 94 – 100 м³/сут. Прямой гидравлической связи у комплексов нет, спорадически они могут сообщаться через гидродинамические окна – региональные разрывные нарушения.

Объектом изучения выступали коллекторы чаргольской свиты верхнего кембрия, отнесенные к межмерзлотному и подмерзлотному водоносным комплексам [5, 6, 7]. Между комплексами находится толща ММП мощностью не менее 50 м, которая является водоупором для МВВК. Уровни рассматриваемых комплексов отличаются на 18 м. У МВВК уровень +80, у ПВВК +98 (см. рис. 3). Минерализация ПВВК составляет 380 г/л, у МВВК – 150-200 г/л, химический состав вод наследуется.





Межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (МВВК) характеризуется спорадическим распространением. Так, например, в районе трубки «Ботуобинская» и на площади, расположенной южнее Ботуобинского разлома до глубин 300 м, комплекс не отмечен. На участках бурения контрольно-стволовых скважин КСС-1 и КСС-2 межмерзлотные воды не встречены, что подтверждается бурением скважин с очисткой забоя сжатым воздухом до глубины 368 м. В районе месторождения трубки «Нюрбинская» кровля МВВК отмечается на глубинах 167,2 – 190,5 м (в абс. отм. +91,1/+58,2). Кровлей водоносного комплекса являются глинистые многолетнемерзлые отложения балыктахской и чаргольской свит нижнего ордовика и верхнего кембрия. Подошвой служит кровля ММП. Абсолютные отметки кровли +91,1/+58,2. Эффективная мощность – суммарная мощность коллекторов, определенная по керну скважин, в среднем составляет 7,0 м.

Интервалы вскрытия MBBK в пределах карьерного поля трубки Нюрбинская представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ скважины	Интервал водоносного комплекса, от-до Абс. отм.	Мощность комплекса, м	Эффект. мощность, м
5ГВ	<u>167,2-412,6</u> +91,1-/-154,3/	245,4	12,7
9ГВ	<u>166,7-382</u> +91,3-/-124/	215,3	10,7
10ГВ	<u>224,4-461</u> +30,6-/-206/	236,6	14,6
11ГВ	<u>180-398</u> +75-/-143/	218	1,1
13ГВ	<u>208-400</u> +50,3-/-141,7/	192	1,2
15ГВ	<u>208-400</u> +50,3-/-141,7/	192	
6ГР	$\frac{190,5}{+58,2}$		
	·	Среднее	7,0

Интервалы вскрытия МВВК в пределах месторождения

Коллекторами MBBK являются верхнекембрийские трещиноватые известняки, алевролиты и песчанистые доломиты. Общая пористость варьируется в интервале от 5,7 до 35 %, в среднем составляет 20 %; эффективная пористость колеблется от 5,8 до 47,9 %, открытая пористость – в интервале от 4,3 до 28,4 %.

Воды напорные, величина напора составляет 15 – 20 м. Установившийся уровень на глубинах 179,5 – 185,7 м (в абс. отм. +57,7/+70,8 м). По химическому составу воды хлоридные магниево-кальциевые, по минерализации (до 162 г/л) – рассолы, обладающие слабой щелочной реакцией и агрессивностью по отношению к металлам и бетону.

Водоносный комплекс характеризуется весьма низкими фильтрационными свойствами. Водопроводимость 0,001 – 0,20 м²/сут. Дебиты по восстановлению уровня воды в скважинах составляют 0,1 – 2,4 м³/сут. Коэффициент пъезопроводности ~10³.

Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ПВВК) имеет повсеместное распространение, вскрывался глубокими гидрогеологическими скважинами на глубинах 422,4 – 433,0 м (в абс. отм. -164,1÷ -198,6 м). В 2020 г. ПВВК вскрыт карьером. Литологический состав вмещающих пород представлен переслаиванием мергелей, известняков и доломитов чаргольской и джуктинской свит верхнего кембрия. В разрезе выделяются пласты-коллекторы мощностью от 0,2 до 10,6 м, эффективная суммарная мощность которых в среднем достигает 22,2 м. Интервалы вскрытия ПВВК в пределах карьерного поля трубки Нюрбинская представлены в табл. 2.

Таблица 2

№ скважины	Интервал водоносного комплекса, от-до Абс. отм.	Мощность комплекса, м	Эффект. мощность, м
5ГВ	<u>422,4-997,8</u> -164,1/-739,5	575,4	27,3
11ГВ	<u>398-802</u> -143/-547	404	32,1
15ГВ	<u>394,3-750</u> -136/-431,7	355,7	38,7
KCC-1	<u>368,5-1100</u> -112,8/-844,3	731,5	7,4
КСС-2	<u>361,7/-774</u> -107,6/-519,9	412,3	5,5
		Среднее	22,2

Интервалы вскрытия ПВВК в пределах месторождения

Коллекторы ПВВК представлены пористо-кавернозными известняками, оолитовыми доломитами.

В силу высокой глинистости разреза водоносный комплекс характеризуется низкими фильтрационными свойствами. Водопроводимость от 0,001 до 0,31 м²/сут, дебиты по восстановлению – 0,2 – 15,9 м³/сут. Воды напорные, величина напора достигает 250 м. В тектонических зонах подмерзлотный водоносный комплекс обладает повышенными фильтрационными свойствами. На трубке «Нюрбинская» в зоне Ботуобинского разлома по скважине 10ГВ вскрыта обводненная зона долеритов, коррелируемая с подмерзлотным водоносным комплексом. Дебит скважины по восстановлению уровня составил 13,2 м³/сут. Водопроводимость пород комплекса – до 1,52 м²/сут.

Методика исследований

Основным методом прогнозирования, позволяющим обеспечить учет описанных гидрогеологических и горно-геологических условий объекта исследований, выступало гидрогеологическое моделирование. При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик вскрываемых водоносных комплексов. Исходные параметры приняты по материалам ранее выполненных опытно-промышленных и научно-исследовательских работ за весь период отработки месторождения в интервале водоносных комплексов и корректировались на этапе калибровки модели.

Моделирование гидрогеологических условий месторождений Накынского кимберлитового поля 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 [8, 9].

Программа позволяет определять уровни и понижения уровней подземных вод в каждой области фильтрации для каждого слоя, расходы подземных вод в граничных точках изучаемой области, составляющие баланса подземных вод (фильтрация, разгрузка и питание потока подземных вод, перетоки между слоями); автоматически управлять работой граничных условий.

Площадь района исследований составила порядка 400 км² и определена радиусом влияния системы дренажа карьеров Ботуобинский, Нюрбинский, а также закачкой на участке «Ботуобинский». Анализируя гидрогеологические условия территории, было выделено два слоя моделирования – два водоносных комплекса, отличных по гидродинамическим параметрам:

межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (MBBK);

– подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ПВВК).

Решение фильтрационных задач на модели осуществлялось в нестационарном режиме. Более подробно методика моделирования приведена в опубликованных ранее работах [10, 11].

Результаты и их обсуждение

В пределах межмерзлотного водоносного комплекса задавались следующие граничные условия:

1. Условие питания межмерзлотного водоносного комплекса как параметр перетекания из техногенного водоносного горизонта на участке закачки ММП «Ботуобинский» через «гидродинамическое окно» учитывалось на модели заданием ГУ III род в центральной части участка с поддержанием уровня подземных вод на абсолютной отметке H=+100м.

Внешние границы модели заданы непроницаемыми в силу спорадичности МВВК, в западной части задана питающая граница 1 рода, представленная Ботуобинским региональным разломом.

2. Условия разгрузки подземного потока карьером «Нюрбинский», находящимся в режиме реконструкции, учитывались на модели заданием ГУ 1 рода с понижением уровня подземных вод по снижению фактических отметок ведения горных работ.

Решение обратной задачи проводилось методом итераций с использованием данных режимных наблюдений, а также на основе фактических откачек и работы карьерного водоотлива.

По результатам опытно-фильтрационных работ межмерзлотный водоносный комплекс характеризуется весьма низкими фильтрационными параметрами (рис. 4). Коэффициент водопроводимости в среднем составляет 0,03 м²/сут. Дебиты по восстановлению 0,12 – 0,96 м³/сут. В пределах карьерного поля трубки «Нюрбинская» значение водопроводимости до 0,01 м²/сут. Наиболее водообильная зона выделена в югозападной части месторождения, в зоне Ботуобинского разлома (скв. 10ГВ) водопроводимость до 0,98 м²/сут. В рудном теле водопроводимость в пределах от 0,001 до 0,07 м²/сут.



Рис. 4. Схема водопроводимости МВВК

Калибровка гидрогеологической модели на первом этапе проводилась для стационарных условий с целью определения положения уровня подземных вод до начала осушения. На втором этапе решение обратной задачи проводилось в нестационарном режиме с определением погрешности модельных значений на сентябрь 2024 г. (табл. 3). Фактические водопритоки оказались в среднем на 1,5 % выше модельных.

Таблица 3

Гол	Месяц	Водоприток м ³ /сут (модельный)		Водоприток м ³ /сут (фактический)			
100		MBBK	ПВВК	Всего	MBBK	ПВВК	Всего
2023	декабрь	39	100,4	139,4	58,5	150,6	209,1
	январь	38,6	99,9	138,5	57,9	149,8	207,7
	февраль	37,9	99,4	137,3	56,85	149,1	205,9
2024	март	37,8	98,9	136,7	56,7	148,3	205,0
	апрель	37,4	98,4	135,8	56,1	147,6	203,7
	май	37	97,9	134,9	55,5	146,8	202,35
	июнь	36,8	97,4	134,2	55,2	146,1	201,3
	июль	36,2	96,9	133,1	54,3	145,3	199,65
	август	35,8	96,4	132,2	53,7	144,6	198,3
	сентябрь	35,4	95,9	131,3	53,1	143,8	196,95
	октябрь	35	95,4	130,4	52,5	143,1	195,6
	ноябрь	35,2	94,9	130,1	52,8	142,3	195,15
	декабрь	35,2	94,4	129,6	52,8	141,6	194,4

Соответствие между фактическими и модельным водопритоками на расчетный период

Соответствие получаемого на модели распределения уровня подземных вод натурному положению контролировалось по опорным точкам, в качестве которых принимались скважины режимной сети, а также фактические водопритоки в карьер. Полученные фильтрационно-емкостные параметры межмерзлотного водоносного комплекса в результате обратной задачи приведены в табл. 4.

Таблица 4

Фильтрационно-емкостные параметры МВВК, принятые на модели

Характеризуемый элемент гидродинамической системы	Коэффициент фильтрации, м/сут	Упругая емкость, 1/м
Зона Северного разлома	0,00001	1×10 ⁻⁴
Месторождение тр. «Нюрбинская»	0,0002	1×10 ⁻⁹ -1×10 ⁻⁶
Зона Ботуобинского разлома	0,0005	1×10 ⁻⁶
Участок закачки «Ботуобинский»	0.00006-0,5	1×10 ⁻⁴ -1×10 ⁻⁵
Месторождение тр. «Майское»	0,0002-0,0006	1×10 ⁻⁶

В результате моделирования достигнутое соответствие между фактическими и модельными данными уровней подземных вод по скважинам режимной сети и водопритоками в карьер представлены в табл. 5.

Таблица 5

№ скважины	Уровень подземных вод, м абс.		Отклонение	
	Фактический	Модельный	Абсолютное, м	Относительное, %
4c	83,8	83,9	0,1	0,1
5c	98,7	99,9	1,2	0,3
7c	30,2	61,0	30,8	7,6
14ГВ	-	59,9	-	
16ГВ	59,4	59,8	0,4	0,1
17ГВ	21,3	60,0	38,7	9,8
ИГС-1М	-	60,0	-	
Среднее				3,6

Сходимость распределения уровней подземных вод (МВВК), полученных на модели с фактическими значениями

Результаты калибровки модели фильтрации подземных вод показывают допустимую сходимость фактического положения уровней подземных вод водоносных комплексов с модельными значениями. Относительное отклонение не превышает 5 %. Модельное распределение уровней подземных вод межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса на конец 2024 г. представлено на рис. 5. Радиусы формируемых депрессионных воронок в интервале подмерзлотного водоносного комплекса составят от 1 до 2,5 км.

В пределах подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса задавались следующие граничные условия:

1. Условие питания подземного потока на внешних границах модели задано ГУ I рода согласно фактору удаленности от карьера. Использованы значения до начала осушения месторождения.

2. Условия разгрузки подземного потока карьером «Нюрбинский» учитывались на модели заданием ГУ I рода с понижением уровня подземных вод по снижению фактических отметок ведения горных работ.

Результаты опытных работ свидетельствуют о невысоких фильтрационных параметрах подмерзлотного водоносного комплекса (рис. 6).

В большинстве случаев значения коэффициента водопроводимости в пределах 0,0004 – 0,4 м²/сут, только в отдельных скважинах (10ГВ, 7СМ), пройденных в зонах тектонических нарушений, они значительно выше за счет наличия зон повышенной трещиноватости, значение водопроводимости до 1,52 – 1,46 м²/сут.

В пределах карьерного поля трубки «Нюрбинская» водопроводимость до 0,05 м²/сут, наиболее водопроницаемая зона выделена в западной части (зона Ботуобинского разлома, скв. 10ГВ). Рудное тело (скв. 6ГР) характеризуется весьма низкой водопроводимостью от 0,0004 до 0,003 м²/сут (табл. 6).



Рис. 5. Схематическое модельное распределение уровня подземных вод MBBK: а) пьезометрическая поверхность уровней в плане; б) пьезометрическая поверхность в 3D виде



Рис. 6. Схема водопроводимости ПВВК

Таблица 6

Характеризуемый элемент гидродинамической системы	Коэффициент фильтрации, м/сут	Упругая емкость, 1/м
Месторождение тр. Нюрбинская	0,00001-0,0006	1×10 ⁻⁷ -10 ⁻⁹
Межтрубье (скв. КСС1/КСС2)	0,00001	1-5×10 ⁻⁶
Месторождение тр. Ботуобинская	0,00001-0,0004	1×10 ⁻⁶
Зона Ботуобинского разлома	0,00075	1×10 ⁻⁷
Зона Северного разлома	0,0002	1×10 ⁻⁷
Зона Южного разлома	0,00026-0,0009	1×10 ⁻⁷

Фильтрационно-емкостные параметры ПВВК, принятые на модели

Соответствие, получаемое на модели распределения уровня подземных вод, натурному положению контролировалось по опорным точкам, в качестве которых принимались скважины режимной сети. Достигнутое соответствие модельных и фактических уровней подземных вод ПВВК приводится в табл. 7.

Таблица	7

Сходимость распределения уров	ней подземных вод, полученных
на модели с фактич	ескими значениями

№ скважины	Уровень подземных вод, м абс.		Отклонение	
	Фактический	Модельный	Абсолютное, м	Относительное, %
15ГВ	-15,8	-19,51	3,7	0,4
4ΓM	73,0	74,7	11,7	1,4
КСС-1	81,8	90,7	8,9	1,0
КСС-2	45,0	41,6	3,4	0,4
7CM	110,0	86,6	23,4	2,7
8CM	92,2	87,8	4,43	0,5
18ГВ	-42,2	57,2	99,4	11,6
Среднее				2,6



Рис. 7. Схематическое модельное распределение уровня подземных вод ПВВК: а) пьезометрическая поверхность в плане; б) пьезометрическая поверхность в 3D виде

Сходимость фактического положения уровней водоносного комплекса по опорным точкам режимной сети с модельными не превышает допустимое отклонение. Относительное отклонение не превышает 5 %. Модельное распределение уровней подземных вод подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса на конец 2024 г. представлено на рис. 7. Радиусы формируемых депрессионных воронок в интервале подмерзлотного водоносного комплекса составят от 1 до 5 км.

Выводы

В рамках прогнозируемого периода жизненного цикла отрабатываемых месторождений пьезометрическая поверхность межмерзлотного и подмерзлотного водоносных комплексов претерпит существенные изменения: вокруг карьера трубки «Нюрбинская» сформируются две депрессионные воронки, приуроченные к водоносным комплексам (ПВВК и МВВК) разной площади ввиду неограниченного распространения подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса и спорадического распространения межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса.

Из контекста можно сделать вывод, что гидродинамическая модель подземных вод успешно прошла калибровку. Это означает, что модель была настроена таким образом, чтобы ее результаты (положение уровней подземных вод и водопритоки) соответствовали фактическим данным. Допустимая сходимость между фактическими и модельными значениями подтверждает успешность калибровки.

Низкие параметры водопроводимости комплексов обуславливают незначительные радиусы формируемых депрессионных воронок: в интервале подмерзлотного водоносного комплекса они составят от 1 до 5 км; в интервале межмерзлотного водоносного комплекса – от 1 до 2,5 км.

Форма депрессионной воронки контролируется региональными разрывными нарушениями: наибольший северо-восточный радиус формируется по осевой части регионального кимберлитконтролирующего разлома, относящегося к Вилюйско-Мархинской системе.

Полученные данные будут использоваться для своевременного анализа гидрогеологической ситуации и корректировки работы системы осушения месторождения.

Список литературы

1. Коробков И.Г., Евстратов А.А., Коробкова А.И., 2010. Структурно-тектоническое строение Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия). Вестник Санкт-Петербургского университета, Сер. 7, Вып. 4, С. 47–57.

2. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В., 2013. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный, Мирнинская типография, 568 с.

3. Климовский И.В., Готовцев С.П., 1994. *Криолитозона Якутской алмазоносной провинции*. Новосибирск: Наука, 167 с.

4. Янников А.М., 2023. Влияние структурно-тектонического фактора на формирование криогидрогеологических условий Накынского кимберлитового поля. Материалы VI Международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН: геодинамика и минерагения северной Евразии. Улан-Удэ, С. 609-612.

5. Гидрогеология СССР. Том ХХ. Якутская АССР, 1970. Москва: Недра, 384 с.

6. Алексеев С.В., 2009. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 319 с.

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

8. Chen M., Izady A., Abdalla O.A., 2017. An efficient surrogate-based simulationoptimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, vol. 544, pp. 591–603. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol. 2016.12.011

9. Kelson V., 2012. Predicting collector well yields with MODFLOW. *Ground Water*, vol. 50, iss. 6, pp. 918–926. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x.

10. Янников А.М., Стручкова А.С., 2023. Особенности гидрогеологического моделирования цифровых двойников эксплуатируемых коренных месторождений алмазов и сопряженных участков закачки. *Геоэкология*. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология, № 6, С. 71-78. DOI 10.31857/S0869780923060097.

11. Янников А.М., Ильков А.Т., 2021. Формирование рассолопоглощающих коллекторов в толще ММП на примере участка "Ботуобинский" (Республика Саха (Якутия)). Геология и недропользование, № 4, С. 64-73.

References

1. Korobkov I.G., Evstratov A.A., Korobkova A.I., 2010. Strukturno-tektonicheskoe stroenie Nakynskogo kimberlitovogo polya (Zapadnaya Yakutiya) [Structural and tectonic structure of the Nakyn kimberlite field (Western Yakutya)]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta, Ser. 7, Vyp. 4, P. 47–57.

2. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V., 2013. Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdenii almazov Yakutii. Mirnyi [Mining and geological features of indigenous diamond deposits in Yakutya], Mirninskaya tipografiya, 568 p.

3. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P., 1994. Kriolitozona Yakutskoi almazonosnoi provintsii [Cryolithozone of the Yakut diamond-bearing province]. Novosibirsk: Nauka, 167 p.

4. Yannikov A.M., 2023. Vliyanie strukturno-tektonicheskogo faktora na formirovanie kriogidrogeologicheskikh uslovii Nakynskogo kimberlitovogo polya [The influence of structural-tectonic factors on the formation of cryohydrogeological conditions of the Nakyn kimberlite field]. Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 50-letiyu Geologichesko-go instituta im. N.L. Dobretsova SO RAN: geodinamika i minerageniya severnoi Evrazii. Ulan-Ude, P. 609-612.

5. Gidrogeologiya SSSR . Tom XX. Yakutskaya ASSR [Hydrogeology of the USSR. V.XX. Yakut ASSR], 1970. Moscow: Nedra, 384 p.

6. Alekseev S.V., 2009. Kriogidrogeologicheskie sistemy Yakutskoi almazonosnoi provintsii [Cryohydrogeological systems of the Yakut diamond-bearing province]. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo "Geo', 319 p.

7. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V., 2008. Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdenii Zapadnoi Yakutii [Cryohydrogeology of diamond deposits of Western Yakutya]. Irkutsk: Izd-vo IGTU, 507 p.

8. Chen M., Izady A., Abdalla O.A., 2017. An efficient surrogate-based simulationoptimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, vol. 544, pp. 591–603. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol. 2016.12.011

9. Kelson V., 2012. Predicting collector well yields with MODFLOW. *Ground Water*, vol. 50, iss. 6, pp. 918–926. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x.

10. Yannikov A.M., Struchkova A.S., 2023. Osobennosti gidrogeologicheskogo modelirovaniya tsifrovykh dvoinikov ekspluatiruemykh korennykh mestorozhdenii almazov i sopryazhennykh uchastkov zakachki [Features of hydrogeological modeling of digital twins of exploited primary diamond deposits and associated injection sites]. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya, № 6, P. 71-78. DOI 10.31857/S0869780923060097.

11. Yannikov A.M., Il'kov A.T., 2021. Formirovanie rassolopogloshchayushchikh kollektorov v tolshche MMP na primere uchastka "Botuobinskii" (Respublika Sakha (Yakutiya)) [Formation of brine-absorbing collectors in the thickness of MMPs, on the example of the Botuobinsky site (Republic of Sakha (Yakutya))]. Geologiya i nedropol'zovanie, $N_{\rm P}$ 4, P. 64-73.