

## МОДЕЛИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ И ГИДРОГЕОЛОГИИ

УДК 556.388

# ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ И СОПРЯЖЕННЫХ УЧАСТКОВ ЗАКАЧКИ

© 2023 г. А. М. Янников<sup>1,\*</sup>, А. С. Стручкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт “Якутнипроалмаз” АК АЛРОСА (ПАО),  
ул. Ленина 39, Мирный, Республика Саха (Якутия), 678174 Россия

\*E-mail: yannikov90@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023 г.

После доработки 25.09.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Безопасная отработка коренных месторождений алмазов Западной Якутии требует постоянного контроля гидрогеологического режима вскрываемых водоносных комплексов в пределах карьерных и шахтных полей месторождений, а также и на сопряженных участках закачки дренажных вод. За весь период отработки месторождений Алаakit-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского кимберлитовых полей в процесс откачка-закачка было вовлечено порядка 400 млн м<sup>3</sup> высокоминерализованных дренажных вод карьеров и рудников. Сложные криогидрогеологические условия территории такие, как: особенности литолого-фациальных условий, сплошное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), структурная приуроченность кимберлитовых полей, разломно-блоковое строение отдельных трубок, имеют свое влияние на динамику происходящих изменений и делают криогидрогеологические условия каждой отдельной трубки уникальными и не имеющими полных аналогов. С целью успешного прогнозирования и последующей реализации технических решений, направленных на контроль формируемых в пределах шахтных и карьерных полей всех типов притоков, в институте Якутнипроалмаз была создана программа разработки, постоянного поддержания и актуализации “цифровых двойников” всех ключевых обрабатываемых месторождений. Моделирование гидрогеологических условий происходило с использованием лицензионной программы FEFLOW. Разработанные модели учитывают влияние как природных факторов, так и применяемые схемы вскрытия и осушения месторождений, которые накладывают свои ограничения. Создание и обновление постоянно действующих цифровых моделей позволило не только приобрести современный инструмент прогнозирования водопритокков, но и помогло улучшить процесс планирования в части бурения дренажных и закачных скважин, приобретения насосного оборудования и др. Отклонение прогнозных величин от фактически наблюдаемых в рамках краткосрочного прогноза за период использования 2021–2023 гг. составляло от 5 до 10%.

**Ключевые слова:** гидрогеологическое моделирование, кимберлитовое поле, депрессионная воронка, природные рассолы, участки закачки

**DOI:** 10.31857/S0869780923060097, **EDN:** AONHQV

### ВВЕДЕНИЕ

Добыча природных алмазов в Западной Якутии осуществляется в сложных горно-геологических условиях. Все уникальные коренные месторождения: кимберлитовые трубки Айхал, Ботуобинская, Зарница, Интернациональная, Комсомольская, Майская, Мир, Нюрбинская, Сытыканская, Удачная и Юбилейная, прорывают осадочный чехол нижнепалеозойского возраста, в котором в интервале отработки выделяется от трех до четырех водоносных комплексов, содержащих природные рассолы [2, 4]. Перечисленные месторождения относятся к четырем кимберлитовым полям: Алаakit-Мархинскому, Далдынскому, Мирнинскому

и Накынскому, которые в зависимости от своей структурной позиции имеют свои криогидрогеологические особенности: глубины залегания подземных вод, типы природных рассолов, а также водообильность вскрываемых коллекторов.

Независимо от сложности криогидрогеологических условий отдельного месторождения его отработка и сопутствующее водопонижение приводят к формированию разноплощадных депрессионных воронок. А в случае реализации метода обратной закачки, в качестве способа обращения с дренажными водами, пьезометрическая поверхность моделируемых водоносных комплексов начинает напоминать диполь, состоящую из де-

прессионной воронки и наложенного репрессивного купола растекания [1, 3]. Обеспечение безопасных условий отработки требует строительства водоотлива, рассчитанного как на фактические, так и на прогнозные притоки подземных вод. Особенность отработки кимберлитовых тел заключается в планомерном увеличении глубины вскрытия: наиболее богатые трубки на первом этапе вскрываются открытыми горными работами с последующим переходом на подземную добычу. В настоящее время глубина отдельных рудников превысила 1250 м от дневной поверхности [7].

Планомерное увеличение глубины отработки приводит к поэтапному вскрытию водоносных комплексов с постоянным увеличением притоков, причем в зависимости от криогидрогеологических условий отдельно взятого кимберлитового поля, изменение объема дренажных вод может существенно отличаться. Например, суммарный приток рассолов на трубке Айхал при отработке открытым способом до глубины 400 м составлял порядка 40 м<sup>3</sup>/сут; в настоящее время суммарный приток природных рассолов к подземным горным выработкам рудника, с увеличением глубины до 700 м достиг 200 м<sup>3</sup>/сут, а прогнозируемый на конец отработки расход составит до 430 м<sup>3</sup>/сут. По трубке Удачная произошло более существенное увеличение притока при переходе на подземную добычу: при отработке открытым способом до глубины 640 м приток составлял от 1000 до 2000 м<sup>3</sup>/сут; в настоящее время суммарный приток природных рассолов к подземным горным выработкам рудника с увеличением глубины до 970 м достиг 7200 м<sup>3</sup>/сут, а прогнозируемый на конец отработки расход составит до 48000 м<sup>3</sup>/сут [6, 9].

Перечисленные факторы требуют не только комплексной и раздельной оценки поступающих притоков, но и создания инструмента для прогнозирования изменения гидрогеологической обстановки в процессе ведения горных работ. С целью своевременного реагирования на динамику изменения притоков подземных вод и параметров остаточного напора на месторождениях компании в качестве такого инструмента было выбрано гидрогеологическое моделирование на основе постоянно действующих “цифровых двойников”.

#### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБЪЕКТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Гидрогеологические условия являются определяющими при выборе применяемых технологий разработки и опережающего водопонижения. Наиболее простыми гидрогеологическими условиями характеризуются месторождения Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей, наиболее сложными Далдынского и Мирнинского.

Гидрогеологические условия *Алакит-Мархинского кимберлитового поля* определяются его принадлежностью к Тунгусскому криоартезианскому бассейну. Основным объектом изучения здесь выступают подмерзлотные природные рассолы, представленные верхнекембрийским подмерзлотным водоносным комплексом (ВВК), что связано с его доминированием (до 90%) при формировании дренажных вод месторождений [5]. Комплекс характеризуется повсеместным распространением, приурочен к карбонатным разностям отложений моркокинской и мархинской свит верхнего кембрия. Кроме того, в мощной зоне многолетнемерзлых пород ограничено существуют маломощные линзы и прослойки так называемых морозовых пород, имеющих отрицательную температуру, но без наличия жильного льда, содержащих свободную воду. К таким линзам морозовых отложений и приурочен межмерзлотный водоносный нижнеордовикский комплекс, характеризующийся весьма низкими значениями фильтрационных параметров и имеющий ограниченное распространение. Несмотря на низкие фильтрационные параметры данный водоносный комплекс участвует в обводнении месторождения, так как вскрыт подземными горными выработками [7].

Основными гидрогеологическими объектами, осложняющими горнотехнические условия отработки кимберлитовой трубки “Юбилейная” Алакит-Мархинского кимберлитового поля в отм. +620/+470 м, являются несквозные талики озер Проточное и Травянистое, имеющие ограниченное площадное распространение [8].

На месторождениях *Далдынского кимберлитового поля*, помимо ВВК, вскрывается среднекембрийский водоносный комплекс (СВК), приуроченный к переслаивающимся карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи и карбонатным отложениям верхней пачки удачининской свиты, а также нижнекембрийский водоносный комплекс (НВК), расположенный ниже глубины 1350–1450 м и приуроченный преимущественно к трещинно-кавернозным коллекторам в доломитах нижней пачки удачининской свиты и окремненным пористо-кавернозным доломитам кумахской свиты [10].

Гидрогеологические условия *Мирнинского кимберлитового поля* определяются его принадлежностью к Тунгусскому и Якутскому артезианским бассейнам. Здесь главным объектом изучения выступает первый от поверхности подмерзлотный надсолевой метегеро-ичерский водоносный комплекс, что связано не только с его доминированием (до 95%) при формировании дренажных вод месторождений, но и с использованием коллекторов горизонта для обратной закачки. Меньшее влияние имеют: слабоводоносные межсолевой олекминский и эльганский горизонты, обладающие низкими коллекторскими свойствами. Вы-

**Таблица 1.** Гидрогеологическая характеристика обрабатываемых месторождений

Кимберлитовое поле	Месторождение, (трубка)	Вскрываемые водоносные горизонты и комплексы	Прогнозный приток на конец отработки, м <sup>3</sup> /сут	Участок закачки тип коллектора
Алакит-Мархинское	Айхал	Нижнеордовикский Верхнекембрийский	430	Ноябрьский ММП
	Юбилейная	Несквозные талики	150	Пресные воды, не требующие закачки
Далдынское	Зарница	Нижнеордовикский Верхнекембрийский	1000	Заречный ММП
		Верхнекембрийский Среднекембрийский	700	Левобережный-2 ММП Нижнекембрийский юго-восточный региональный подмерзлотный
Мирнинское	Удачная	Верхнекембрийский Среднекембрийский Нижнекембрийский	48 000	Октябрьский ММП Киенгский ММП Левобережный ММП Левобережный-2 ММП Нижнекембрийский юго-восточный региональный подмерзлотный Среднекембрийский региональный подмерзлотный
	Интернациональная	Метегеро-ичерский Олекминский Толбачанский Эльгянский	29 000	УОЗ+УЗВ региональный подмерзлотный
Накынское	Мир	Метегеро-ичерский Олекминский Толбачанский Эльгянский	36 000	Тымтайдахский Южный региональный подмерзлотный
	Ботубобинская	Верхнекембрийский подмерзлотный	100	Ботубобинский ММП
	Нюрбинская	Верхнекембрийский межмерзлотный Верхнекембрийский подмерзлотный	150	

деляемый в рамках толбачанской свиты толбачанский газоводонаосный комплекс, как правило, состоит из 15–17 коллекторов. Несмотря на высокие показатели пластовых давлений, в целом комплекс характеризуется незначительной водообильностью [9].

В пределах *Накынского кимберлитового поля* объектами исследования выступают верхнекембрийский подмерзлотный и верхнекембрийский межмерзлотный водоносные комплексы, последний имеет спорадическое распространение, вскрывался скважинами в пределах тектонических зон Северного и Южного разломов, в ордовикских и верхне-

кембрийских отложениях. Кровлей водоносного комплекса являются глинистые многолетнемерзлые отложения балыктахской и чаргольской свит нижнего ордовика и верхнего кембрия. Водоносный комплекс характеризуется низкими фильтрационными свойствами.

Наибольшие притоки прогнозируются по трубке Удачная (Далдынское кимберлитовое поле), наименьшие – по трубке Ботубобинская (Накынское кимберлитовое поле). Прогнозные притоки природных рассолов, как осложняющий фактор отработки, а также сопряженные участки закачки, приведены в табл. 1.

Исходя из представленной в табл. 1 информации, можно выделить следующие объекты для создания “цифровых двойников”:

1. В пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля – рудник Айхал, карьер Юбилейный, участки закачки Заречный и Ноябрьский.

2. В пределах Далдынского кимберлитового поля – рудник Удачный, карьер Зарница, участки закачки Октябрьский, Киенгский, Левобережный, Левобережный-2, Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

3. В пределах Мирнинского кимберлитового поля – рудники Интернациональный и Мир, участки закачки УОЗ, УЗВ, Тымтайдахский и Южный.

4. В пределах Накынского кимберлитового поля – карьер Ботубобинский, карьер Нюрбинский, участок закачки Ботубобинский.

### МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ СТРУКТУРИРОВАННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

Созданию “цифровых двойников” предшествовали качественный анализ, обобщение с последующим написанием отчетной фондовой документации в части прогноза по остаточной емкости участков, а также определение оптимального режима эксплуатации систем защиты рудников и карьеров от затопления и сопряженных участков за-

качки. В результате полученный массив данных был структурирован в виде базы данных (БД). Иерархия созданной БД представлена на рис. 1, а структура на рис. 2.

Для удовлетворения потребности основного производства – горно-обогатительных комбинатов, в качественно прогнозировании динамики изменения гидрогеологических условий, возникающих в результате техногенного воздействия на геологическую среду, было принято решение о создании целого ряда постоянно действующих гидрогеологических моделей отдельных карьеров, рудников и участков закачки. Отличием постоянно действующих гидрогеологических моделей от прогностических является постоянное пополнение новой информацией, с последующей ежегодной калибровкой и выдачей уточненного краткосрочного (на один год), среднесрочного (на три года) и долгосрочного прогноза (более 3 лет). В случае необходимости созданные модели позволяют оценить притоки к месторождению на всем его “жизненном цикле”.

Решение фильтрационной задачи осуществляется с использованием лицензионной программы FEFLOW, выполняющей моделирование гидрогеологических условий методом конечных элементов в многослойной толще для областей произвольной конфигурации с изменяющимися по известному закону граничных условий (ГУ) I,

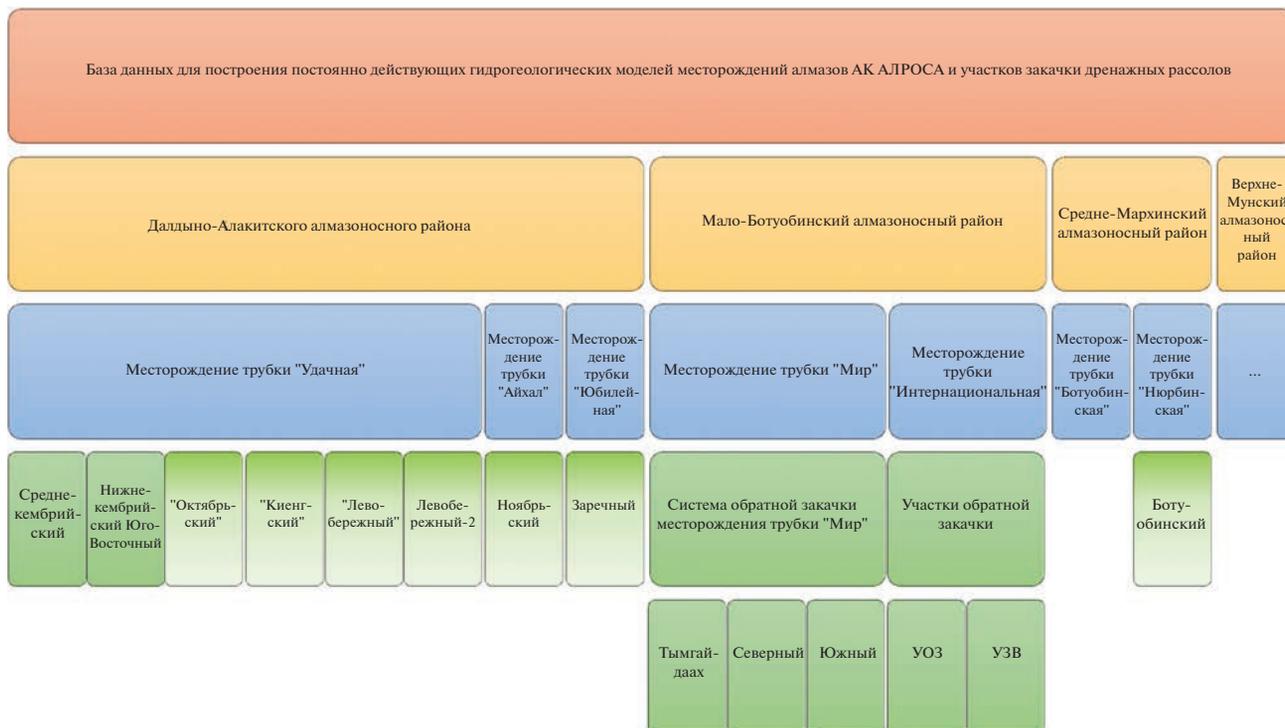


Рис. 1. Иерархия созданной БД гидрогеологических моделей месторождений алмазов АК АЛРОСА и сопряженных участков закачки.

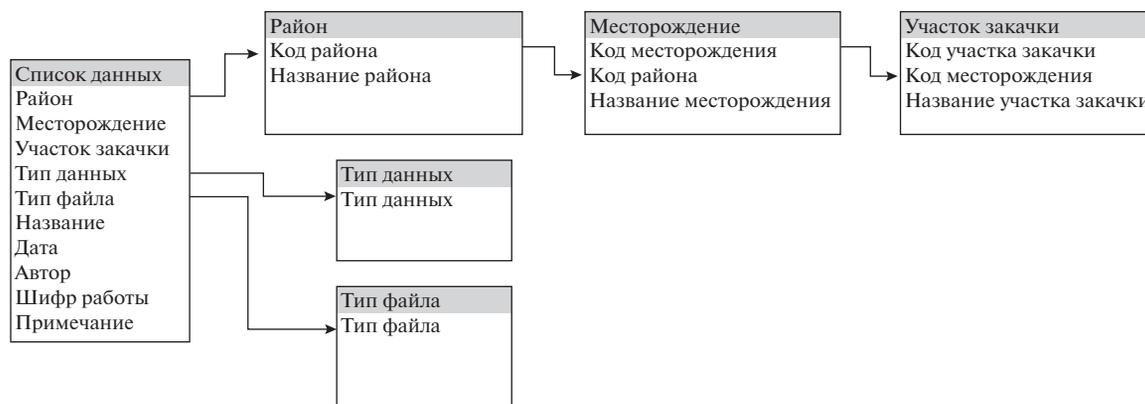


Рис. 2. Структура БД гидрогеологических моделей месторождений алмазов АК АЛРОСА и сопряженных участков закачки.

II, III рода при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе, а также вертикальной фильтрации. В зависимости от гидрогеологических условий отдельного кимберлитового поля и решаемых задач, были определены размеры области фильтрации, реализуемые на модели, позволяющие учитывать в процессе исследований все основные режимобразующие факторы [11].

Для шахтных и карьерных полей создавались 3-мерные многослойные модели. Количество слоев определялось гидрогеологическими условиями (количество водоносных горизонтов) и схемой вскрытия (размер эксплуатационного блока). Дополнительным фактором выступала необходимость прогноза притока для отдельной горной выработки, что требовало создание сетки из десятков тысяч элементов. Например, модель трубки Айхал, описывающая его текущее состояние, т.е. до глубины 700 м от дневной поверхности, состоит из 23 слоев, где карьер задан двумя слоями, нижнеордовикский водоносный комплекс, вскрываемый подземными горными выработками – 9, а верхнекембрийский водоносный комплекс – 12. Моделируемая область шахтного поля размером  $4100 \times 3600 \text{ м}^2$  разбита неравномерной сеткой, состоящей из 68 345 элементов в каждом слое и 34 220 узлов в каждом слайсе. Размеры элементов от 1.5 до 100 м. Размеры элементов определяются существующей инфраструктурой рудника.

При создании моделей подземные горные выработки рудника задавались как ГУ I рода таким образом, чтоб отметка горной выработки в каждом конкретном узле не оказывалась ниже подошвы соответствующего слоя. На ГУ было наложено ограничение по величине стока, чтобы граница не могла выступать в качестве питающей. С помощью функции модуляции учитывались последовательность отработки и схема вскрытия конкретного рудни-

ка. Условия питания подземного потока на границах шахтного поля реализовались на модели ГУ III рода с поддержанием уровня воды на фактически наблюдаемых отметках через дополнительное фильтрационное сопротивление. Разломы, выделяемые в пределах объекта моделирования, также рассматривались в качестве ГУ III рода [12].

В качестве начальных условий, при решении обратной задачи, принималось распределение уровней подземных вод в начальный момент времени. Дополнительными параметрами для итераций являлись:

- балансовые наблюдения на руднике или карьере;
- значения фильтрационных параметров, ранее полученных опытным путем или в процессе выполненных исследований;
- закономерности пространственной изменчивости фильтрационных свойств изучаемого объекта.

Построение гидрогеологических моделей участков закачки, использующих подмерзлотные региональные водоносные комплексы, осуществлялось схожими методами, однако имелся ряд отличий:

- площади моделируемых объектов существенно отличались. Если площади карьерных и шахтных полей, как правило, составляли 3–5 км<sup>2</sup>, то площади участков закачки составляли от 200 до 400 км<sup>2</sup>;
- закачные скважины задавались ГУ II рода.

Моделирование процесса закачки в толщу ММП реализовалось по принципу фильтрации в “сухой грунт” с присущим ему фронтом продвижения границы раздела между “сухим” и насыщенным грунтом. В связи с этим вместо начальных условий для напоров в первом и втором слоях модели задавался признак “сухих” блоков. В дальнейшем при моделировании такие блоки могут “за-

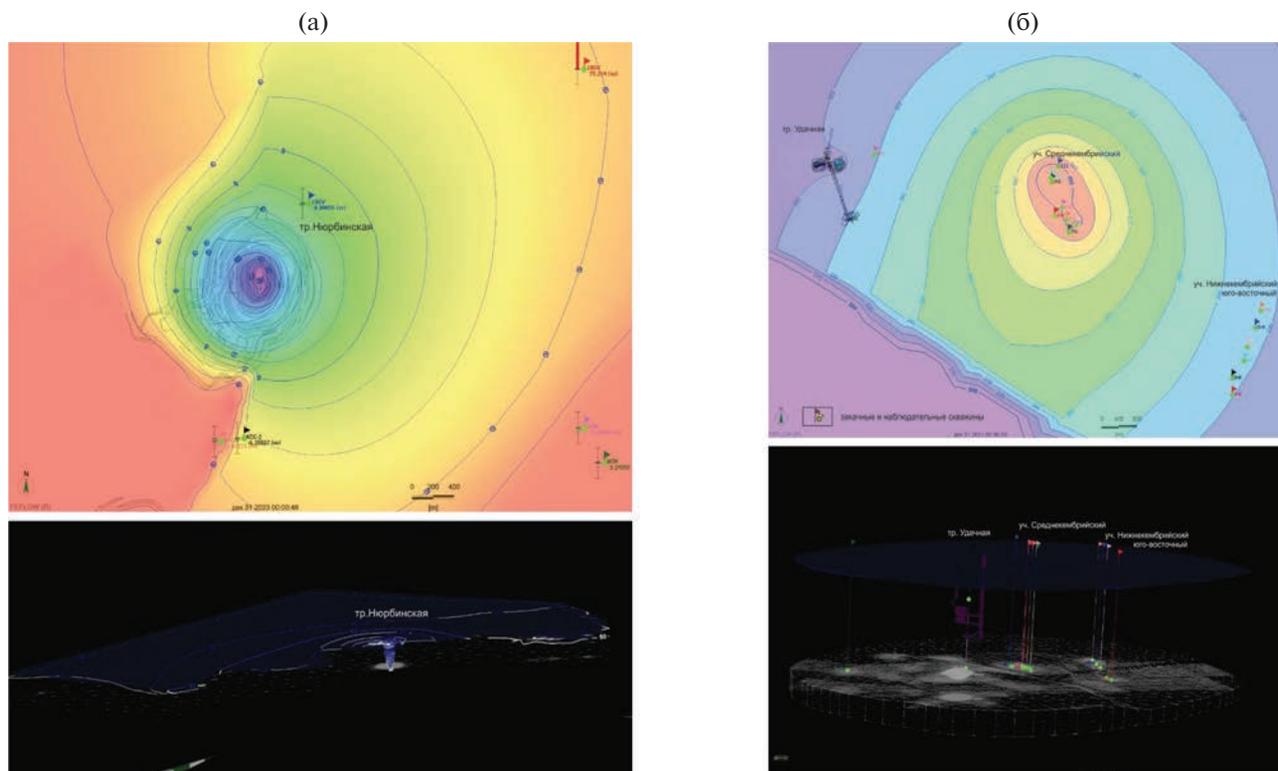


Рис. 3. Прогнозируемое распределение уровня подземных вод в пределах: а – карьерного поля трубки Нюрбинская (абс. отм., м); б – участков закачки Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

мачиваться” при появлении напоров в соседних блоках выше отметок подошвы слоя. На внешних границах 1, 2-го слоев граничные условия не задавались, так как закачиваемые рассолы не достигают внешних границ. Эксплуатационные скважины участков закачки моделировались как граничное условие 2-го рода (задавался фактический расход закачки). Значения фильтрационных параметров (коэффициентов фильтрации и емкостных свойств) принимались по имеющимся литературным и фондовым материалам. В процессе моделирования на этапе решения обратной задачи (калибровка модели) эти параметры уточнялись.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проделанных работ в период 2020–2022 гг. были созданы постоянно действующие “гидрогеологические двойники” основных месторождений компании – трубок Айхал, Ботуобинская, Интернациональная, Мир, Нюрбинская, Удачная и Юбилейная, а также сопряженных участков закачки. В качестве примера реализации программы гидрогеологического моделирования представим “цифровые двойники” трубки Нюрбинская и участков закачки Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный (рис. 3).

Создание и последующая актуализация постоянно действующих моделей позволили не только приобрести современный инструмент прогнозирования водопритоков, но и помогли улучшить процесс планирования в части бурения дренажных и закачных скважин, приобретения насосного оборудования и др. Отклонение прогнозных величин от фактически наблюдаемых в рамках краткосрочного прогноза за период использования 2021–2023 гг. составляло от 5 до 10%.

В настоящее время контроль и актуализация моделей осуществляются силами специалистов института Якутнипроалмаз в следующем режиме: построенные модели ежегодно актуализируются с учетом информации, поступающей непосредственно с объекта и собранной в процессе регламентного ежемесячного гидрогеологического мониторинга. В ноябре каждого года на основе постоянно действующей модели выдается информационный отчет с прогнозным на весь будущий год поблочным распределением притоков подземных вод и картами-схемами распределения уровня (напора), приведенными помесечно. Например, в ноябре 2023 г. в горно-обогатительные комбинаты будут направлены отчеты, содержащие искомую помесечную информацию по притокам и напорам на весь 2024 г. В течение 2024 г.

на основе вновь поступившей информации модель будет ежеквартально актуализироваться и в ноябре 2024 г. будет выдан прогноз на 2025 г.

Дополнительным критерием успешного применения данного инструмента является постоянное расширение портфеля “цифровых двойников”:

– первая модель, построенная в 2020 г. в ПО FEFLOW для рудника Удачный, уже прошла две актуализации в 2021 и 2022 г., в настоящее время подготавливается третья актуализация;

– в 2021 г. по приведенному сценарию были реализованы “цифровые двойники” рудника Интернациональный, Мир, карьеров Нюрбинский и Юбилейный; дополнительно были построены модели участков закачки Киенгский и Левобережный-2;

– в 2022 г. дополнительно были построены модели рудника Айхал и карьера Ботуобинский, а также участков закачки Левобережный, Ноябрьский, Заречный, Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

## ВЫВОДЫ

Постоянно растущая техногенная нагрузка на геологическую среду, возникающая в регионах интенсивного недропользования, требует современных инструментов контроля и прогнозирования. Для обеспечения безопасных условий отработки коренных месторождений алмазов Западной Якутии в АК АЛРОСА в рамках процесса цифровизации производства были реализованы гидрогеологические “цифровые двойники” главных месторождений и сопряженных участков закачки.

Несмотря на применение общепринятых и стандартных решений для прогнозирования динамики подземных вод, создание моделей имеет ряд особенностей в части формирования слоев, количества блоков и размеров элементов, определяемых системами вскрытия и размерами эксплуатационных блоков конкретного месторождения, а также изначальными криогидрогеологическими условиями кимберлитового поля.

Разработанные институтом Якутнипроалмаз гидрогеологические модели соответствуют предъявляемым требованиям, несмотря на сложные криогидрогеологические и структурно-тектонические условия каждого месторождения. Отклонения прогнозных величин не превышают фактически наблюдаемые на 5–10%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавич И.К. Основы гидрогеологической стратификации и обработки информации. М.: МГРИ, 1982. 79 с.

2. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
3. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
4. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
5. Климовский И.В., Готовцев С.П., Шенелев В.В. Гидрогеокриологические условия полигона подземного захоронения дренажных вод трубки “Удачная” // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 3. С. 45–50.
6. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горногеологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: Мирнинская типография, 2013. 568 с.
7. Янников А.М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля. Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021. 240 с.
8. Янников А.М., Брычаев Н.М. Использование природно-техногенных несквозных таликов в качестве резервных источников водоснабжения (на примере участка долины реки Сытыкан, Республика Саха (Якутия)) // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2022. № 4. С. 118–126. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/118-126>
9. Янников А.М., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С. Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынской флексуры // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 9. С. 60–73. [https://doi.org/10.25018/02361493\\_2022\\_9\\_0\\_60](https://doi.org/10.25018/02361493_2022_9_0_60)
10. Bidwell V.J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics // Mathematics and Computers in Simulation. 2005. V. 69. Iss. 1–2. P. 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2005.02.023>
11. Pouladi B., Bour O., Longuevergne L., Bernardie J. de La, Simon N. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media // J. of Hydrology. 2021. V. 598. № 126450. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126450>
12. Zhao C., Wang Y., Chen X., Li B. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software // Ecological Modelling. 2005. V. 187. Iss. 2–3, pp. 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.10.019>

# GEOFILTRATION MODELING OF WATER FLOWS TO PRODUCED PRIMARY DIAMOND DEPOSITS AND INJECTION IN ASSOCIATED AREAS

A. M. Yannikov<sup>a,#</sup> and A. S. Struchkova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Yakutnioproalmaz ALROSA PJSC,  
ul. Lenina, 39, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: yannikov90@mail.ru*

Safe development of primary diamond deposits in Western Yakutia requires constant monitoring of the hydrogeological regime of the exposed aquifer complexes within the quarry and mine fields of the deposits, as well as in the adjacent areas of drainage water injection. Over the entire period of development of the Alakit-Markhinsky, Daldynsky, Mirninsky and Nakynsky kimberlitic fields, about 400 million m<sup>3</sup> of highly mineralized drainage water from quarries and mines were involved in the pumping-injection process. Complex cryohydrogeological conditions of the territory, i.e., lithological-facial specifics, continuous distribution of permafrost, structural confinement of kimberlite fields, fault-block structure of individual pipes, influence the dynamics of occurring changes and make the cryohydrogeological conditions of each individual pipe unique and having no complete analogues. In order to predict successfully and implement subsequently technical solutions aimed at controlling inflows of all types formed within mine and quarry fields, the Yakutnioproalmaz Institute elaborated a program for the development, constant maintenance and updating of hydrogeological “digital twins” of all key mining deposits. The developed models take into account the influence of both natural factors and the applied schemes for opening and draining deposits, which impose their own limitations. The filtration problem was solved out using the licensed program FEFLOW, which performs modeling of hydrogeological conditions by the finite element method in a multilayer strata for areas of arbitrary configuration with boundary conditions of type I, II, III changing according to the known law in the presence of filtration heterogeneities in plan and section, as well as vertical filtration. The creation and constant updating of permanent digital models made it possible not only to acquire a modern tool for forecasting water inflows, but also helped to improve the planning process in terms of drilling drainage and injection wells, purchasing pumping equipment, etc. Deviation of predicted values from those actually observed within the short-term forecast for the period of use 2021–2023 ranged from 5 to 10%.

**Keywords:** *hydrogeological modeling, kimberlitic field, depression funnel, natural brine, injection areas*

## REFERENCES

- Gavich, I.K. [Fundamentals of hydrogeological stratification and information processing]. Moscow, MGRI Publ., 1982, 79 p. (in Russian)
- [Hydrogeology of the USSR. Vol. XX. Yakut ASSR]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 384 p. (in Russian)
- Drozdov, A.V., Iost, N.A., Lobanov, V.V. [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU Publ., 2008, 507 p. (in Russian)
- Klimovskii, I.V., Gotovtsev, S.P. [Cryolithozone of the Yakutsk diamondiferous province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994, 167 p. (in Russian)
- Klimovskii, I.V., Gotovtsev, S.P., Shepelev, V.V. [Hydrogeocryological conditions of the landfill for underground burial of drainage waters from the “Udachnaya” pipe]. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 3, pp. 45–50. (in Russian)
- Kolganov, V.F., Akishev, A.N., Drozdov, A.V. [Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia], *Mirnyi, Mirninskaya tipografiya Publ.*, 2013, 568 p. (in Russian)
- Yannikov, A.M. [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field]. *Mirnyi, ZYANTs/YaNA Publ.*, 2021, 240 p. (in Russian)
- Yannikov, A.M., Zyryanov, I.V., Korepanov, A.Yu., Struchkova, A.S. [Dynamics and forecast of changes in the hydrodynamic regime of the Lower Cambrian aquifer within the Daldynskaya flexure]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2022, no. 9, pp. 60–73. (in Russian)
- Yannikov, A.M., Brychaev N.M. [Using natural and man-made blind taliks as backup sources of water supply (a case study of a section of the Sytykan river valley, Republic of Sakha (Yakutia))]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2022, no. 4, pp. 118–126. (in Russian)
- Bidwell, V.J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2005, vol. 69, issues 1–2, pp. 12–20, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2005.02.023>.
- Pouladi, B., Bour, O., Longuevergne, L., Bernardie, J. de La, Simon, N. Modelling borehole flows from Distributed Temperature Sensing data to monitor groundwater dynamics in fractured media. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 598, 126450. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126450>.
- Zhao, C., Wang, Y., Chen, X., Li, B. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software. *Ecological Modelling*, 2005, vol.187, nos. 2–3, pp. 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.10.019>