

## Моделирование гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса после возобновления добычных работ на месторождении «Мир»

©2021 С. А. Янникова<sup>1,2</sup>, А. М. Янников<sup>1✉</sup>, А. С. Стручкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт «Якутнiproалмаз» АК АЛРОСА (ПАО), ул. Ленина, 39, 678174, Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет,

Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

### Аннотация

*Введение:* Метегеро-ичерский водоносный комплекс (МИВК) формируют порядка 95% притока подземных вод к месторождению «Мир», а также используется для обратной закачки рассолов в недра. Технические решения, реализованные при отработке месторождения, приводили к существенным изменениям и техногенной нагрузке на МИВК. Пьезометрическая поверхность метегеро-ичерского водоносного комплекса за длительный период отработки крупного месторождения алмазов претерпевала сложные изменения. Возобновление добычных работ на месторождении приведет к техногенной нагрузке на геологическую среду и окажет существенное влияние на гидродинамический режим водоносного комплекса.

*Методика:* Для изучения гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса в рамках карьерного поля и сопряжённых узлов обратной закачки были использованы общепринятые методики, используемые при изучении динамики подземных вод. Построение гидрогеологической модели основывалось на определении фильтрационных параметров коллекторов, выполняемом по результатам режимных наблюдений при опытных, одиночных и кустовых откачках за последние 5 лет. Прогноз изменения гидродинамического режима осуществлялся после калибровки построенной модели при помощи программы гидрогеологического моделирования (ПО Modflow).

*Результаты и обсуждение:* Результатом проведенных работ явилась информация по изменению гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса. Представлены карты-схемы распределения напоров в случае возобновления системы опережающего осушения. В процессе моделирования обратной закачки был определен оптимальный режим эксплуатации скважин, расположенных в зоне динамического воздействия Восточного разлома. Максимальная суммарная производительность закачки, при условии сохранения безнапорного режима, составляет от 2000 м<sup>3</sup>/час (в первый год возобновления) с последующим понижением до 1400 м<sup>3</sup>/час. Исходя из проведенного моделирования, можно сделать вывод, что в период с 2038 по 2045 гг. для 100% обеспечения водопонижения в карьерном поле потребуются дополнительная эксплуатация участка закачки в динамической зоне Восточно-Аппаинского разлома. В связи с этим конфигурация пьезометрической поверхности примет ещё более сложный характер.

*Заключение:* Проведенные работы позволили изучить изменения уровня режима метегеро-ичерского водоносного комплекса, возникающие в процессе отработки месторождения «Мир», а также спрогнозировать динамику последующих изменений в зависимости от дополнительной техногенной нагрузки на геологическую среду. Дальнейшая работа по реконструкции карьера должна базироваться на принципе опережающего водопонижения, то есть откачке всех типов вод, посту-



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Янников Алексей Михайлович, e-mail: [yannikov90@mail.ru](mailto:yannikov90@mail.ru)

пающих в чашу карьера, а также объёмов, уже накопившихся в отметках понижения карьера. Закачка такого объёма воды потребует не только модернизации существующей системы водопонижения в районе Восточного разлома, но и возможно строительства новой в динамической зоне Восточно-Аппаинского разлома.

**Ключевые слова:** Мирнинское кимберлитовое поле, трубка «Мир», метегеро-ичерский водоносный комплекс, моделирование гидродинамического режима, водопонижение, узлы закачки.

Для цитирования: Янникова С. А., Янников А. М., Стручкова А. С. Моделирование гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса после возобновления добычных работ на месторождении «Мир» // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. №1. С. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9103>

### Введение

Первый от поверхности подмерзлотный надсолевой метегеро-ичерский водоносный комплекс (МИВК) является самым водообильным водоносным комплексом в пределах Мирнинского кимберлитового поля [1, 2]. Он формирует порядка 95% притока подземных вод к месторождению «Мир», а также комплекс используется для обратной закачки рассолов в недра [3]. Технические решения, реализованные при обработке месторождения «Мир», приводили к существенным изменениям и техногенной нагрузке на МИВК. Пьезометрическая поверхность метегеро-ичерского водоносного комплекса за весьма длительный период обработки крупного месторождения алмазов трубка «Мир», претерпевала сложные и разнополюсные изменения. Возобновление добычных работ на месторождении приведет к техногенной нагрузке на геологическую среду и окажет существенное влияние на гидродинамический режим водоносного комплекса. Прогнозирование данных изменений выполнено в данной статье при помощи программ гидрогеологического моделирования.

### Краткая характеристика изменения пьезометрической поверхности метегеро-ичерского водоносного комплекса в процессе обработки месторождения трубки «Мир»

МИВК отделён от дневной поверхности мощной толщей (300–400 м) многолетнемёрзлых пород холоднохолодской и мирнинской свит. Абсолютная отметка кровли составляет +30/-7 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза ичерской свиты (пласты №№ 25–26 по сводному корреляционному разрезу), находящаяся на абсолютных отметках -130/-171 м. Общая мощность водоносного комплекса в районе трубки «Мир» 168 м. Рассоловмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты [4]. Водоносный комплекс напорный, пластовое давление в неразгруженном состоянии составляет от 20 до 40 кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует стационарному уровню +220 м. Рассматриваемый комплекс, как правило, состоит из 10 коллекторов, 7 из которых приурочены к метегерской свите, 3 – к ичерской [5, 6]. Наибольшей проницаемостью характеризуется 8-й коллектор ичерской свиты, обеспечивающий 90–95% суммарного притока из МИВК, который при полном вскрытии карьером, после строительства противифильтрационной завесы составлял 1200–1250 м<sup>3</sup>/час.

По химическому составу воды комплекса хлоридно-натриевые с минерализацией до 120 г/л. Для вод комплекса характерно высокое содержание сероводорода. Содержание сероводорода до 130 мг/л [7, 8].

В результате выполненного сопоставительного анализа, необходимо выделить пять этапов изменения пьезометрической поверхности метегеро-ичерского водоносного комплекса ввиду техногенной нагрузки. Дополнительные два этапа, к ранее выделенным трём, позволяют в полной мере оценить изменения гидродинамических условий, происходящих на месторождении с 2017 г. Охарактеризуем каждый из предложенных этапов.

**Первый этап** соответствует началу функционирования системы опережающего водопонижения (август 1978 г.). Обработка месторождения осуществлялась под защитой работы водопонижающих скважин, формирующих депрессионную кривую. В разные периоды, в течение практически 10 лет эксплуатации в работе находились от 6 до 16 скважин, с суммарным дебитом от 600 до 960 м<sup>3</sup>/час. В результате эксплуатации системы опережающего водопонижения и карьерного водоотлива произошло общее 340–350метровое понижение уровня до отметки 128 м. Всего за первый этап из метегеро-ичерского водоносного комплекса было откачено 68.9 млн м<sup>3</sup> ненасыщенных хлоридно-натриевых рассолов, что в свою очередь привело к формированию обширной депрессионной воронки, с радиусом влияния порядка 70 км.

**Второй этап** выделяется с апреля 1988 г. После прекращения откачки в пределах карьерного поля началось постепенное восстановление уровня подземных вод. В течение этого этапа, в период с апреля 1990 по апрель 1992 г. были выполнены первые опытные обратные закачки в метегеро-ичерский водоносный комплекс за Восточным разломом (нынешний участок «Тымтайдаахский»). Закачка осуществлялась в опытную скважину №2вн, со средним расходом 300 м<sup>3</sup>/час (в течение 547 дней) и 550 м<sup>3</sup>/час (в течение 183 дней). Всего в течение второго этапа из метегеро-ичерского водоносного комплекса в карьер поступило 15.2 млн м<sup>3</sup>, в то же время в зоне динамического влияния Восточного разлома было закачено 6.3 млн м<sup>3</sup>.

На этот этап также пришлось строительство кольцевой противифильтрационной завесы (ПФЗ). Её сооружение выполнялось в отметках +50/-150 м. Суммарно в коллекторы метегеро-ичерского водоносного

комплекса было закачено 470 тыс. м<sup>3</sup> тампонажного раствора. В результате проведенных работ коэффициент фильтрации в интервале протампонируемых коллекторов уменьшился с 0.1–1.0 м/сут до 0.03–0.045 м/сут. По результатам экспертизы, проведенной фирмой «ГИДЭК», эффективность завесы оценивается равной 25% от проектной. Однако сооружение ПФЗ привело к заметному снижению уровней подземных вод внутри её контура.

В результате работ второго этапа произошел всеместный рост уровней подземных вод. В бывших водопонижающих скважинах уровни повысились до отметок +90 ÷ +100 м. при уровне в карьере на конец этапа +82 м, т.е. подъём уровня в этих скважинах составил порядка 180–200 м. В скважинах, расположенных в радиусе 10–20 км от карьера (скв. №№ 17, 513, 514, 515, 508), рост уровня составил 36–74 м; в скважинах, отстоящих от карьера на 20–30 км (скв. 557, 558, М-8) повышения составили 10–18 м. В скважинах, расположенных от карьера на расстоянии более 50 км (скв. №№ 15, 501, 555 и 553), подъёмы зафиксированы не были, а отмечалось остаточное явление снижения («наследство») от этапа осушения, абсолютные отметки уровней на периферии составили +139 ÷ +215 м.

**Третий этап** начинается с июня 1992 г. с возобновлением горных работ на месторождении и сопутствующим водопонижением. В 1993 г. начата опытно-промышленная закачка в зону динамического воздействия Восточного разлома, с производительностью ~ 12.5 млн м<sup>3</sup> в год. С вводом в эксплуатацию системы обратной закачки образовался мощный техногенный источник питания метегеро-ичерского водоносного комплекса, находящийся в 8.75 км от области разгрузки (карьер «Мир»). В связи с рудничным водоотливом и обратной закачкой воды в пласт сформирована сложная пьезометрическая поверхность с чётко выраженной репрессионной воронкой от обратной закачки (с отметками в эпицентре закачки +200 м) и депрессионной воронкой от водопонижения в карьере (уровень в карьере поддерживался на отм. -130 м), которые в свою очередь наложены на региональную депрессионную воронку.

**Четвёртый этап** выделяется в связи с остановкой добычных работ на месторождении (из-за аварии в августе 2017 г.). Данный этап сопряжён с остановкой как откачки дренажных вод из карьера, так и с остановкой закачки (в 2021 г.) в зоне динамического влияния Восточного разлома. Прогнозная продолжительность данного этапа ~ 14 лет. Т.к. в последующем предполагается восстановление рудника и осуществление водопонижения в пределах шахтного поля, в том числе в интервале метегеро-ичерского водоносного комплекса. В течение данного этапа будет происходить интенсивное восстановление уровня, как в локальном, так и в региональном плане. Ожидаемая продолжительность этапа составит ~ 20 лет.

Выделение **пятого этапа**, необходимо, т.к. после возобновления откачки в пределах карьерного поля,

произойдёт очередная структурная перестройка гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса. Из-за увеличения откачки из карьера, связанной как с уже накопленными (к началу возобновления работ) объёмами рассолов, так и с увеличением площади сечения вскрываемой (дренирующей) выработки, потребуется увеличение производительности системы обратной закачки до 20 млн м<sup>3</sup> в год. Этому увеличению можно добиться двумя способами:

- увеличением количества закачных скважин в зоне динамического влияния Восточного разлома, с обустройством дополнительных закачных рядов;
- строительством новых участков закачки в зоне динамического воздействия Апаинского разлома.

Применение любого из представленных способов приведет к увеличению площадного воздействия от системы обратной закачки, что в свою сторону обеспечит формирование сложной «дипольной» пьезометрической поверхности метегеро-ичерского водоносного горизонта.

При помощи гидрогеологического моделирования выполнен прогноз динамики изменения пьезометрической поверхности метегеро-ичерского водоносного комплекса на период этапов №4 и №5.

#### Методика исследований

При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик МИВК. Исходные параметры расчетного комплекса приняты по материалам ранее выполненных опытно-промышленных и научно-исследовательских работ, за весь период отработки месторождения в интервале водоносного комплекса и корректировались на этапе калибровки модели.

В плане метегеро-ичерский водоносный комплекс в силу изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, литолого-фациальными и структурно-тектоническими факторами, принят кусочно-однородным.

Помимо площадных кусочно-однородных зон на модели отражались элементы неоднородности, такие как зоны разломов и искусственно создаваемые противофильтрационные элементы (ПФЗ). Разломы и ПФЗ на модели задавались фильтрационными барьерами с фильтрационными характеристиками, оттарированными по фактическим наблюдениям за режимом подземных вод МИВК на разных этапах моделирования водопритоков к месторождению.

В качестве начальных условий принималось распределение уровней подземных вод в начальный момент времени, задаваемое во всех точках исследуемой области фильтрации в виде известной функции координат.

Граничные условия задавались для всех граничных точек (внешних и внутренних) области исследований в виде граничных условий (ГУ) I, II и III рода. Начальное распределение напоров для прогнозирования роста уровня рассолов МИВК в карьере после

остановки насосов фирмы РИТЦ задавалось по состоянию на декабрь 2020 г.

Решение обратной задачи проводилось методом итераций с использованием уровневых критериев, результатов режимных и балансовых наблюдений, значений фильтрационных параметров, ранее полученных опытным путем или в процессе выполненных исследований, закономерностей пространственной изменчивости фильтрационных свойств изучаемого объекта [9, 10].

В математической постановке задача фильтрации подземных вод описывается следующим уравнением [11]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = \eta \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где:  $x, y, z$  – координаты, м;  $t$  – время, сут;  $H$  – абсолютная отметка уровня подземных вод, м;  $K_x, K_y, K_z$  – коэффициенты фильтрации в направлении осей  $X, Y, Z$ , м/сут;  $\eta$  – коэффициент упругости пород, 1/м;  $W$  – интенсивность распределенных источников и стоков, 1/сут.

Для решения уравнения, приведенного к схеме плано-пространственной фильтрации, задавались начальные и граничные условия (ГУ).

В качестве начальных условий принималось распределение уровней подземных вод в начальный момент времени  $t_0$ , задаваемых во всех точках исследуемой области фильтрации в виде известной функции координат [12].

Граничные условия задавались для всех граничных точек (внешних и внутренних) области исследований в виде ГУ I, II и III рода для любого участка границы.

На контурах прямой гидравлической связи потока подземных вод с источниками питания и элементами дренажа реализовывались ГУ I рода:

$$H(x, y, z, t) = H_1(t), \quad (2)$$

где:  $H_1(t)$  – значение уровня на границе, м.

Известная величина питания или разгрузки потока подземных вод задается в виде ГУ II рода:

$$Q(t) = -k F \frac{\partial H}{\partial n}, \quad (3)$$

где:  $n$  – нормаль к границе;  $F$  – площадь поперечного сечения потока подземных вод, м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент фильтрации пород, м/сут.

На участках с гидравлическим несовершенством границ задавались ГУ III рода:

$$Q(t) = -\frac{h - h(t)}{\Phi_d}, \quad (4)$$

где:  $Q(t)$  – расход на границе, м<sup>3</sup>/сут;  $h(t)$  – известное значение уровня подземных вод на границе, м;  $h$  – значение уровня подземных вод в области фильтрации, м;  $\Phi_d$  – величина дополнительного фильтрационного сопротивления, характеризующего гидродинамическое несовершенство источника (стока) на границе, сут/м<sup>2</sup>.

Граничные условия на внешних границах модели («удаленные границы») задавались в виде ГУ III рода

с поддержанием уровня подземных вод на абсолютных отметках 180–200 м через дополнительное фильтрационное сопротивление, позволяющее учитывать расширение области фильтрации в процессе осушения и закачки и рассчитываемое по зависимости:

$$\Phi_d = \frac{\Delta L}{bT}, \quad (5)$$

где:  $\Delta L$  – расстояние, на которое «удалена» граница области фильтрации, то есть расстояние от границы области фильтрации до контура с известным напором  $H(x, y, t)$ , м;  $b$  – средняя ширина ленты тока в пределах реализуемого участка «дополнительной» области фильтрации, м;  $T$  – средняя водопроницаемость пласта в пределах реализуемого участка, м<sup>2</sup>/сут.

Решение фильтрационной задачи осуществлялось с использованием лицензионного пакета прикладных программ GMS, созданном в США и получившем неофициальный статус «промышленного стандарта» для решения задач фильтрации и массопереноса во многих странах мира.

Разломы и ПФЗ на модели задавались фильтрационными барьерами в виде:

$$c = k/b, \quad (6)$$

где:  $k$  – коэффициент фильтрации структуры, м/сут;  $b$  – ширина структуры, м.

Калибровка модели проводилась в 2 этапа в следующие периоды времени:

- 2012–2017 гг. до аварии в период работы «сухой» консервации карьера «Мир»;

- 2017–2020 гг. после аварии в период затопления карьера «Мир».

В метегеро-ичерском водоносном комплексе задавались следующие граничные условия:

1. Условия разгрузки подземного потока карьером «Мир», находящемся в режиме «сухой» консервации, учитывались на модели заданием ГУ I рода с поддержанием уровня подземных вод на абсолютной отметке  $H = -125$  м, соответствующей средней отметке подошвы 8-го коллектора.

2. Условия питания подземного потока на участке системы обратной закачки (СОЗ) за Восточным разломом реализовались ГУ II рода ( $Q = \text{Const}$ ) с дебитом  $Q = 1370$  м<sup>3</sup>/ч. Закачка осуществлялась в эксплуатируемые скважины 7<sup>ВН</sup>, 9<sup>ВН</sup>, 10<sup>ВН</sup>, 11<sup>ВН</sup>. Дебит закачки определялся суммой водоотлива из карьера «Мир» с учетом атмосферных осадков и расхода поверхностных вод, поступающих в пруд-накопитель на ручье Тымтайдаах, в соответствии с усредненными фактическими расходами закачки в течение 2007–2016 гг.

3. На участке узла обратной закачки (УОЗ) за Западным разломом закачка промстоков рудника реализована на модели ГУ II рода  $Q = 25$  м<sup>3</sup>/ч в соответствии с фактической среднемесячной производительностью закачки в течение 2007–2016 гг. Закачка осуществлялась в основном в закачные скважины 405, 415, 424 и 441.

На участке узла закачки вод (УЗВ) за Западным разломом закачка воды из карьера «Новинка» реали-

зована на модели ГУ II рода  $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$  в соответствии с фактической среднемесячной производительностью закачки в течение 2007–2016 гг. Закачка осуществлялась в скважины 450з-454з, с 2016 г. в скважины 455з-461з.

В результате выполненной калибровки модели фильтрации подземных вод при решении обратной задачи было достигнуто 5% отклонение фактических и модельных параметров на декабрь 2020 г. Что вполне удовлетворительно для дальнейшего прогнозирования изменений метеоро-ичерского водоносного комплекса.

### Результаты и их обсуждение

Как отмечалось ранее, обработка месторождения «Мир» значительно повлияла на гидродинамический режим метеоро-ичерского водоносного комплекса. Применяемые технические решения при обработке месторождения позволили выделить 3 различных этапа, отличных как по уровню, так и характеру техногенной нагрузки. Текущее состояние месторождения, а также планируемое возобновление добычных работ требуют не только выделения обособленных этапов, но и прогнозирования изменения пьезометрической поверхности метеоро-ичерского водоносного комплекса, опираясь на результаты проведенного моделирования. Прогнозное моделирование в ПО MODFLOW выполнялось для периода (2021–2032 гг.) затопления карьера, согласно принятой на настоящий момент концепции возобновления добычи на месторождении. Прогнозное восстановление уровня приведено в таблице 1.

**Табл. 1.** Результаты прогнозного моделирования  
**[Table 1. Results of the prediction modelling]**

№ п/п [No.]	Дата [Date]	Отметка воды в карьере, м абс. [Quarry water mark, m abs.]
1	03.12.2020	10
2	28.03.2021	20
3	17.08.2021	30
4	27.01.2022	40
5	29.07.2022	50
6	22.02.2023	60
7	12.10.2023	70
8	01.07.2024	80
9	24.04.2025	90
10	25.03.2026	100
11	11.04.2027	110
12	22.06.2028	120
13	07.11.2029	130
14	15.04.2031	140
15	21.12.2032	150

По результатам выполненных исследований можно сделать выводы, что к окончанию 4 этапа техногенного воздействия на метеоро-ичерский водоносный комплекс произойдет восстановление уровня до

отм +140/+145 м, т.е. распределение напоров составит 80% от равновесного природного (статического). Дальнейшее восстановление уровня до отм. +220 м будет нарушено в связи с началом восстановлением добычных работ, и сопряженным осушением шахтно-го и карьерного полей.

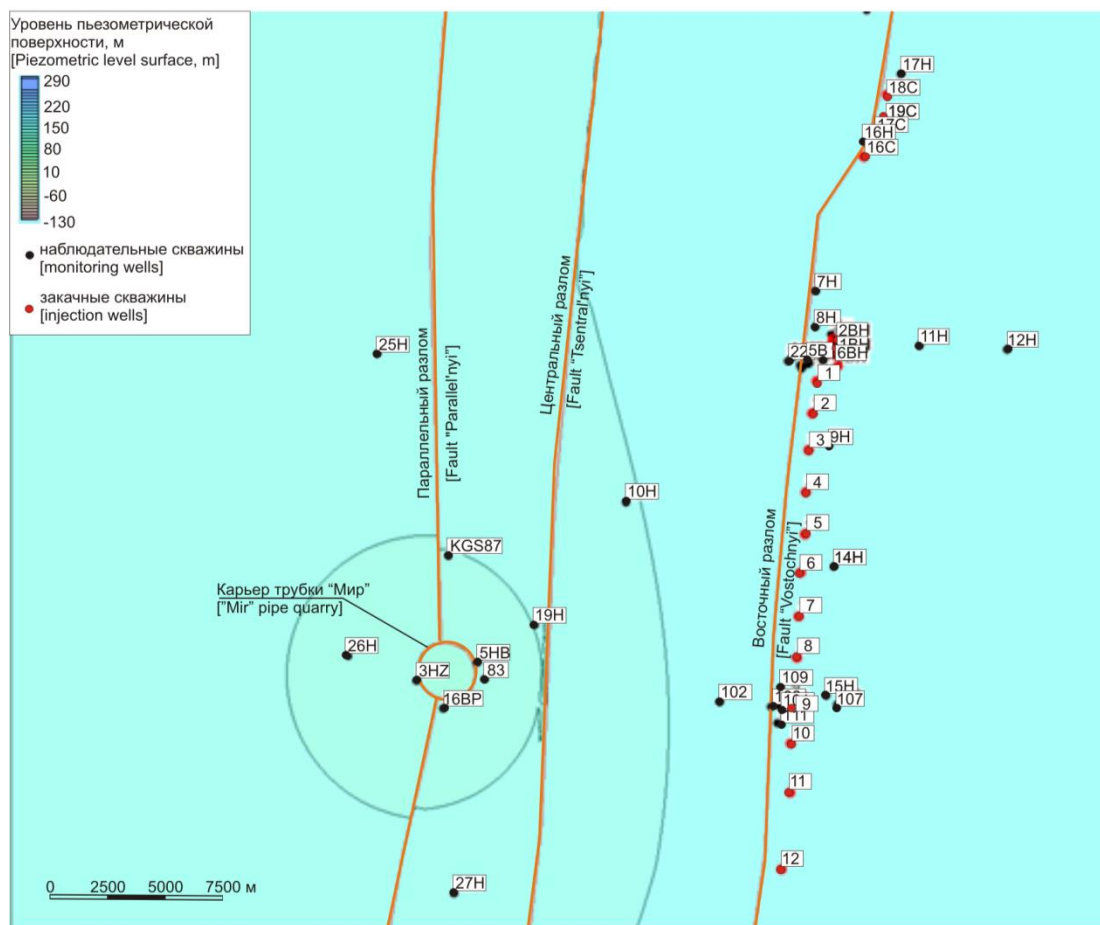
Этап 5 (его начало) будет неразрывно связан с откачкой накопленных в карьере трубки «Мир» природных рассолов и метеорных вод. В настоящее время согласно разработанной концепции восстановления добычи на месторождении трубки «Мир», начало реконструкции карьера предусмотрено с 2031 г. Объем накопленных в карьере вод к этому моменту составит ~ 70 млн  $\text{м}^3$ .

Дальнейшая работа по реконструкции карьера должна базироваться на принципе опережающего водопонижения, то есть откачке всех типов вод, поступающих в чашу карьера, а также объемов уже накопившихся в отметках понижения карьера вод. Суммарный объем вод, требующих закачки в период с 2038 по 2044 гг., составит ~ 124 млн.  $\text{м}^3$ . Закачка такого объема воды потребует не только модернизации существующей системы водопонижения в районе Восточного разлома, но и возможно строительства новой в динамической зоне Восточно-Аппаинского разлома.

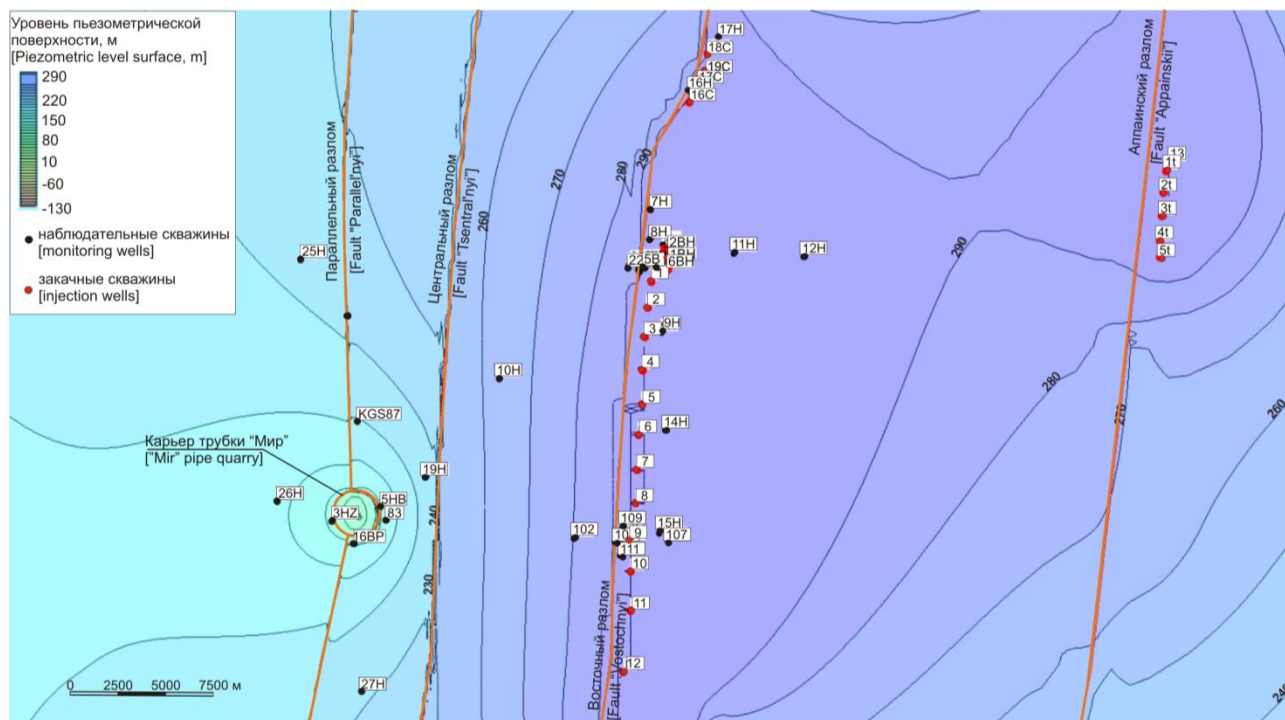
Прогнозное состояние пьезометрической поверхности метеоро-ичерского водоносного комплекса перед началом работ по возобновлению осушения, приведено на рисунке 1.

Функционирование карьерного водоотлива и системы обратной закачки, несомненно, приведет к формированию сложной депрессионной поверхности, отличной от существовавшей на протяжении всего 3 этапа, т.к. расходы откачки/закачки будут больше, и приведут к увеличению площадного воздействия, как возникающей депрессионной воронки, так и купола (репрессии), связанного с закачкой. Прогнозное положение уровней в рамках 5 этапа интенсивной техногенной нагрузки через 1 год, 5 лет и 10 лет, при условии расширения существующей системы закачки за Восточным разломом и строительства узла в зоне Восточно-Аппаинского разлома, приведено на рисунках 2, 3 и 4.

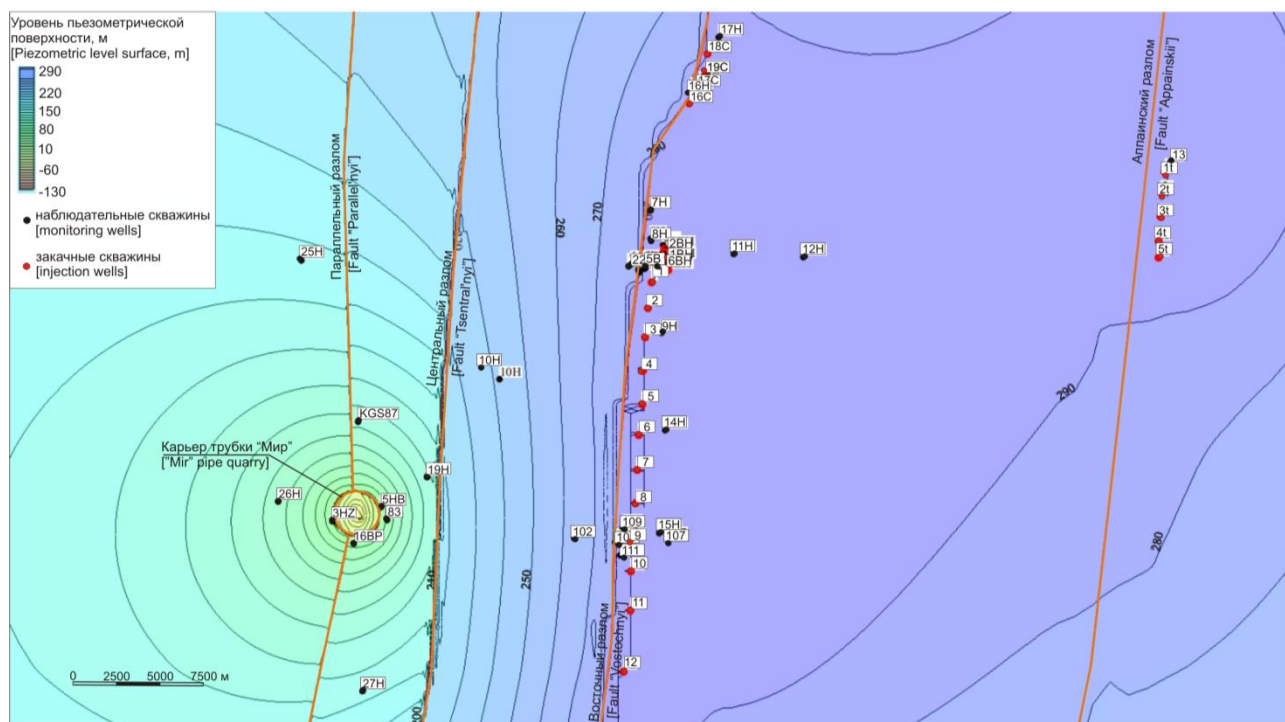
В процессе моделирования обратной закачки, был определен оптимальный режим эксплуатации закачных скважин, расположенных в зоне динамического воздействия Восточного разлома. Максимальная суммарная производительность закачки, при условии сохранения безнапорного режима, составляет от 2000  $\text{м}^3/\text{час}$  (в первый год возобновления) с последующим понижением до 1400  $\text{м}^3/\text{час}$ . Исходя из результатов проведенного моделирования, можно сделать вывод, что в период с 2038 по 2045 гг. для 100% обеспечения водопонижения в карьерном поле потребуется дополнительная эксплуатация участка закачки в динамической зоне Восточно-Аппаинского разлома. В связи с этим конфигурация пьезометрической поверхности примет ещё более сложный характер.



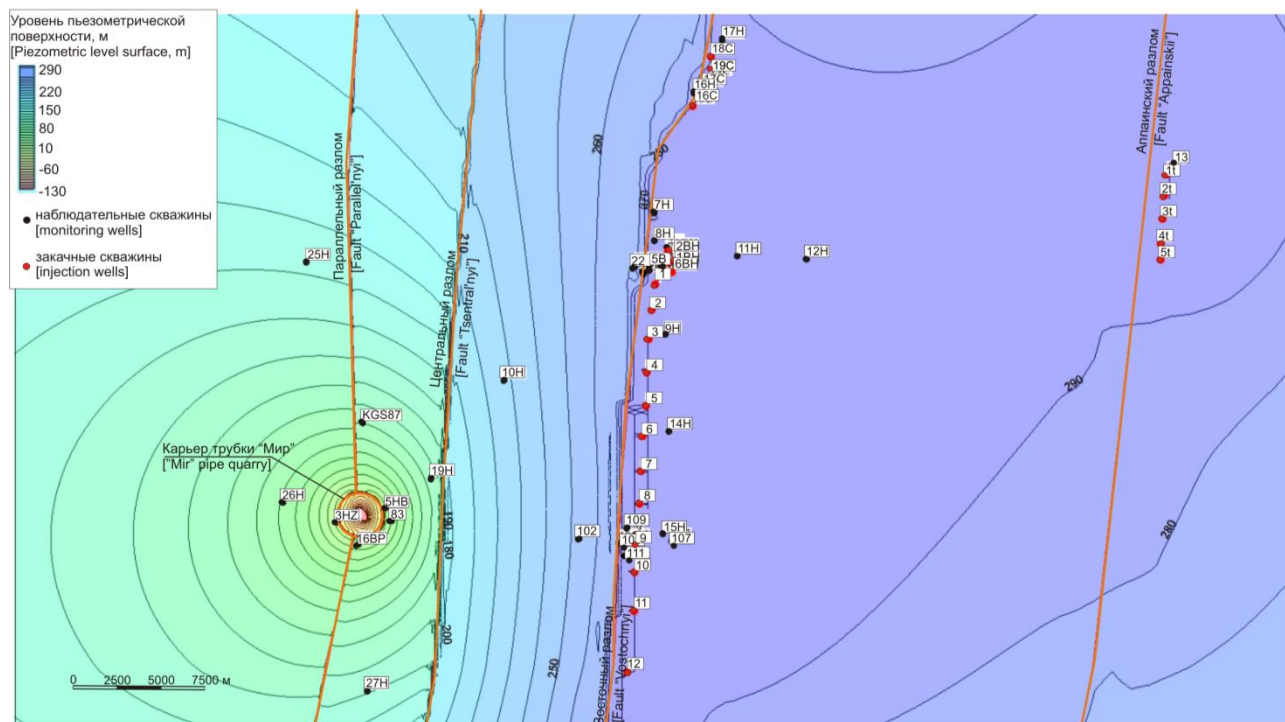
**Рис. 1.** Прогнозное распределение уровня подземных вод МИВК на начало осушения.  
**[Fig. 1.** Forecast distribution of the groundwater level in the MIAC at the beginning of drainage.]



**Рис. 2.** Прогнозное распределение уровня подземных вод МИВК на конец первого года возобновления техногенной нагрузки.  
**[Fig. 2.** Forecast distribution of the groundwater level in the MIAC at the end of the first year of the resumed technogenic pressure.]



**Рис. 3.** Прогнозное распределение уровня подземных вод МИАК на конец 5-го года возобновления техногенной нагрузки.  
**[Fig. 3.** Forecast distribution of the groundwater level in the MIAC at the end of the fifth year of the resumed technogenic pressure.]



**Рис. 4.** Прогнозное распределение уровня подземных вод МИАК на конец 10-го года возобновления техногенной нагрузки.  
**[Fig. 4.** Forecast distribution of the groundwater level in the MIAC at the end of the tenth year of the resumed technogenic pressure.]

### Выводы

Проведённый анализ и выполненное гидрогеологическое моделирование позволяют прогнозировать изменения пьезометрической поверхности метегеричерского водоносного комплекса до середины XXI

века. При этом дополнительно было выделено 2 этапа техногенной нагрузки на геологическую среду, связанные с особенностями изменений, которые претерпевает в настоящее время и будет претерпевать в будущем сложная природно-техногенная система,

включающая в себя взаимодействие регионального водоносного комплекса, подземных горных выработок рудника обрабатываемого месторождения и сопряжённых узлов обратной закачки. Все перечисленные компоненты системы приводят к существенным изменениям уровня режима и массопереноса в рамках изучаемой территории. Главные изменения произойдут в течение пятого периода, и будут связаны с развитием депрессионной воронки в карьерном поле трубки «Мир», наложенные на площадной репресссионный купол, образованный в результате обратной закачки в зоне динамического влияния Восточного и Восточно-Аппаинского разломов.

Выявленные закономерности будут учитываться при строительстве участков обратной закачки, а также при их расширении, бурении новых скважин, а также при поиске территории на наличие дополнительных перспективных зон, в рамках которых возможно строительство дополнительных участков обратной закачки, необходимое для возобновления добычных работ на месторождении.

*Конфликт интересов:* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
2. Агринский А.В. Результаты изучения гидрогеологических условий при разведке одной из кимберлитовых трубок в Западной Якутии // Тр. ВСЕГИНГЕО. 1980. № 135. С. 48–57.
3. Янников А. М., Бочаров В. Л. Проблема экологически безопасного захоронения дренажных вод рудника "Интернациональный" // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019. № 4. С. 99–103.
4. Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный, Мирнинская типография, 2013. 568 с.
5. Дроздов А. В., Иост Н. А., Лобанов В. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
6. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
7. Янников А.М., Янникова С.А. Корепанов А.Ю. Изменение коэффициента водопроницаемости метегеро-ичерского водоносного комплекса в пределах мирнинского кимберлитового поля (Якутия) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. №3. С. 96–103.
8. Янников А.М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля (республика Саха (Якутия)). Под общ. ред. А.В. Толстова. Мирный: АЛРОСА, 2021. 238 с.
9. Jafari T., Kiem A. S., Javadi S., Nakamura T., Nishida K., Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2021. Vol. 35, 100822, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100822>.
10. Jones D., Jones N., Greer J., Nelson J. A cloud-based MODFLOW service for aquifer management decision support // *Computers & Geosciences*. 2015. Vol. 78. P. 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.014>.
11. Bidwell V.J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2005. Vol.69. Iss. 1–2. P. 12–20, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2005.02.023>.
12. Климентов П. П., Кононов В. М. Методика гидрогеологических исследований. М.: Высшая школа, 1978. 408 с.



## Modelling the hydrodynamic regime of the Metegero-Ichersky aquifer after resumption of the exploitation of the “Mir” deposit

©2021 S. A. Yannikova<sup>1,2</sup>, A. M. Yannikov<sup>1✉</sup>, A. S. Struchkova<sup>1</sup>

*Institute Yakutniproalmaz ALROSA PJSC, 39 Lenina ul., 678174,  
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation*  
<sup>2</sup>*Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl.,  
394018, Voronezh, Russian Federation*

### Abstract

**Introduction:** The Metegero-Ichersky aquifer complex (MIAC) provides about 95% of the groundwater inflow to the Mir deposit. It is also used for the re-injection of brines into the Earth's interior. Technical solutions used during the exploitation of the field led to significant changes in the MIAC and technogenic pressure on it. The piezometric surface of the Metegero-Ichersky aquifer complex experienced considerable changes over the long period of mining of the large diamond deposit. The resumption of the deposit exploitation will lead to technogenic pressure on the geological environment and will have a great impact on the hydrodynamic regime of the aquifer.

**Methodology:** To study the hydrodynamic regime of the Metegero-Ichersky aquifer within the quarry field and the associated re-injection nodes, we applied conventional methods used in the study of groundwater dynamics. The creation of the hydrogeological model involved determining the filtration parameters of reservoirs, which was carried out using the results of observations during experimental, individual, and cluster pumping tests conducted over the last 5 years. The forecast of changes in the hydrodynamic regime was carried out following the calibration of the constructed model using a hydrogeological modelling program (Modflow software).

**Results and discussion:** The conducted work allowed obtaining data regarding the changes in the hydrodynamic regime of the Metegero-Ichersky aquifer. The results include schematic pressure distribution maps for a possible resumption of the pre-drying system. The modelling of the re-injection process involved determining the best operating mode for wells located in the zone of dynamic impact of the Eastern Fault. The maximum injection rate, in case of maintaining a phreatimetric regime, is between 2000 m<sup>3</sup>/hour (during the first year of resumption) and 1400 m<sup>3</sup>/hour (in the following years). The modelling allowed us to conclude that to guarantee a 100% dewatering in the quarry field in the period between 2038 and 2045, it is necessary to perform additional exploitation of the injection site in the dynamic zone of the East Appainy Fault. As a result, the configuration of the piezometric surface will become even more complex.

**Conclusion:** The conducted work allowed studying changes in the level regime of the Metegero-Ichersky aquifer complex caused by the exploitation of the Mir field, as well as forecasting the dynamics of subsequent changes depending on the additional technogenic pressure on the geological environment. Further reconstruction of the quarry should use the pre-drying principle, i.e. pumping out of all types of water entering the pit bowl, as well as the volumes accumulated at the quarry water marks. The injection of such amount of water might require not only the modernisation of the existing dewatering system in the area of the Eastern Fault, but also the construction of a new dewatering system in the dynamic zone of the East Appainy Fault.

**Keywords:** Mirny kimberlite field, Mir pipe, Metegero-Ichersky aquifer, modelling of the hydrodynamic regime, dewatering, injection nodes.

**For citation:** Yannikova S. A., Yannikov A. M., Struchkova A. S. Modelling the hydrodynamic regime of the Metegero-Ichersky aquifer after resumption of the exploitation of the “Mir” deposit. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 1, pp. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9103>

**Conflict of interests:** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Aleksey M. Yannikov, e-mail: [yannikov90@mail.ru](mailto:yannikov90@mail.ru)

REFERENCES

1. *Gidrogeologiya SSSR* [Hydrogeology of the USSR]. V.XX. Yakut ASSR. Moscow, Nedra publ., 1970, 384 p. (In Russ)
2. Agrinskii A.V. Rezul'taty izucheniya gidrogeologicheskikh uslovii pri razvedke odnoi iz kimberlitovykh trubok v Zapadnoi Yakutii [Results of the study of hydrogeological conditions during the exploration of one of the kimberlite pipes in Western Yakutia]. *Tr. VSEGINGEO – Proceedings of VSEGINGEO*, 1980, no. 135, pp. 48–57. (In Russ)
3. Yannikov A. M., Bocharov V. L. The problem of environmentally safe disposal of drainage waters of the «International» mine. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 4, pp. 99–103. (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2019.4/2703>
4. Kolganov V. F., Drozdov A. N., Akishev A. V. *Gornogeologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdenii almazov Yakutii* [Mining and geological features of indigenous diamond deposits in Yakutia]. Mirny, Mirny printing house, 2013, 568 p. (In Russ)
5. Drozdov A. V., Iost N. A., Lobanov V. V. *Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdeniy Zapadnoy Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU Publ., 2008, 507 p. (In Russ)
6. Klimovskii I. V., Gotovtsev S. P. *Kriolitozona Yakutskoi amazonosnoi provintsii* [Cryolithozone of the Yakutsk diamondiferous province]. Novosibirsk, Nauka publ., 1994. 167 p. (In Russ)
7. Yannikov A. M., Yannikova S. A. Korepanov A. Yu. Changes in the water permeability coefficient of the metegero-ichersky aquifer within the Mirny kimberlite field (Yakutia). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 3, pp. 96–103. (In Russ) DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.3/3655>
8. Yannikov A. M. *Gidrogeologiya Mirninskogo kimberlitovogo polya (respublika Sakha (Yakutiya))* [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutia))]. Ed. A. V. Tolstov. Mirnyi, ALROSA publ., 2021. 238 p. (In Russ)
9. Jafari T., Kiem A. S., Javadi S., Nakamura T., Nishida K., Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, vol. 35, 100822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100822>.
10. Jones D., Jones N., Greer J., Nelson J. A cloud-based MODFLOW service for aquifer management decision support. *Computers & Geosciences*, 2015, vol. 78, pp. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.014>.
11. Bidwell V. J. Realistic forecasting of groundwater level, based on the eigenstructure of aquifer dynamics. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2005, vol.69, iss. 1–2, pp. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2005.02.023>.
12. Klimentov P. P., Kononov V. M. *Metodika gidrogeologicheskikh issledovaniy* [Methods of hydrogeological research]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1978, 408 p. (In Russ)

Янникова Светлана Александровна – ведущий инженер, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, республика Саха-Якутия; Российская Федерация; аспирант, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: [yannikovasa@yandex.ru](mailto:yannikovasa@yandex.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7297-0725>

Янников Алексей Михайлович – к. г.-м. н., заведующий лабораторией горно-геологических проблем разработки месторождений, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Республика Саха-Якутия; Российская Федерация; E-mail: [yannikov90@mail.ru](mailto:yannikov90@mail.ru); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>

Стручкова Агита Сергеевна – ведущий инженер, Институт «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, республика Саха-Якутия; Российская Федерация;

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Svetlana A. Yannikova – Lead Engineer, Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia, Russian Federation; postgraduate student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: [yannikovasa@yandex.ru](mailto:yannikovasa@yandex.ru)

Aleksey M. Yannikov – PhD in Geol-Min., Head of the laboratory of mining and geological problems of field development, Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia, Russian Federation; E-mail: [yannikov90@mail.ru](mailto:yannikov90@mail.ru); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>

Agita S. Struchkova – Lead Engineer, Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia, Russian Federation;

All authors have read and approved the final manuscript.