

## Изменение гидродинамического режима толбачанского водоносного комплекса в процессе отработки кимберлитовой трубки «Мир»

©2022 С. А. Янникова<sup>✉ 1, 2</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:* Оработка многих видов твердых полезных ископаемых при вскрытии напорных водоносных комплексов осуществляется под защитой процесса формирования депрессионной кривой, возникающей в результате опережающего водопонижения. Изучение изменения гидродинамического режима водоносных комплексов в результате техногенного воздействия является актуальным для территорий с уже развитой или развивающейся добывающей и горной промышленностью. Нижнекембрийский толбачанский водоносный комплекс после возобновления добычных работ на коренном месторождении «Мир» в интервале от 925 до 1600 м от дневной поверхности будет формировать порядка 60% притока природных насыщенных (до 520 г/л) хлоридно-кальциевых рассолов. Изначальное пластовое давление в коллекторах толбачанской свиты достигает 150 кгс/см<sup>2</sup>, что составляет 1000 м напора над кровлей. Поэтому для обеспечения безопасных условий отработки эксплуатационных блоков месторождения потребуются опережающее водопонижение. Техногенное воздействие непременно приведёт к формированию депрессионной воронки и повлияет на гидродинамический режим комплекса.

*Методика:* Для изучения гидродинамического режима толбачанского водоносного комплекса в рамках шахтного поля были использованы общепринятые методики, используемые при изучении динамики подземных вод. Построение гидрогеологической модели основывалось на определении фильтрационных параметров коллекторов 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 характеристика гидродинамического режима толбачанского комплекса. Представлены карты-схемы распределения напоров в случае возобновления добычных работ на месторождении и сопряженного опережающего осушения. Изменения гидрогеологических условий комплекса могут оказывать воздействие на сопредельные участки недр. К концу периода моделирования работы системы опережающего водопонижения радиус депрессионной воронки составит порядка 2000 м.

*Заключение:* Проведенные работы позволили изучить изменения уровня режима толбачанского водоносного комплекса. Определены особенности формирования депрессионной воронки, возникающей в процессе отработки месторождения «Мир» в интервале коллекторов толбачанской свиты. Спрогнозированные гидродинамические параметры приведут к формированию ограниченной депрессионной воронки, что будет являться умеренным техногенным воздействием на недра.

**Ключевые слова:** трубка «Мир», толбачанский водоносный комплекс, насыщенные рассолы, карбонатные малодобитные коллекторы, моделирование гидродинамического режима, водопонижение.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Янникова Светлана Александровна, e-mail: [yannikovasa@yandex.ru](mailto:yannikovasa@yandex.ru)

Для цитирования: Янникова С. А. Изменение гидродинамического режима толбачанского водоносного комплекса в процессе отработки кимберлитовой трубки «Мир» // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. №2. С. 81–86. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.2/9282>

### Введение

Третий от поверхности подмерзлотный межсолевой толбачанский водоносный комплекс является самым водообильным водоносным комплексом в интервале 925–1600 м от дневной поверхности в пределах Мирнинского кимберлитового поля [1, 2]. Он формирует порядка 60% притока природных насыщенных (до 520 г/л) хлоридно-кальциевых рассолов к месторождению «Мир» в вышеуказанном интервале [3, 4]. В пределах шахтного поля трубки Мир нижнекембрийский толбачанский водоносный комплекс состоит из 17 коллекторов сложного флюидного насыщения, среди которых присутствуют: природные рассолы, углеводородные газы, нефти, битумы и мальты. Водоносный комплекс высоконапорный, напор над кровлей составляет от 950 до 1050 м.

Технические решения, требуемые для реализации отработки месторождения «Мир», приведут к существенным изменениям и техногенной нагрузке на толбачанский водоносный комплекс. В результате работы системы опережающего водопонижения пьезометрическая поверхность комплекса за весьма длительный период отработки крупного месторождения алмазов трубка «Мир» претерпит изменения, связанные с развитием депрессионной воронки и разгрузкой водонасыщенных коллекторов. Прогнозирование данных изменений выполнено при помощи программ гидрогеологического моделирования.

### Методика исследований

При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик толбачанского водоносного комплекса. Исходные параметры расчетного комплекса приняты по материалам ранее выполненных научно-исследовательских работ и корректировались на этапе калибровки модели.

В плане толбачанский водоносный комплекс в силу изменчивости фильтрационных свойств коллекторов, вызванных, структурно-тектоническими условиями и литолого-фациальными особенностями, принят кусочно-однородным.

Помимо площадных кусочно-однородных зон на модели отражались зоны разломов, задаваемые границами 3-го рода.

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. Решение обратной задачи проводилось методом ите-

раций с использованием уровневых критериев, значений фильтрационных параметров, ранее полученных опытным путем или в процессе выполненных исследований, закономерностей пространственной изменчивости фильтрационных свойств изучаемого объекта [5].

В пределах шахтного поля трубки «Мир» коллекторы толбачанской свиты опробованы скважинами №309 и №310. Кровля и подошва водоносного горизонта расположены на отметках -820 м и -1055 м соответственно, уровень на отметке +20 м.

Размеры области моделирования в плане выбраны, исходя из гидрогеологических условий района и решаемых задач, таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе работ трубки «Мир». Площадь района гидродинамического моделирования составила 100(10×10) км<sup>2</sup>. Схематизация гидрогеологического разреза для построения расчетной модели выполнена с учетом имеющегося фактического материала по району исследований.

Фильтрационный поток исследуемой области был разбит равномерной сеткой, состоящей из 1000000 (1000×1000) ячеек, каждая из которых представляет собой прямоугольную призму (прямоугольный параллелепипед). Центром ячейки является узловая точка. Площади ячеек составляют от 100 до 1000 м<sup>2</sup>. Размеры и принятый шаг ввиду низких фильтрационных параметров позволяет с наибольшей детальностью отразить гидрогеологические особенности на весь прогнозируемый период [6, 7].

Моделирование проводилось с определением параметров водоносного комплекса по данным одиночных откачек (по скважинам №309 и №310) и прогнозных расчетов. При моделировании откачки из скважины №309 на модели задавались следующие граничные условия:

- опытная откачка из скважины № 309 с поддержанием уровня на подошве водоносного комплекса (ГУ 1 рода);
- внешние граничные условия (ГУ 3 рода);
- разломные зоны.

В результате выполненной калибровки модели фильтрации подземных вод при решении обратной задачи было достигнуто 95% схождение фактических и модельных параметров на декабрь 2021 г., что позволяет дальнейшее прогнозирования изменений гидродинамического режима толбачанского водоносного комплекса.

### Результаты и их обсуждение

Как отмечалось ранее, возобновление горных и добычных работ на месторождении «Мир» значи-

тельно повлияет на гидродинамический режим толбачанского водоносного комплекса. Прогнозное моделирование в ПО MODFLOW выполнялось для прогнозирования притоков к месторождению, а также для построения карт-схем развития депрессионной воронки, формирующейся от работы системы опережающего водопонижения.

В результате выполненного гидрогеологического моделирования прогнозные притоки природных насыщенных рассолов будут составлять:

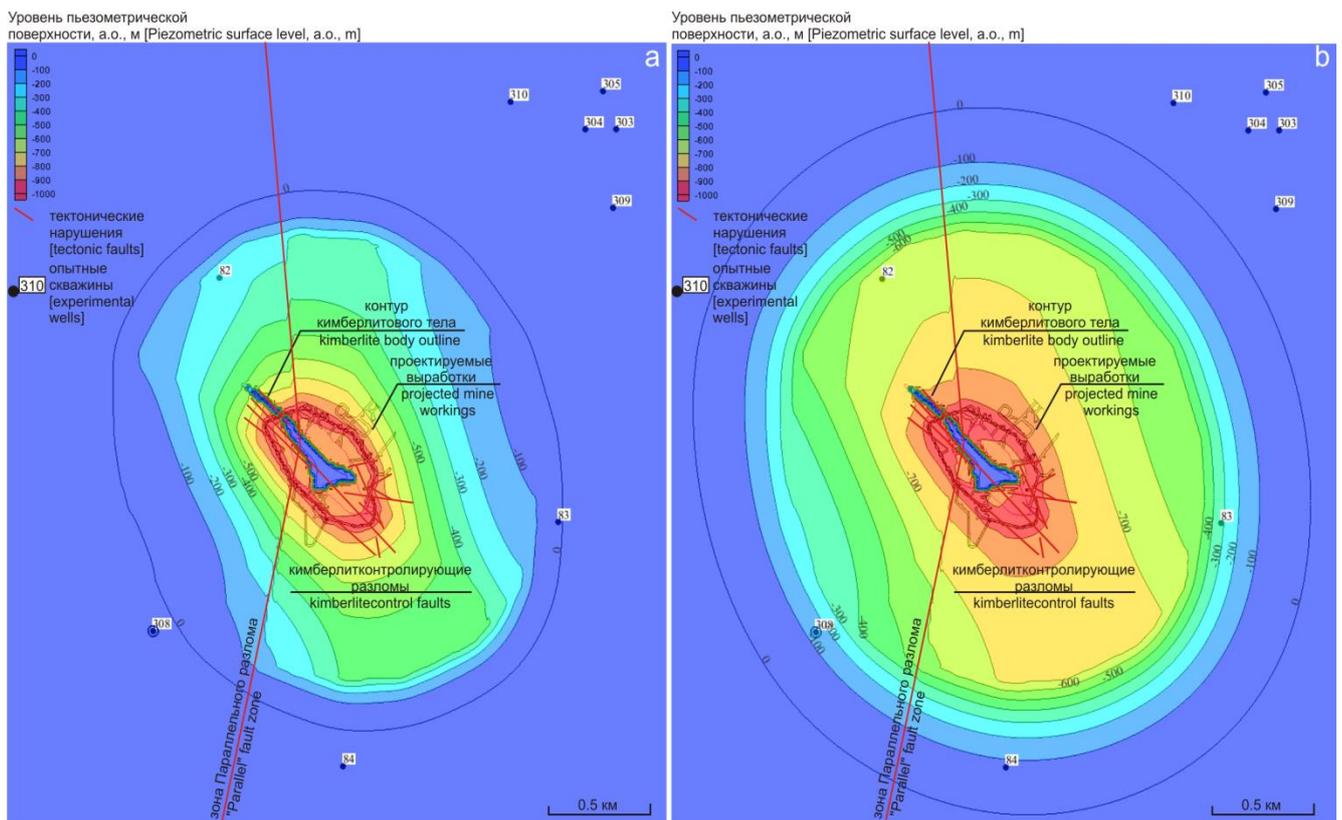
- 557.2 м<sup>3</sup>/сут в первые 3–4 месяца опережающего водопонижения;
- 484.1 м<sup>3</sup>/сут к концу первого года работы системы опережающего водопонижения;
- 189.2 м<sup>3</sup>/сут к концу пятого года работы системы опережающего водопонижения;
- 123.4 м<sup>3</sup>/сут к концу десятого года работы системы опережающего водопонижения.

Прогнозное состояние пьезометрической поверхности толбачанского водоносного комплекса к концу первого, пятого и десятого года работы системы опе-

режающего водопонижения, приведено на рис. 1, 2.

По результатам выполненного гидрогеологического моделирования подтверждено, что функционирование системы опережающего водопонижения приведёт к формированию депрессионной воронки. Однако её формирование будет отличаться следующими особенностями.

Толбачанский водоносный комплекс, в виду глубины своего залегания, свыше 1000 м от дневной поверхности, относится к зоне весьма затруднённого водообмена, что сказывается и на фильтрационных свойствах его коллекторов. Водопроницаемость в рамках шахтного поля трубки «Мир» изменяется в пределах 0.01 до 0.13 м<sup>2</sup>/сут [8]. Развитие депрессионной воронки в течение первых 5 лет будет определяться наличием в рамках шахтного поля групп разломов, в том числе кимберлитконтролирующих. Изометричность гидроизопьез, коррелируется с зоной динамического воздействия зоны Параллельного разлома и группой кимберлитконтролирующих разломов (рис. 1).

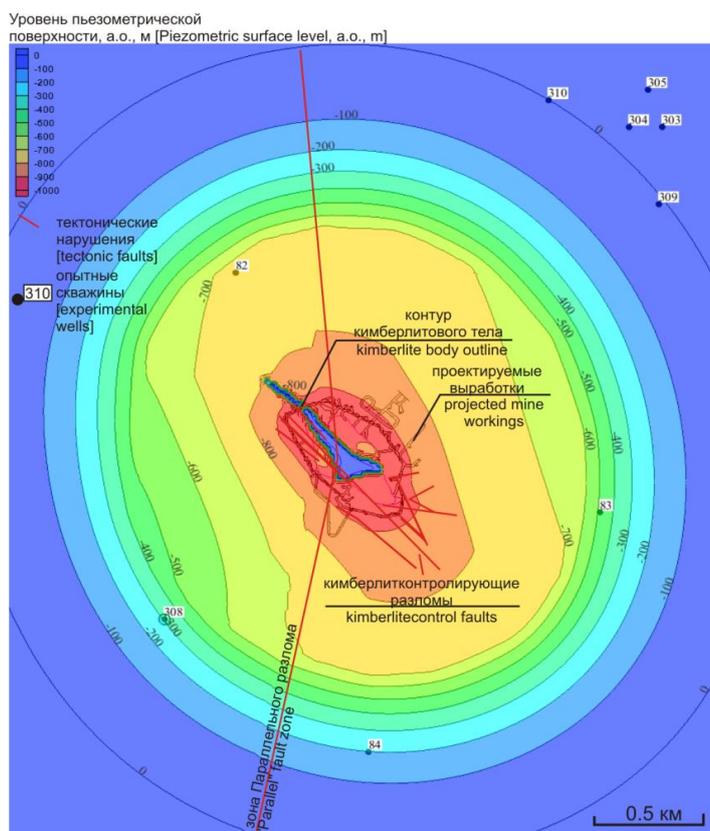


**Рис. 1.** Прогнозное распределение пьезометрического уровня подземных вод толбачанского водоносного комплекса к концу 1-го года (а) и 5-го года (б) осушения.

[**Fig. 1.** Forecast distribution of the piezometric groundwater level of the Tolbachany aquifer by the end of the 1st year (a) and 5th year (b) of drainage.]

Невысокие гидродинамические параметры комплекса приведут к формированию ограниченной депрессионной воронки. К концу моделирования 10-го года работы системы опережающего водопонижения при полном осушении комплекса, её радиус составит

порядка 2000 м, что свидетельствует об умеренном ограниченном техногенном воздействии на недра. Для сравнения радиус техногенного воздействия метегеричерского водоносного комплекса (МИВК) в результате откачки/закачки достигал 60 км [9] (рис. 2).



**Рис. 2.** Прогнозное распределение пьезометрического уровня подземных вод толбачанского водоносного комплекса к концу 10-го года осушения.  
**[Fig. 2.** Predicted distribution of the piezometric groundwater level of the Tolbachany aquifer by the end of the 10th year of drainage.]

### Выводы

В результате выполненного гидрогеологического моделирования стало возможным спрогнозировать изменения пьезометрической поверхности толбачанского водоносного комплекса на конец 1-го, 5-го и 10-го года после начала работы системы опережающего водопонижения. При этом дополнительно были выделены особенности формирования депрессионной воронки и техногенной нагрузки на геологическую среду, связанные со структурно-тектоническим строением шахтного поля, а также литолого-фациальными и гидрогеологическими условиями, характеризующими толбачанский водоносный комплекс.

Спрогнозированные гидродинамические параметры толбачанского водоносного комплекса через 10 лет в результате работы системы опережающего водопонижения приведут к формированию ограниченной депрессионной воронки радиусом около 2000 м, что будет являться умеренным техногенным воздействием на недра, по сравнению с МИВК [9].

Выявленные закономерности будут учитываться при строительстве системы опережающего водопонижения для обеспечения её большей эффективности и, как следствие, безопасности горных и 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. Колганов В. Ф., Акишев А. Н., Дроздов А. В. Горногеологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный, Мирнинская типография, 2013. 568 с.
4. Янников А. М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля (республика Саха (Якутия)). Под общ. ред. А.В. Толстова. Мирный: АЛРОСА, 2021. 238 с.
5. Климентов П. П., Кононов В. М. Методика гидрогеологических исследований. М.: Высшая школа, 1978. 408 с.
6. 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>.
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126450>.
8. Янников А. М. Янникова С. А. Изменение гидрогеологических характеристик толбачанской свиты в пределах шахтных полей трубок «Мир» и «Интернациональная» // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2022. №1. С. 118–126. DOI: <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-1-118-126>.
9. 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>

## Changes in the hydrodynamic regime of the Tolbachany aquifer during mining of the Mir kimberlite pipe

©2022 S. A. Yannikova<sup>✉</sup> 1, 2

<sup>1</sup>*Institute Yakutniproalmaz ALROSA PJSC, 39 Lenina ul., Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678174, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., Voronezh, 394018, Russian Federation*

### Abstract

**Introduction:** The development of many types of solid minerals during the opening of pressure aquifers is carried out under the protection of the formation of a depression curve resulting from advanced water drawdown. The study of changes in the hydrodynamic regime of aquifers as a result of technogenic impact is important for areas with already developed or developing extractive and mining industries. The Lower Cambrian Tolbachany aquifer, after the resumption of mining operations at the Mir primary deposit, in the range from 925 to 1600 m from the day surface will form about 60% of the inflow of natural saturated (up to 520 g/l) calcium chloride brines. The initial reservoir pressure in the reservoirs of the Tolbachany suite reaches 150 kgf/cm<sup>2</sup>, which is 1000 m of top pressure. Therefore, to ensure safe conditions for mining the production blocks of the deposit, advanced water drawdown will be required. Technogenic impact will certainly lead to the formation of a funnel of desiccation and will affect the hydrodynamic regime of the complex.

**Methods:** For the investigation of the hydrodynamic regime of the Tolbachany aquifer within the mine field, the generally accepted methods used in studying the dynamics of groundwater were used. The construction of a hydrogeological model was based on the determination of reservoir filtration parameters over the past 5 years. The forecast of changes in the hydrodynamic regime was carried out after the calibration of the constructed model using the hydrogeological modelling program (Modflow software).

**Results and discussion:** The result of the study was the characteristic of the hydrodynamic regime of the Tolbachany aquifer. Schematic maps of pressure distribution in case of resumption of mining operations and associated advanced drainage were presented. Changes in the hydrogeological conditions of the complex may have an impact on adjacent subsoil areas. By the end of the period of modelling the operation of the advanced water drawdown system, the radius of the funnel of desiccation will be about 2000 m.

**Conclusions:** The conducted work allowed studying changes in the level regime of the Tolbachany aquifer. The features of the formation of funnel of desiccation that occur during the development of the Mir deposit in the reservoir interval of the Tolbachany suite were determined. The predicted hydrodynamic parameters will lead to the formation of a limited funnel of desiccation, which will be a moderate technogenic impact on the subsoil.

**Keywords:** Mir pipe, Tolbachany aquifer, saturated brines, low car-density carbonate reservoirs, simulation of hydrodynamic regime, water drawdown.

**For citation:** Yannikova S. A. Changes in the hydrodynamic regime of the Tolbachany aquifer during mining of the Mir kimberlite pipe. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 81–86. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.2/9282>

**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.

✉ Svetlana A. Yannikova, e-mail: [yannikovasa@yandex.ru](mailto:yannikovasa@yandex.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. 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)
4. Yannikov A. M. *Gidrogeologiya Mirninskogo kimberlitovogo polya (respublika Sakha (Yakutiya))* [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutia))]. Ed. A. V. Tolstov. Mirny, ALROSA publ., 2021. 238 p. (In Russ)
5. Klimentov P. P., Kononov V. M. *Metodika gidrogeologicheskikh issledovaniy* [Methods of hydrogeological research]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1978, 408 p. (In Russ)
6. 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>.
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126450>.
8. Yannikov A. M. Yannikova S. A. *Izmenenie gidrogeologicheskikh kharakteristik tolbachanskoj svity v predelakh shakhtnykh polei trubok «Mir» i «Internatsional'naya»* [Changes in the hydrogeological characteristics of the Tolbachany Formation within the mine fields of the Mir and International pipes]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta – Bulletin of the Ural State Mining University*, 2022, no. 1, pp. 118–126. (In Russ)
9. 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>

Янникова Светлана Александровна – научный сотрудник, 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>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Svetlana A. Yannikova – Research Associate, Yakutniiproalmaz Institute, PJSC ALROSA, Mirny, Republic of Sakha-Yakutia, Russian Federation; E-mail: [yannikovasa@yandex.ru](mailto:yannikovasa@yandex.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7297-0725>

All authors have read and approved the final manuscript.