

УДК 556.3:622.841

ПРОГНОЗ СЕЗОННЫХ И ГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДОПРИТОКОВ К КАРЬЕРАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ СКЛОНОВОГО СТОКА СО СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ



К. И. ГРИЦЕНКО,
ведущий инженер, gritsenko_ki@pers.spmi.ru



Л. И. ЛЕСНИЧИЙ,
ведущий инженер

Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Одной из задач горнопромышленной гидрогеологии является расчет и прогноз водопритоков к горным выработкам [1]. К открытым горным выработкам водоприитоки формируются не только за счет подземных вод, но и посредством поверхностного склонового стока и атмосферных осадков, выпадающих непосредственно в пределах контура карьера. Поэтому для прогнозов сезонных изменений величины водопритоков необходим учет всех трех составляющих [2].

Для расчета притока подземных вод к горным выработкам используют либо эмпирические формулы [3], либо математические модели, основанные на законе Дарси и уравнении неразрывности [4]. В настоящее время для прогноза водоприитока к дренам (карьеру, руднику) преимущественно создают геофильтрационные модели, позволяющие выполнять комплексные гидрогеологические исследования и прогнозы [2, 5, 6]. Однако с их помощью учесть влияние атмосферных осадков затруднительно главным образом потому, что одной из статей водного баланса (входом) численных геофильтрационных моделей является инфильтрационное питание, поступающее через зону аэрации [7]. Поэтому для прогноза годовых и сезонных изменений водопритоков с их использованием необходимо знать прогноз осадков с заданной заблаговременностью и иметь достаточно точную модель зоны аэрации

Отмечено, что прогнозирование сезонных изменений водопритоков к горным выработкам является важной задачей для безопасного и эффективного ведения горных работ. В современной практике для этих целей применяют либо эмпирические формулы, либо математические модели, основанные на законе Дарси и уравнении неразрывности. У этих методов есть ряд ограничений, вследствие которых в настоящее время прогнозы сезонных изменений водопритоков достаточно трудоемки и не получили широкого распространения.

Авторами предпринята попытка разработать простую и надежную методику прогнозирования сезонных изменений водопритоков. Рассмотрена возможность применения для этого динамических моделей склонового стока на примере трех рудников с различными отношениями межвенного и паводкового водопритоков.

Ключевые слова: прогноз водопритоков, горные выработки, частично инфинитное моделирование, гидрология, подземный и поверхностный сток, модель водосбора

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.15

или же применять эмпирические методы прогноза величины инфильтрационного питания с учетом особенностей его формирования [8]. Таким образом, даже без учета возможных ошибок при прогнозировании поверхностного стока и атмосферных осадков, определение сезонных изменений водопритоков к карьерам оказывается сложной задачей [9]. В настоящее время не разработано рекомендаций (норм, правил и т. п.) для прогноза сезонных изменений величин водопритоков. На практике в большинстве случаев выполняют расчет максимального притока вод к горным выработкам для проектирования соответствующих дренажных мероприятий [10] или же проводят аналогичные расчеты заградительного дренажа на геофильтрационных моделях [11, 12].

Модель склонового стока со сосредоточенными параметрами как метод прогнозирования сезонных изменений водопритоков

Аналогичную задачу прогноза притока вод различного генезиса (подземного и поверхностного стока) решали в гидрологии [13] для стока с водосбора к озеру или участку реки [14]. Среди прочих методов для этого применяют динамическую модель склонового стока первого порядка со сосредоточенными параметрами:

$$\tau \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{k} Q = \dot{X}, \quad (1)$$

где τ – время добегания, сут; Q – сток с водосбора, м³/сут; t – момент времени; k – коэффициент стока; X – эффективные осадки, м³/сут.

Эта модель получена путем пространственного осреднения двумерной модели стекания воды по речному склону [14]. В рамках частично инфинитного моделирования [15] обосновано ее применение не только для прогноза поверхностного склонового стока, но и стока с водосбора в целом [13, 16]. Модель можно применять как для среднесуточного, так и годового стока [17], а также как для средних [18], так и для максимальных [19] и минимальных [20] его значений в различных климатических зонах [21]. Установлена ее связь со стохастическими моделями процессов формирования стока, которые успешно применяют для прогнозов максимального и минимального речного стока (сформированного преимущественно поверхностным и подземным питанием соответственно), в том числе в условиях изменяющегося климата [22].

Многие горные выработки, карьеры или рудники неглубокого заложения могут быть представлены (схематизированы) данной моделью, так как являются искусственной дренажной с соответствующим водосбором. Справедливость и целесообразность использования данной схематизации зависят от решения двух принципиальных вопросов.

Во-первых, генезис притока к горным выработкам существенно отличается от генезиса стока с водосбора к поверхностным водным объектам. Поэтому при использовании модели (1) для оценки водопритоков в горные выработки необходимо оценить границы ее применимости, когда с некоего определенного соотношения величины подземного и поверхностного стока (увеличения доли подземного стока) модель теряет способность адекватно (с заданной точностью) описывать процессы его формирования, и более целесообразным становится применение геофильтрационных моделей.

Во-вторых, как следует из выражения (1), данная модель не учитывает изменения уровней подземных вод, так как является моделью со сосредоточенными параметрами. Поэтому дренажное влияние карьеров и развитие депрессионной воронки будут зафиксированы в ней опосредованно через изменение коэффициентов модели (в данном случае k и τ). Это, в свою очередь, затрудняет прогноз, который по умолчанию делают в предположении неизменности свойств системы. Однако для длительно действующих карьеров, когда сформирован стационарный или квазистационарный режим подземных вод, или в случаях, когда изменчивость притока в зависимости от сезона много выше изменчивости, связанной с формой депрессионной воронки, применение модели (1) может быть перспективным.

Методика прогнозирования сезонных изменений водопритоков

Для проверки этой гипотезы и эмпирической проверки границ применимости модели (1) при различном соотношении поверхностной и подземной составляющих в водопритоке

были составлены модели водосбора для прогноза среднегодового и среднемесячного водопритоков. В качестве объектов исследования выбраны Коашвинский и Ньоркпахкский карьеры и Кировский рудник, разрабатывающие месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. Принцип отбора объектов – схожие геологическое строение и гидрогеологические условия при различных отношениях межennaleго и паводкового водопритоков в течение одного гидрологического года (от 1:5 до 1:3), в районе максимального инфильтрационного питания на Кольском полуострове [23, 24].

При создании прогнозных моделей применяли следующую численную реализацию модели (1):

$$\frac{Q^{t+\Delta t} - Q^t}{\Delta t} = \frac{\dot{X}^t}{\tau} - \frac{1}{k\tau} Q^t, \quad (2)$$

где Δt – заблаговременность прогноза.

Коэффициенты k и τ могут быть линейными функциями от запасов воды в снежном покрове, его высоты и плотности или температуры воздуха [13].

На первом этапе исследования для Кировского рудника, Коашвинского и Ньоркпахкского карьеров были разработаны модели водосбора для расчета среднегодового притока.

Для Кировского рудника за период с 1990 по 2004 г. была проведена идентификация параметров модели, т. е. определены коэффициенты k и τ , среднеквадратическая ошибка расчетов с использованием которых была минимальна. За период 2005–2018 гг. сделан поверочный прогноз. Результаты расчетов (прогнозов) среднегодовых значений водопритоков представлены на **рис. 1**. Следует заметить, что период с 1990 по 2004 г., по которому проводили идентификацию параметров модели, существенно (в 1,5 раза) отличался по водности от прогнозного периода. Несмотря на это, значение критерия S/σ [25] для среднегодовых значений составило 0,54. Этот факт подтверждает правомерность применения модели (1) для описания (схематизации) природных условий при решении задачи прогнозирования водопритоков.

Аналогичные прогнозные модели составлены для Коашвинского и Ньоркпахкского карьеров (**рис. 2**).

Значение критерия S/σ составило 0,34 для Коашвинского и 0,57 для Ньоркпахкского карьеров.

Для Кировского рудника разработана модель для прогнозов среднемесячного водопритока. Результаты расчетов представлены на **рис. 3**.

Значение критерия S/σ для ряда среднемесячных притоков составило 0,58. Отмечается более высокая сходимость прогнозных и фактических гидрографов для межлениных периодов и низкая – для паводковых в периоды снеготаяния и летнего половодья.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- полученный результат (в первую очередь точность прогнозов водопритоков) подтверждает обоснованность применения

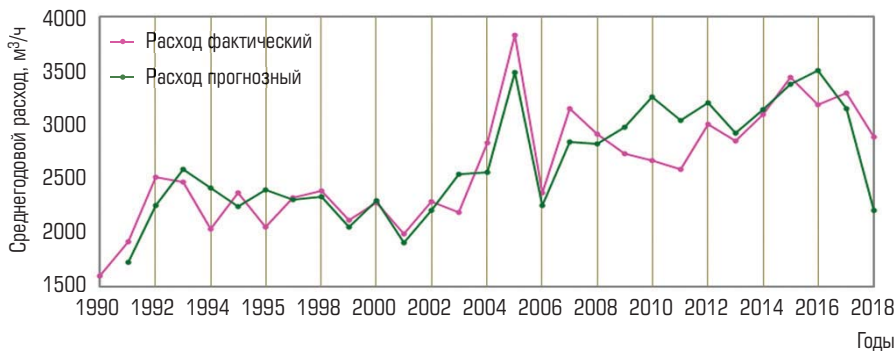


Рис. 1. Прогнозный и фактический гидрографы годового притока в Кировский рудник (составлены авторами)

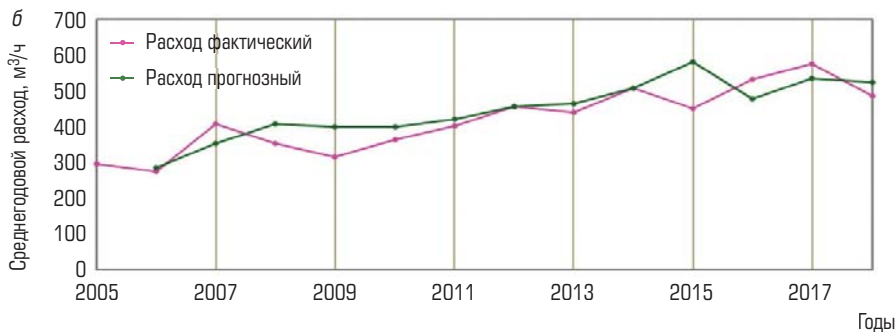
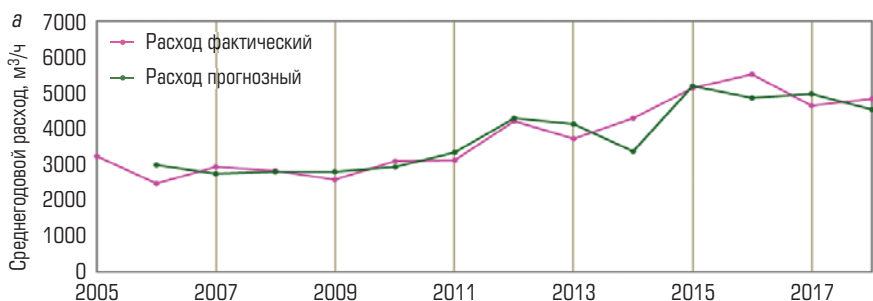


Рис. 2. Прогнозный и фактический гидрографы годового притока в Коашвинский (а) и Ньюркапхкский (б) карьеры (составлены авторами)

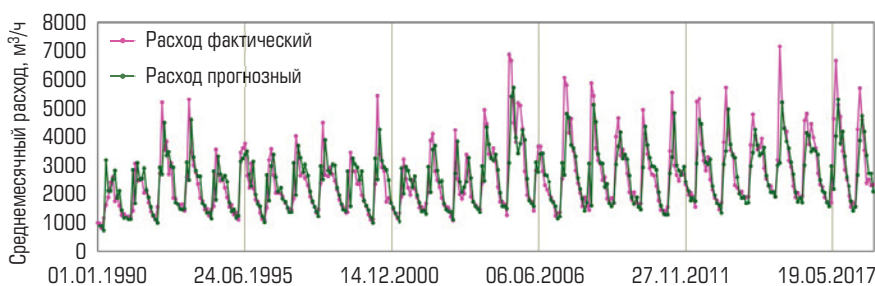


Рис. 3. Прогнозный и фактический гидрографы среднемесячного притока в Кировский рудник (составлены авторами)

модели водосбора (1) для прогноза водопритоков к горным выработкам при его относительно высокой сезонной изменчивости (отношение межлетнего и паводкового водопритоков от 1/5 до 1/3);

- применение модели водосбора со сосредоточенными параметрами позволило выдать практически значимые для производства надежные прогнозы среднемесячных и среднегодовых значений водопритоков для длительно эксплуатируемых

горных выработок на апатит-нефелиновых месторождениях Хибинского массива;

- разработанная методика прогноза сезонных водопритоков к выработкам в настоящее время является безальтернативной для месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, так как других методик определения изменения среднемесячного и годового притоков на объекте не применяют.


Заключение

Результаты, полученные на данном этапе исследований, позволяют утверждать, что применение модели склонового стока со сосредоточенными параметрами для прогноза сезонных и годовых изменений водопритоков к карьерам перспективно. Выдаваемые прогнозы сезонных изменений водопритоков могут повысить эффективность ведения горных работ, например при своевременной адаптации водоотливных установок, и повысить безопасность горных работ [26].

Данное исследование является первым шагом к изучению возможности применения гидродинамических и стохастических моделей водосбора для прогноза сезонных изменений водопритоков в рудники. В дальнейшем планируется более

детально разработать теоретическое обоснование применимости модели (1) для прогноза водопритоков к горным выработкам и выполнить подобные работы для рудников, расположенных в различных гидрогеологических и климатических условиях. Предполагается применить в качестве исходных данные дистанционных методов зондирования [27] (об осадках [28], высоте снежного покрова [29–32], о рельефе высокого разрешения [32]).

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 104–108
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.15

Prediction of seasonal and annual variation in water inflow in open pit mines using the slope runoff model with concentrated parameters

Information about authors

K. I. Gritsenko¹, Leading Engineer, gritsenko_ki@pers.spmi.ru

L. I. Lesnichi¹, Leading Engineer

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Prediction of seasonal variation in water inflow in mines is critical for safe and efficient mining. In open pit mines, water inflow comes from both groundwater and from atmospheric fallout and slope runoff. Eventually, prediction of seasonal variation in water inflow should take into account all of these three components.

The present-day practice uses either empirical formulas or mathematical models based on the Darcy law and the equation of continuity. These methods have some limitations which make the prediction of seasonal variations in water inflow rather labor-intensive and not widely accepted. The authors make an attempt to develop a simple and reliable prediction procedure for seasonal variation in water inflow. This research is an initial step toward the analysis of usability of hydrodynamic and stochastic models of water catchment to predict seasonal variation in water flow in mines. The water catchment models are built to predict annual and monthly water inflow. The test subjects were Koashva and Niorkpakhk open pit mines and Kirov mine operating at apatite–nepheline ore deposits in the Khibiny.

The result (for the first turn, the water inflow prediction accuracy) proves the validity of the water catchment model in prediction of water inflow in mines in case of the relatively high seasonal variability of water inflow (low water/flood water ratio from 1/5 to 1/3). It is planned further to substantiate theoretically the model applicability in prediction of water inflow in mines located in different geological and climatic conditions. The prediction and prompt adjustment of water-drainage installations enhance efficiency of the equipment.

Keywords: water inflow prediction, underground openings, partially infinite modeling, hydrology, underground and surface flows, water catchment model.

References

- Dassargues A. Hydrogeology: Groundwater Science and Engineering. Boca Raton : CRC Press, 2018. 492 p.
- Norvatov Yu. A., Sergutin M. V. Prediction of water inflows into mine workings in the process of combined open-underground ore mining operations. *Journal of Mining Institute*. 2015. Vol. 212. pp. 89–94.
- Maksimov V. M. (Ed.). Reference book of hydrogeologist. 3rd revised and enlarged edition. Leningrad : Nedra, 1979. Vol. 1. 512 p.
- Langevin C. D., Provost A. M., Panday Sorab, Hughes J. D. Documentation for the

- MODFLOW 6 Groundwater Transport Model. Reston : U.S. Geological Survey, 2022. Book 6. Modeling Techniques. Section A. Groundwater. Chapter 61. 65 p.
- Ustyugov D. L. Permanent hydrodynamic model of the first phase mining at Yakovlevo deposit : The goal and ways to pursue it. *Journal of Mining Institute*. 2006. Vol. 168. pp. 159–164.
- Kotlov S. N. Usage modern computer techniques for validation of actions guaranteeing opening strength of pit edge. *Journal of Mining Institute*. 2011. Vol. 189. pp. 34–37.
- Shestakov V. M. Hydrogeodynamics : Textbook. 3rd revised and enlarged edition. Moscow : Izdatelstvo MGU, 1995. 368 p.
- Nesterenko Yu. M., Solomatin N. V. Zonal peculiarities of underground flow formation in the Urals. *Journal of Mining Institute*. 2003. Vol. 153. pp. 192–193.
- Stanchenko I. K. (Ed.). Reference book on dehumidifying of rocks. Moscow : Nedra, 1984. 575 p.
- Construction Code SP 103.13330.2012 (SNIP 2.06.14-85). Mine protection from underground and surface water. Moscow : Minregion Rossii, 2012. 72 p.
- Kotlov S., Saveliev D., Shamshev A. Peculiarities of numerical modeling of the conditions for the formation of water inflows into open-pit workings when constructing the protective watertight structures at the Koashvinsky quarry. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses : Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London : CRC Press, 2018. pp. 827–832.
- Kotlov S. N., Shamshev A. A. Numerical geo-flow modeling of horizontal drainage holes. *GIAB*. 2019. No. 6. pp. 45–55.
- Kovalenko V. V., Viktorova N. V., Gaydukova E. V. Modeling hydrodynamic processes. 2nd revised and enlarged edition. Saint-Petersburg : RGGMU, 2006. 558 p.
- Lamia Erraioui, Soufiane Taia, Kamal Taj-Eddine, Jamal Chao, Bouabid El Mansouri. Hydrological Modelling in the Ouergha Watershed by Soil and Water Analysis Tool. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24, Iss. 4. pp. 343–356.
- Kuchment L. S. River runoff models. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1980. 143 p.
- Kovalenko V. V. Partially infinite modeling and prediction of river runoff. Saint-Petersburg : RGGMU, 2004. 197 p.
- Kovalenko V. V., Khaustov V. A. Estimate of long-term variation in surface runoff and improvement of prediction and analysis models in Russia. *Academic Council's Final Session : Headnotes*. Saint-Petersburg : RGGMU, 1999. pp. 41–42.
- Kovalenko V. V., Shevnina E. V., Khaustov V. A., Pivovarova I. I., Lesnichi L. I. et al. System modeling of stochastic water exchange processes in water catch basin of the Ilmen Lake toward prediction of monthly inflow at the Volkhov Water Power Plant. *Dynamics and Thermics of Rivers in Water Storage Basins and Nearshore : V International Conference Proceedings*. Moscow, 1999. pp. 47–48.
- Kovalenko V. V., Gaidukova E. V., Haustov V. A., Shevnina E. V., Sudakova N. V. et al. The maximum flow of spring tide reliability assessment of hydraulic structures at the climate change. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*. 2013. No. 24. pp. 146–153.
- Viktorova N. V., Gromova M. N. Long-term Forecasting of Characteristics of Minimal River Runoff Discharges in Russia in Case of Possible Climate Change. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2008. Vol. 33, No. 6. pp. 388–393.

21. Batmazova A. A., Khaustov V. A., Gaidukova E. V. Modeling the process of formation of maximum runoff on the example of the Russian part of the Arctic Ocean basin. *Arctic Days in St. Petersburg – 2021: International Scientific Cooperation in the Arctic in the Era on Climate Change*. St. Petersburg, 2021. pp. 63–66.
22. Kovalenko V. V., Viktorova N. V., Gaidukova E. V., Gromova M. N., Khaustov V. A. et al. Guidelines on Proven Flow Rate Estimation at Project Waterworks in Unstable Climate. Saint-Petersburg : Izdatelstvo RGGMU, 2010. 51 p.
23. Elshin Yu. A., Kupriyanov V. V. (Eds.). Surface water resources in the USSR. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1970. Vol. 1. The Kola Peninsula. 316 p.
24. Vasilevskiy M. M., Lebedev G. A., Pogrebov N. F., Revunova N. A., Terletskiy B. K. et al. The USSR Hydrogeology: A Brief Review. *Journal of Mining Institute*. 1953. Vol. 28. pp. 3–36.
25. Popov E. G. Hydrogeological forecasts. 2nd revised and enlarged edition. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1979. 257 p.
26. Lisitskiy A. V. Improvement of mine water drainage control via short-term prediction of water inflow. *Journal of Mining Institute*. 2002. Vol. 150, No. 1. pp. 96–99.
27. Churyulin E. V., Kopeykin V. V., Pozinkina I. A., Frolova N. L., Churyulina A. G. Analysis of snow cover characteristics by satellite and model data for different catchment areas are located in the territory of the Russian Federation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. 2018. No. 2(368) pp. 120–143.
28. CMAP Precipitation. Physical Sciences Laboratory. Available at: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cmap.html> (accessed: 15.03.2023).
29. Globsnow snow products. Finnish Meteorological Institute. Available at: <https://www.globsnow.info/index.php?page=Products> (accessed: 15.03.2023).
30. Shikhov A. N., Churyulin E. V., Abdullin R. K. Assessment of the accuracy of snow water equivalent calculation with the use of global numerical weather prediction models and SnoWE snowpack model (by the example of the Kama River basin). *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2021. Vol. 66, No. 1. pp. 167–188.
31. Churyulin E. V., Krylenko I. N., Frolova N. L. Applying of combine opportunities of the runoff formation model (ECOMAG), the mesoscale atmosphere circulation model (COSMO-Ru) and the snow model (SnoWE) for the territory of the Russian Federation. *Hydrometeorology and Sustainable Development in Russia : Current Challenges. All-Russian Conference Proceedings*. Saint-Petersburg : RGGMU, 2019. pp. 300–301.
32. ArcticDEM. Polar Geospatial Center, 2023. Available at: <https://data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm/ArcticDEM/> (accessed: 15.03.2023).

УДК 556.3:622.341.1

ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДОПРИТОКОВ В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА



С. Н. КОТЛОВ¹,

старший научный сотрудник,
канд. геол.-минерал. наук,
Kotlov_SN@pers.spmi.ru



Н. А. ЦЕЛИЩЕВ¹,

аспирант-исследователь



Е. А. СОТНИК²,

технический директор



Д. Х. ГИЛЯЗЕВ²,

начальник службы
гидрогеомеханического мониторинга

На основе геолого-гидрогеологических особенностей Яковлевского месторождения, а также исходя из ранее принятых проектных решений, рассмотрена возможность уточнения схемы формирования водопритоков в горные выработки рудника на этапе эксплуатации для дальнейших прогнозов гидрогеологических условий его отработки. Сформулированы рекомендации по развитию системы гидрогеологического мониторинга месторождения.

Ключевые слова: водозащитная толща, рудник, водоприток, деформации кровли, гидрогеологические окна, прорыв воды, зона водопроводящих трещин, перетекание

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.16

с высокой концентрацией металла (55–62 %), которые впоследствии будут названы Яковлевским месторождением [1]. Однако из-за сложности геолого-гидрогеологических условий, вызванных глубиной залегания рудного тела, наличием в разрезе нескольких высоконапорных водоносных горизонтов, а также слабой устойчивостью богатых железных руд (БЖР) разработка окончательного проекта освоения первоочередного участка отработки месторождения и его реализация были отложены на 50 лет.

Результаты инженерно-геологических и гидрогеологических исследований Лебединского и Михайловского месторождений КМА показали потенциальную возможность экономически эффективной [2, 3] и безопасной отработки запасов Яковлевского месторождения (1952–1954 гг.). По мере доразведки месторождения и получения новой геолого-гидрогеологической информации об участке работ менялись представления о его генезисе, геологическом строении и гидрогеологических условиях. Только в период 1954–1966 гг. было

¹ Научный центр геомеханики и проблем горного производства, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
² ООО «Яковлевский ГОК», Яковлево, Россия

Введение

История открытия и освоения залежей Курской магнитной аномалии (КМА) насчитывает более 250 лет. В 1953 г. в ходе геологоразведочной экспедиции треста «Курскгеология» приблизительно в 30 км северо-западнее г. Белгорода на глубинах 400–600 м были вскрыты железосодержащие породы