

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

пробурено около 300 геологоразведочных скважин, сформированы представления о генезисе БЖР, выполнены опытно-водопонижение и оценка гидравлической связи нижнекаменноугольного водоносного горизонта с рудно-кристаллическим, разработан первый технический проект отработки месторождения подземным способом [1].

Проект осушения рудника, выполненный специалистами института ВИОГЕМ на основе ранее проведенных геолого-гидрогеологических работ, был утвержден в 1970 г. и включал в себя комбинированную систему дренажа, состоящую из 47 водопонижающих скважин, оборудованных на нижнекаменноугольном водоносном горизонте с поверхности, и сеть дренажных узлов из самоизливающихся наклонных и восстающих скважин, пробуренных из горных выработок горизонтов –300 и –400 м [1]. После уточнения гидрогеологических условий центрального участка Яковлевской полосы число водопонижающих скважин было сокращено до 30 ед. Снятие же остаточных напоров предусматривалось с помощью узлов наклонных дренажных скважин на горизонте –425 м. Очевидно, что в основе такой системы водопонижения лежали представления о наличии гидравлической связи между нижнекаменноугольным (НВГ) и рудно-кристаллическим (РВГ) водоносными горизонтами.

В период 1988–1992 гг. институтом ВИОГЕМ совместно с проектными организациями и геологической службой рудника проведено опытно-производственное водопонижение согласно утвержденной в проекте системе. В результате эксперимента были достигнуты максимальные значения понижения уровня подземных вод в 235 и 170 м в НВГ и РВГ соответственно. Для оценки гидравлической связи между НВГ и РВГ в 1991 г. проведено краткосрочное отключение насосного оборудования скважин на 10 дней. В период отключения уровни в НВГ и РВГ восстановились на 120 и 5 м соответственно [2]. Специалистами института ВИОГЕМ была решена обратная задача на трехслойной геофильтрационной модели по определению коэффициента фильтрации разделяющего водоносные горизонты слоя (прослоев сланцеватых и углистых глин в основании НВГ), который составил $1 \cdot 10^{-6}$ м/сут. Такой характер восстановления уровня в исследуемых водоносных горизонтах и полученный коэффициент фильтрации предопределили принятие решения по отключению системы поверхностного дренажа в 1992 г., которая не эксплуатируется и в настоящее время.

Однако отключение водопонижающих скважин, оборудованных на НВГ, существенно не влияет на снижение интенсивности осушения РВГ ввиду продолжения рассредоточенного дренажа самой системой капитальных горных выработок и разведочных скважин при работающей системе рудничного водоотлива, расположенных непосредственно в РВГ. Более того, из оперативных отчетов по геологическому участку рудника известно, что продолжали свою работу две водопонижающие скважины, оборудованные на РВГ.

Выводы, сделанные в 1992 г. о незначительной гидравлической связи между НВГ и РВГ, отличны и от ранее

проведенных исследований 1970-х годов под руководством И. Н. Леоненко, в ходе которых были определены коэффициенты фильтрации пород как НВГ, так и отдельно верхней скальной и нижней рыхлой частей РВГ непосредственно над продуктивными залежами центрального и смежных участков Яковлевского месторождения. По результатам гидрогеологических работ 1970-х годов количественные значения коэффициентов фильтрации НВГ и РВГ соотносятся в среднем как 30:1 над выработанным пространством и в зоне висячего бока и как 2:1 в зоне лежачего бока. При этом минимальные полученные коэффициенты фильтрации известняков НВГ составили в среднем 0,27 м/сут, а богатых железных руд РВГ – 0,039 м/сут, что также не соотносится с результатами опытного водопонижения 1991 г. и указывает на потенциальную возможность прямой гидравлической связи между горизонтами [1].

Немаловажным аргументом в пользу отсутствия связи между НВГ и РВГ является наличие в нижней части НВГ прослоев бурых углистых глин. Однако следует отметить, что результаты бурения профилей геологоразведочных скважин указывают на невыдержанность прослоев бурых углистых глин в плане и разрезе, что обуславливает наличие на контакте с РВГ гидравлических окон, в пределах которых отсутствует литологическое разделение горизонтов и происходит активное нисходящее перетекание подземных вод.

Исследования сотрудников Горного университета и других ученых в 2006–2015 гг. также позволили выявить факт нисходящего перетекания подземных вод из НВГ, обосновать геомеханические критерии прорывов вод в горные выработки [4–6]. Так, в ходе химического анализа проб подземных вод на участках их разгрузки в горные выработки Яковлевского рудника ими был выявлен и доказан факт перетекания вод НВГ по предложенным тестовым элементам [7–10].

Результаты исследования подтверждают наличие нисходящего фильтрационного потока подземных вод из НВГ, а также демонстрируют потенциал и актуальность дальнейших исследований количественной оценки объемных составляющих от разных источников поступления подземных вод в общем балансе формирования водопритока в горные выработки рудника. Вместе с тем эти обстоятельства обуславливают актуальность разработки рекомендаций для развития системы гидрогеологического мониторинга с целью повышения достоверности прогноза [11] гидрогеологических условий отработки месторождения.

Материалы и методы исследований

Сложность строения Яковлевского месторождения связана с глубиной его отработки, наличием в разрезе 9 напорных водоносных горизонтов с естественными напорами до 500 м, а также неоднородностью геомеханических параметров пород, прочность на одноосное сжатие которых в пределах одной выработки может варьироваться от 1 до 200 МПа (рис. 1) [12–14].

В геологическом строении месторождения принимают участие породы двух структурных этажей – фундамента и осадочного чехла Восточно-Европейской платформы.

В состав осадочного комплекса средней мощностью 500 м входят каменноугольные, юрские, меловые, палеоген-неогеновые и четвертичные отложения. Из них наиболее мощными и выдержанными по составу являются меловые и юрские отложения, имеющие повсеместное распространение. Палеоген-неогеновые отложения распространены только на водораздельных пространствах, превышение которых над речными долинами составляет в среднем 30–40 м. Литологический состав осадочной толщи представлен терригенными, карбонатными и карбонатно-терригенными отложениями с редкими невыдержанными прослоями бурых углей в нижней части пород нижнекаменноугольного возраста.

Докембрий представлен сильно выветрелыми по латеритному типу, местами дизъюнктивно нарушенными в субширотном направлении осадочными, метаморфическими и магматическими породами с наложенными в верхней части (5–70 м) вторичными гипергенными процессами хлоритизации и карбонатизации. Среди наиболее распространенных литотипов и петротипов можно выделить кварциты, аркозовые песчаники, филлиты, сланцы, плагиограниты висячего и лежачего боков, а также разнозернистые пылеватые пески и песчаники, алевриты рудного тела.

В плане гидрогеологического районирования участок работ принадлежит Днепровско-Донецкому артезианскому бассейну (структура II порядка) Восточно-Европейского сложного артезианского бассейна (структура I порядка). В районе месторождения выделяются два гидрогеологических комплекса, разделенных региональным водоупором бат-байосского возраста, средняя мощность песчано-глинистых пород которого составляет 35 м [1].

Верхний комплекс представлен семью гидравлически связанными водоносными горизонтами, приуроченными к юрским, меловым, палеоген-неогеновым и четвертичным отложениям. Их воды пресные с преобладанием гидрокарбонатов и сульфатов и широко используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения региона [15, 16].

В нижнем комплексе, воды которого формируют водоприток к выработкам Яковлевского рудника, выделяют нижнекаменноугольный и рудно-кристаллический водоносные горизонты. Минерализация вод РВГ варьируется от 1,1 до 10,5 г/л с преобладанием хлоридно-натриевого состава. При этом воды НВГ имеют минерализацию 0,4–0,8 г/л и гидрокарбонатно-натриевый состав, что позволяет с достаточной точностью разделить статьи прихода от каждого из них в общем балансе водопритока к очистным выработкам и по руднику в целом.

С целью защиты рудника от подземных вод в 2006 г. было принято проектное решение об оставлении водозащитного целика – водозащитной толщи (ВЗТ) между выработками 0-го слоя (гор. –370 м) и НВГ, сложенной преимущественно

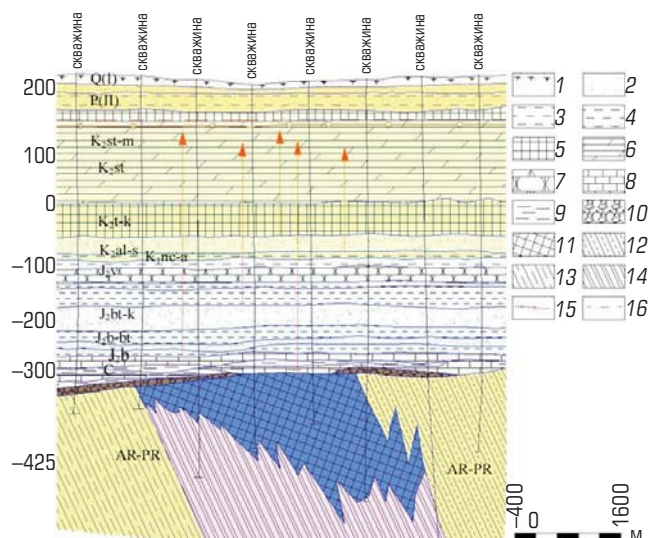


Рис. 1. Схематический геолого-гидрогеологический разрез Яковлевского месторождения (по данным С. В. Сергеева [2]):

- 1 – почвенно-растительный слой; 2 – песок; 3 – глина;
- 4 – песчаная глина; 5 – мел; 6 – мергель; 7 – песчаник;
- 8 – известняк; 9 – сланцевая глина; 10 – переотложенная руда;
- 11 – руда; 12 – кварц-серицитовые сланцы;
- 13 – филлитовые сланцы; 14 – кварцит; 15 – естественный уровень РВГ;
- 16 – естественный уровень НВГ

богатыми железными рудами, а также кварцитами, филлитовыми сланцами и переотложенными бокситовыми образованиями [17–20]. Средняя мощность ВЗТ составляет 65 м и варьируется от 54 до 72 м [21].

Установлено, что при такой мощности целика сохраняется потенциальная возможность прорывов подземных вод в горные выработки горизонта –370 м, и их вероятность резко возрастает при вторичном увлажнении руд, слагающих ВЗТ [22–25]. Более того, собранные в 2022 г. во время гидрогеологической съемки рудника данные о водопроявлениях и химическом составе дренаруемых вод, а также динамика изменения водопритока во времени указывают на интенсификацию процесса перетекания подземных вод из НВГ и РВГ. Это обстоятельство обуславливает целесообразность и необходимость уточнения схемы формирования водопритока в горные выработки Яковлевского рудника для прогноза гидрогеологических условий отработки месторождения.

Для реализации цели исследования выполнена гидрогеологическая съемка участков высачивания и прорывов подземных вод в горные выработки, проанализированы минерализация вод, их химический состав, оценены дебит и масштаб участков капеза.

Результаты исследований

Результаты первого этапа исследований гидрохимического режима подземных вод НВГ и РВГ (1955–1958 гг.) на стадии

геологической разведки месторождения дают представление об их естественных показателях. Так, средняя минерализация по результатам опробования НВГ с помощью 13 скважин и РВГ 7 скважинами составила 715 и 1150 мг/л соответственно.

В естественном режиме воды НВГ и РВГ характеризуются гидрокарбонатно-хлоридным или гидрокарбонатным натриевым и хлоридным натриевым составами соответственно. Средняя концентрация гидрокарбонатов в НВГ в естественных условиях составляла 330 мг/л, а в РВГ – 370 мг/л. Концентрация хлоридов различалась резко и составляла в НВГ и РВГ 193 и 430 мг/л соответственно. Стоит заметить, что кислотно-щелочные условия водоносных горизонтов были и остаются тождественны – слабощелочные со средним значением водородного показателя 7,9–8,1 [1, 26].

В период проходки стволов, капитальных выработок рудодворов и введения в эксплуатацию системы поверхностного осушения концентрацию основных ионов и общую минерализацию вод НВГ и РВГ изучали по 25–30 скважинам, большая часть которых была оборудована на НВГ. В начальный период техногенного влияния на естественный гидродинамический и гидрохимический режим нижнего гидрогеологического комплекса общая минерализация водоносных горизонтов увеличилась на 20–100 %. Воды НВГ приобретали гидрокарбонатно-хлоридный натриевый состав, концентрация сульфатов также незначительно увеличивалась, что связано с дренированием объемов, заключенных в пределах слабопроницаемых прослоев углистых глин и углей в основании нижнекаменноугольных известняков. Подобная ситуация наблюдалась и в РВГ при опытно-фильтрационных исследованиях 1950-х годов, когда минерализация в ходе откачек повышалась на 15–20 % [1]. Однако как при исследованиях в 1950-х годах, так и при опытно-водопонижении в 1990-х годах воды НВГ и РВГ постепенно опреснялись вследствие вовлечения в процесс дренирования запасов вод за область радиуса влияния сооружений в плане и из перекрывающих стратонтов в разрезе.

Таким образом, с момента отключения в 1992 г. системы поверхностного дренажа и до настоящего времени РВГ постепенно опреснялся в результате увеличения градиента напора между НВГ и РВГ и интенсификации процесса перетекания подземных вод, увеличения размеров депрессионной воронки в плане и роста техногенной нарушенности массива выработками, пересекающими подошву НВГ.

На это указывают как сравнительный анализ химического состава вод НВГ и РВГ со значениями концентраций до отработки месторождения, так и изменение сухого остатка непосредственно самих дренажных вод рудника. Например, минерализация рудничных вод за последние 8 лет снизилась с 2670 до 1670 мг/л (табл. 1), при этом концентрация хлоридов снизилась на 41 %, гидрокарбонатов на 27 %, фторидов на 65 %, а сульфатов увеличилась на 33 %. Стоит отметить, что повышенные концентрации фторидов (до 10–12 мг/л) характерны исключительно для РВГ, а сульфатов

Таблица 1. Изменение значений концентрации анионов в рудничных водах

Компонент	Август 2014 г.	Июль 2016 г.	Сентябрь 2018 г.	Июль 2022 г.
НСО ₃ , мг/дм ³	247	240	205	180
SO ₄ , мг/дм ³	41,6	58	59	62
Cl, мг/дм ³	1464	1000	962	890
F, мг/дм ³	8,0	7,5	3,3	2,8
Водородный показатель pH	–	8,1	8,0	8,2
Сухой остаток, мг/дм ³	2672	2200	2081	1670
Общий водоприток, м ³ /ч	455	470	490	670

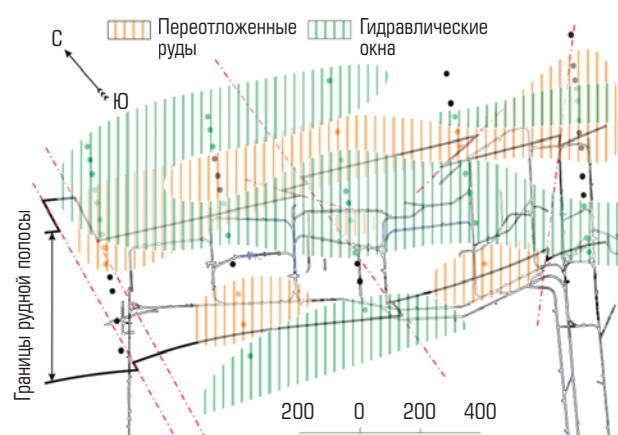


Рис. 2. Схема расположения гидравлических окон в подошве НВГ

(до 80 мг/л) – для НВГ, что в совокупности с уменьшением сухого остатка дренажных вод указывает на увеличение во времени доли перетекания из НВГ в общий баланс формирования водопритока в рудник.

Вместе с тем предпосылки к наличию прямой связи между НВГ и РВГ через гидравлические окна обусловлены и геологическими факторами: отсутствием в разрезе некоторых участков нижней части НВГ прослоев глин и углей (рис. 2).

Для оценки конкретных составляющих в общем балансе формирования водопритоков к очистным выработкам Яковлевского рудника использован объемно-весовой метод, позволяющий по известным значениям получаемого при смешении объема вод и концентрации в нем компонента, а также концентраций компонента в каждой из составляющих итогового притока определить долю каждой из них в общем балансе.

Исходными данными для аналитического расчета служат результаты химического анализа проб, отобранных из порожнякового квершлага (отводящего дренажные воды со всех очистных выработок), а также замеры минерализации непосредственно в водоотводящих канавках рудника.

Усредненный анионный состав вод НВГ из отобранных совместно с сотрудниками геологического участка рудника проб следующий, г/л: $M = 0,5$; $C(\text{HCO}_3) = 0,231$; $C(\text{Cl}) = 0,048$; $C(\text{SO}_4) = 0,046$; $C(\text{F}) = 0,0015$. Усредненный анионный состав вод РВГ из отобранных совместно с сотрудниками геологического участка рудника проб, г/л: $M = 1,3$; $C(\text{HCO}_3) = 0,2$; $C(\text{Cl}) = 0,62$; $C(\text{SO}_4) = 0,016$; $C(\text{F}) = 0,0037$. Усредненный состав рудничных вод, поступающих в объеме около $550 \text{ м}^3/\text{ч}$ из очистных выработок, характеризуется следующими значениями концентрации компонентов, г/л: $M = 0,85$; $C(\text{HCO}_3) = 0,22$; $C(\text{Cl}) = 0,27$; $C(\text{SO}_4) = 0,041$; $C(\text{F}) = 0,0026$.

Решение задачи сводится к поиску объемов смешиваемых растворов исходя из известных концентраций компонента А, В и С и конечного объема смеси V , при этом сумма произведений концентраций смешиваемых растворов с их объемами приравнивается к произведению концентрации компонента в смеси и ее объема (рис. 3). Уравнение не имеет физического смысла, однако хорошо подходит для решения пропорциональных задач на смешение растворов [27].

Подставляя в уравнение известные значения концентрации, получим следующие результаты для каждого из них (табл. 2).

Обсуждение результатов

Исходя из особенностей химического состава вод водоносных горизонтов до начала отработки месторождения, можно сделать вывод, что перетекание имело место с момента строительства стволов рудника и осуществления первых дренажных мероприятий в 1980–1990-х годах. С развитием системы поверхностного осушения увеличились градиенты подземных вод, что привело к временному увеличению их минерализации вследствие интенсификации растворимости горных пород и вовлечения в процесс дренажа объемов, заключенных в зонах замедленного водообмена: прослойки глины и углей нижней части НВГ, локальные зоны трещиноватости РВГ. С конца XX в. началось опреснение вод НВГ и, как следствие, РВГ.

Стоит отметить, что и на сегодняшний день сохраняются низкодебитные зоны разгрузки с высокой минерализацией вод, достигающей 12 г/л. На это также указывает возможное отклонение полученного результата при расчете баланса по сульфат-иону. Более достоверными являются значения, полученные по общей минерализации, хлоридам, фтору и гидрокарбонатам. Эти компоненты также были использованы как тестовые в ранее проведенных сотрудниками Горного университета исследованиях [26].

В целом, учитывая высокую сходимость результатов по оценке разных анионов, можно отметить достоверность полученных данных, которые согласуются с существующими исследованиями, теоретическими предпосылками теории фильтрации и заметками работников рудника.

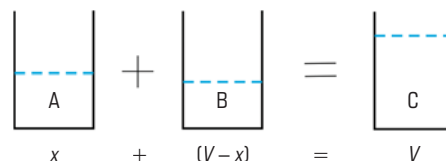


Рис. 3. Уравнение поиска объема каждой составляющей при смешении двух растворов

Таблица 2. Процентные и абсолютные значения составляющих общего водопритока в рудник

Компонент	Доля НВГ, %	Доля НВГ, м ³ /ч
$M_{\text{общ}}$	56	310
HCO_3	62	341
Cl	61	335
F	50	275
SO_4	84	462

Выводы

Результаты анализа изменения состава рудничных вод за последние 8 лет, выявленные геологические факторы существования гидрогеологических окон на границе НВГ и РВГ, а также аналитический расчет составляющих в общем балансе водопритока к выработкам демонстрируют наличие нисходящего перетекания подземных вод из НВГ в количестве, обеспечивающем около 60 % притока в рудник. Более того, доля НВГ в формировании водопритока растет со временем, что дает возможность обоснованно корректировать как положения регламента гидрогеомеханического мониторинга месторождения, так и развитие дренажной системы рудника, прогнозировать проницаемость ВЗТ во времени в зависимости от степени ее деформирования, применять вероятностные подходы к оценке гидрогеомеханических рисков [29–31].

Перед разработкой рекомендаций по осушению и мониторингу месторождения целесообразно в будущем проверить достоверность выводов гидродинамическим методом с помощью численного геофильтрационного моделирования [32, 33]. Однако даже сейчас можно констатировать, что перспективными методами гидрогеомеханического мониторинга состояния ВЗТ в условиях Яковлевского месторождения будут как высокочастотные измерения напоров и химического состава подземных вод с помощью логгеров, так и систематические замеры деформаций и коэффициентов фильтрации на контрольных точках развиваемых наблюдательных станций [31, 34–36].

Библиографический список

См. англ. блок.

Geological and hydrogeological factors of initiation of water inflow in Yakovlevo Mine**Information about authors**

S. N. Kotlov¹, Senior Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Kotlov_SN@pers.spmi.ru

N. A. Tselishchev¹, Post-Graduate Student–Researcher

E. A. Sotnik², Technical Officer

D. Kh. Gilyazev², Head of the Hydrogeomechanical Monitoring Department

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

²Yakovlevsky GOK LTD, Yakovlevo, Russia

Abstract

History of origination and evolution of mankind reflects an increasing demand and unexampled value of iron ore. Russia is the world's fifth producer of round 120 Mt of iron ore annually and the world's top holder of 59 Bt of iron ore resources. The weight of Yakovlevo deposit in this regard is proved by approximately 9 Bt of high-grade iron ore. The present-day challenge of the national mineral sector is to ensure safe, incremental and sustainable production of iron ore under increasing demand of the day.

Meeting such goal eventually assumes proper design solutions connected with complex geology, hydrogeology and geotechnology. One of the problems in this regard is safe mineral extraction under undrained high-pressure aquifers, which includes stability of underground openings and reliable prediction of water inflow.

This study uses specific geological and hydrogeological data of Yakovlevo deposit, as well as the previous design solutions to analyze adjustability of water inflow map at the stage of mine operation toward further forecasting of hydrogeological conditions of mining.

The drainage and monitoring guidelines should be preceded by checking the output fidelity using a hydrodynamics method and the numerical geoflow modeling. However, it is already possible to state that the promising methods of hydrogeomechanical monitoring of the impermeable strata at Yakovlevo deposit are the high-frequent measurements of groundwater pressure and chemistry using loggers, and the regular measurement of deformations and permeabilities at check points. The recommendations on hydrogeological monitoring development in mineral mining are formulated.

Keywords: impermeable strata, mine, water inflow, roof deformation, hydrogeological window, water inrush, permeable fracturing zone, migration.

References

1. Leonenko I. N., Rusinovich I. A., Chaykin S. I. Geology, hydrogeology and iron ores of the pool of the Kursk Magnetic Anomaly. Moscow, 1969. Vol. 3. Iron ore. 319 p.
2. Noskov V. A., Badtiev B. P., Pavlovich A. A. Risk management in open pit mining. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 2. pp. 51–55. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.06
3. Shabarov A. N., Noskov V. A., Pavlovich A. A., Cherepov A. A. Concept of geomechanical risk in open pit mining. *Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 9. pp. 22–28. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04
4. Sergeev S. V., Lyabakh A. I., Kvachev V. N., Sevryukov V. V. The Geologo-Hydrogeological Characteristic of the Yakovlevsky Deposit. *Regionalnye geosistemy*. 2011. Vol. 15, No. 9(104). pp. 147–154.
5. Grigorev A. M., Zoteev O. V., Makarov A. B. Geomechanical substantiation of Yakovlevskoe deposit development under undrained water-bearing horizons. *GIAB*. 2013. Special issue 4. pp. 27–37.
6. Malyukhina E. M. Justification of geomechanics parameters in propagation of induced permeable fractures in iron ore mining : Thesis of Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Moscow, 2020. 20 p.
7. Gusev V. N., Ilyukhin D. A., Aleksenko A. G. Determining of the parameters of water conducting fracture zone through values of undermined strata horizontal deformations values. *Journal of Mining Institute*. 2013. Vol. 204. pp. 69–73.
8. Dashko R. E., Feller E. N. Formation and development of mining-and-geological processes in relation to changes in engineering-geological and hydrogeological conditions on Yakovlevsky mine. *Journal of Mining Institute*. 2012. Vol. 199. pp. 151–160.
9. Feller E. N. Prediction of changes in geotechnical conditions during stoping in Yakovlevo Mine (Yakovlevo High-Grade Iron Ore Deposit, Kursk Magnetic Anomaly) : Thesis of Dissertation ... of Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences. Moscow, 2014. 25 p.
10. Fomenko S. V. Prediction analysis of drainage at Yakovlevo iron ore deposit. *Geology and Subsoil Development : Proceedings of XXIII Academician Usov International Symposium of Students and Young Scientists in Honor of Professor K. V. Radugin's 120th Anniversary*. Tomsk : Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2019. Vol. 1. pp. 399–401.
11. Erzova V. A., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M. et al. Forecast of radionuclide migration in

- groundwater of the zone affected by construction drainage at the Leningrad NPP-2. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 260. pp.194–211.
12. Trushko V. L., Protosenya A. G., Dashko R. E. Geomechanical and hydrogeological problems of the Yakovlevsky deposit development. *Journal of Mining Institute*. 2010. Vol. 185. pp. 9–18.
 13. Trushko V. L., Sozonov K. V. Assessment of the stress–strain state of polygonal configuration stopes during development of unstable iron ores. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2019. No. 2. pp. 331–340.
 14. Gusev V. N., Ilyukhin D. A., Zhuravlev A. E. Assessment of the degree of disturbance of the undermined strata by technogenic water conducting fractures according to geomechanical monitoring in the excavations of Yakovlevski mine. *Journal of Mining Institute*. 2013. Vol. 204. pp. 74–81.
 15. Dashko R. E. Mineral water of the Yakovlev deposit of high-grade iron ores (KMA): diagnostics and usability. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2016. No. 1. pp. 33–38.
 16. Kramchaninov N. N., Petin A. N. Underground water regime and qualitative composition in mining areas of the Kursk Magnetic Anomaly's Belgorod Region. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*. 2012. No. 2(45). pp. 233–240.
 17. Trushko V. L., Gospodarikov A. P., Sozonov K. V. Calculation of stress state in ore and backfill during mining in Yakovlevskoe iron ore deposit. *GIAB*. 2019. No. 5. pp. 111–123.
 18. Belyakov N. A., Karasev M. A., Trushko V. L. Continuum Mechanics : Tutorial. Saint-Petersburg, 2019. 114 p.
 19. Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 162–166.
 20. Sinogubov V. Predicting the Stress-Strain State of a Massif at the Stage of Creating a Protective Cover in the Conditions of Developing Iron Ore Deposits Under Water-Bearing Strata. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 8, Iss. 1. pp. 133–138.
 21. Protosenya A. G., Trushko V. L. Forecast of Excavation Stability in Weak Iron Ore in Terms of the Yakovlevsky Deposit. *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49, No. 4. pp. 557–566.
 22. Dashko R. E., Volkova A. V. Analysis of potential groundwater inrush from the Upper Kama coal-bearing aquifer in Yakovlevo Mine. *Journal of Mining Institute*. 2006. Vol. 168. pp. 142–148.
 23. Trushko V. L., Trushko O. V. Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 569–577.
 24. Trushko V. L., Trushko O. V. Improving safety and efficiency of the development of large iron ore deposits with soft ore. *GIAB*. 2019. Special issue 7. Industrial safety of enterprises of mineral resource complex in XXI century-2. pp. 298–306.
 25. Petrov D. N., Zykov D. B. Strength characteristics and deformation properties of hydrohematite ore at Yakovlevo deposit. *Journal of Mining Institute*. 2006. Vol. 167, No. 1. pp. 141–143.
 26. Yanin E. P. Environmental impact of Russian iron ore deposits. Review. *Ekologicheskaya ekspertiza*. 2019. No. 5. pp. 2–94.
 27. Zhimin Xu, Yajun Sun, Shang Gao, Xianming Zhao, Ruiqi Duan et al. Groundwater Source Discrimination and Proportion Determination of Mine Inflow Using Ion Analyses: A Case Study from the Longmen Coal Mine, Henan Province, China. *Mine Water and the Environment*. 2018. Vol. 37, Iss. 2. pp. 385–392.
 28. Dashko R. E., Kovaleva E. N. Hydro-geological monitoring on the Jakovlevsky mine as implement of increase safety conducting mine second working in difficult geological conditions. *Journal of Mining Institute*. 2012. Vol. 195. pp. 19–23.
 29. Staat M. An Extension Strain Type Mohr–Coulomb Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021. Vol. 54, Iss. 12. pp. 6207–6233.
 30. Wing Kei Kong. Water Ingress Assessment for Rock Tunnels: A Tool for Risk Planning. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2011. Vol. 44, Iss. 6. pp. 755–765.
 31. Belikov A. A., Belyakov N. A. Method of predicting the stress–strain state of interchamber pillars lined with a compliant rope fastener. *GIAB*. 2023. No. 4. pp. 20–34.
 32. Ustyugov D. L. Concept of permanent hydrodynamic model of Yakovlevo high-grade iron ore deposit, Kursk Magnetic Anomaly. *Modeling in Geoecology (Sergeev's Lectures) : Proceedings of Annual Session of the Science Board for Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology at the Russian Academy of Sciences*. Moscow : GEOS, 2009. Iss. 11. pp. 426–430.
 33. Shamshev A. A., Kotlov S. N. Improvement of estimation procedure for flow parameters in anisotropic weakly permeable deposits based on flow tests. *GIAB*. 2017. No. 10. pp. 194–204.
 34. Protosenya A. G., Petrov D. N., Sinyakin K. G., Martemyanova G. A. The field observation for the processes of settling of the ore ceiling caused by mining works at Yakovlevsky deposit. *Journal of Mining Institute*. 2011. Vol. 190. pp. 158–162.
 35. Rau G. C., Cuthbert M. O., Post V. E. A., Schweizer D., Acworth R. I. et al. Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice. *Hydrogeology Journal*. 2020. Vol. 28, Iss. 8. pp. 2963–2969.
 36. Dashko R. E., Romanov I. S. Forecasting of mining and geological processes based on the analysis of the underground space of the Kupol deposit as a multicomponent system (Chukotka Autonomous Region, Anadyr district). *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 20–32.