ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(6):153-167
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 556.3 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_153

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИН ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕЛЕ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ

С.Н. Котлов[1], Н.А. Целищев[1], М.А. Горло[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: orlovamaria17@mail.ru

Аннотация: Отрабатываемое в сложных геолого-гидрогеологических и горно-технических условиях Яковлевское месторождение является богатейшим по запасам железа в пределах Курской магнитной аномалии с запасами около 9 млрд т и обладает высокой ценностью как для научной, так и для промышленной составляющих развития Российской Федерации, которая поставляет на внутренний и внешний рынок десятую часть добываемых в мире железных руд. Актуальность работы обусловлена глобальной тенденцией к разработке месторождений полезных ископаемых во все более сложных условиях, что связано со значительной выработкой легко извлекаемых запасов, доступных к разработке открытым способом на незначительных глубинах. Одной из сложностей, с которыми сталкивается горная отрасль – это извлечение запасов под неосушенными водоносными горизонтами и другими водными объектами. Рассмотрены вопросы оценки гидрогеологических условий проведения специальных гидрогеомеханических исследований в теле водозащитной толщи с целью повышения их эффективности и безопасности. Планируемые исследования позволят увеличить надежность прогнозов водопритоков в горные выработки и оценки развития гидрогеомеханических процессов. На примере упрощенных тестовых задач авторами даются рекомендации по методике моделирования распределения гидростатического напора в теле водозащитной толщи над горными выработками перед фильтрационными опробованиями.

Ключевые слова: водозащитная толща, рудник, водоприток, деформации кровли, устойчивость, прорыв воды, зона водопроводящих трещин, численное моделирование.

Для цитирования: *Котлов С. Н., Целищев Н. А., Горло М. А.* Обоснование параметров скважин для проведения специальных гидрогеологических исследований в теле водозащитной толщи // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 6. – С. 153–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_153.

Substantiation of borehole parameters for special hydrogeological research inside impermeable strata

S.N. Kotlov[1], N.A. Tselischev[1], M.A. Gorlo[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: orlovamaria17@mail.ru

© С.Н. Котлов, Н.А. Целищев, М.А. Горло. 2023.

Abstract: The geologically, hydrogeologically and geotechnically complex Yakovlevo deposit holds the richest iron ore reserves of round 9 Bt within the Kursk Magnetic Anomaly, and is scientifically and commercially valuable for Russia which supplies the domestic and international markets with the tenth of the total iron ore produced in the world. The relevance of the research is defined by the global trend of worsening and complication of mineral mining conditions due to depletion of readily mineable shallow reserves suitable for the extraction by the open pit method. Among other things, the mining industry faces a complexity connected with extraction of ore reserves under undrained aquifers and other water-bearing bodies. The issues connected with estimation of hydrogeological conditions for the special hydrogeomechanical research inside impermeable rock strata to make them safer and more efficient are discussed. The research being planned can enhance reliability of forecasts of water influxes in mines and assessment of hydrogeomechanical processes. In terms of the simplified test problems, the authors give recommendations on modeling hydrostatic pressure distribution in the impermeable strata above underground openings before permeation testing.

Key words: impermeable strata, mine, water influx, roof deformation, stability, water breakout, water-conducting fracture zone, numerical modeling.

For citation: Kotlov S. N., Tselischev N. A., Gorlo M. A. Substantiation of borehole parameters for special hydrogeological research inside impermeable strata. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(6):153-167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_153.

Введение

Уникальность и сложность условий разработки Яковлевского рудника (ЯР) Курской магнитной аномалии (КМА) обусловлена текущим состоянием ведения горных работ на рассматриваемом объекте: в рамках технического проекта происходит отработка богатых железных руд руднокристаллического комплекса в условиях неосушенного, перекрывающего со структурных несогласием, водоносного нижнекаменноугольного горизонта с величинами избыточных напоров 320 — 360 м. Водоносный горизонт на большей части площади ведения горных работ литологически отделен от пород фундамента водозащитной толщей (ВЗТ), представленной карбонатизированными и хлоритизированными в прикровельной части богатыми железными рудами; генетически — корой химического выветривания джеспилитов латеритного типа.

Отработка богатых железных руд, содержание железа в которых достигает 68%, осуществляется нисходящей послойной системой с полной закладкой очистных выработок твердеющими смесями, как правило, легкими бетонами. Для защиты горных выработок от подземных вод и гидрогеомеханических процессов проектом было предусмотрено оставление защитного породного целика, мощность которого составила 55 — 70 м [1]. Однако, согласно ранее проведенным исследованиям сотрудниками Горного института, уставлено, что:

- результаты гидрохимического мониторинга на некоторых участках ЯР указывают на существование прямой гидравлической связи нижнекаменноугольного водоносного горизонта с руднокристаллическим, при этом количество подобных участков растет со временем [2];
- анализ оседания рудной потолочины показывает, что в теле надрудной осадочной толщи образуются зоны разуплотнения, выявленные по разнице мак-

симальных деформаций реперов, смонтированных в кровле подземных выработок 0-го слоя и установленных на дневной поверхности [3];

- расчеты по предложенным в ряде диссертационных работ методикам показывают, что верхняя граница зоны водопроводящих трещин (ЗВТ), приуроченная к слою с граничной кривизной, на некоторых участках уже пересекла подошву нижнекаменноугольного горизонта, что существенно повышает риск прорывов подземных вод в горные выработки [4, 5];
- густота мониторинговой сети ЯР, состоящей из наблюдательных геомеханических станций и гидрогеологических точек опробования, и периодичность фиксации данных на этих точках опробования недостаточны для получения представительной информации о динамике изменения гидрогеомеханических условий;
- расчеты прорывоопасности подземных вод (предельно допустимых напоров) при вторично увлажненном состоянии богатых железных руд (БЖР) указывают на потенциальную возможность протекания данного процесса, что повышает актуальность контроля уровня подземных вод в теле и над ВЗТ.

Данные обстоятельства требуют проведения ряда специальных опытных гидрогеомеханических исследований для оценки и прогноза условий отработки месторождения и разработки рекомендаций по дальнейшему развитию комплексного мониторинга среды.

Материалы и методы

Геологическое строение Яковлевского месторождения характеризуется наличием в его разрезе двух резко отличающихся по тектонической и стратиграфической наполненности структурных этажей: на размытой поверхности сложнодислоцированных, разбитых дизъюнктивными нарушениями субширотного простирания и сильно выветрелых породах докембрия залегает мощная толща осадочных образований с субгоризонтальным залеганием слоев общей мощностью от 440 м до 580 м и средним уклоном на юг 0,07. Осадочная толща сложена отложениями нижнекаменноугольного, юрского, мелового, палеогенеогенового и четвертичного возраста песчано-глинистого и карбонатного состава (см. рис. 1).

Нижнекаменноугольные отложения представлены известняками с маломощными (0,5 — 3,0 м) прослоями углистых глин, местами бурых углей, залегающих обычно в нижней части толщи. Общая мощность нижнекаменноугольных отложений на территории месторождения изменяется от 40 до 70 м. Юрские мощные песчано-глинистые накопления, в составе которых выделен бат-байосский водоупор средней мощностью 35 м, имеют региональное распространение и отделяют водоносные горизонты верхнего водоносного комплекса от нижнего. Самыми молодыми коренными образованиями являются нижне-верхнемеловые терригенные отложения средней мощностью 280 — 300 м.

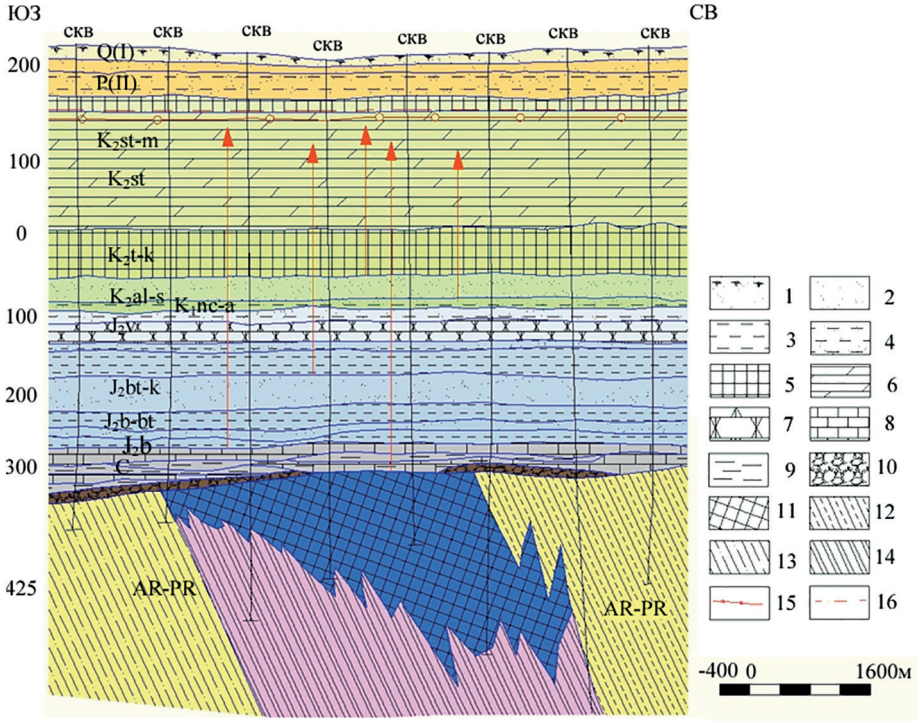
Нижний водоносный комплекс, состоящий из руднокристаллического и нижнекаменноугольного водоносных горизонтов, оказывает наибольшее влияние на ведение очистных работ, формируя основную долю водопритока к горным выработкам. Его воды характеризуются минерализацией от 1 — 1,5 г/дм^3 до 10 г/дм^3 и гидрокарбонатно-хлоридным натриевым составом. Следует отметить, что дренажной системой ЯР предусматривается осушение лишь руднокристаллического горизонта без понижения напоров в нижнекаменноугольном. Воды верхнего комплекса, ввиду более активного характера водообмена и наличия гидравлической связи с поверхностными, обладают минерализацией до 1 г/дм^3

с преобладанием гидрокарбонат- и сульфат-иона.

Породный целик безопасности, так называемая «водозащитная» толща (ВЗТ), находящаяся в интервале между горизонтом –370 м и подошвой нижнекаменноугольного горизонта, сложена карбонизированными в верхней части рудами и является прикровельной частью рудного тела в составе коры химического выветривания, литологически отделяя отрабатываемый массив от неосушенного водоносного горизонта.

В составе ВЗТ выделяются различаемые на месторождении разновидности богатых железных руд: «краски» и «синьки», представленные мартит-гидрогематитовыми, гидрогетитовыми неоднородными песками и мартит-железослюдковыми, гематитовыми пористыми алевритами соответственно, которые в свою очередь изменены вторичными процессами карбонатизации и хлоритизации, преимущественно в своей верхней части.

Отпечаток вторичных процессов привносит изменение однородности прочностных параметров пород по вертикальному разрезу ВЗТ: в верхней части толщи прочность на одноосное сжатие составляет в среднем около 100 МПа и снижается с приближением к кровле выработок –370 горизонта до 2 МПа, при этом увеличивается пористость, появляется макропористость и склонность «синек» к плывунным свойствам при пре-



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

Рис. 1. Разрез Яковлевского месторождения с напорами подземных вод, ЮЗ—СВ

Fig. 1. The section of Yakovlevskoye deposit, with the groundwater pressure SW-NE shown schematically on it

вышении гидравлического градиента над единичной величиной (I>1) [6].

Для решения ряда озвученных во введении вопросов проектом разработки ЯР предусмотрен хорошо зарекомендовавший себя опыт проведения пневмоиспытаний горных пород и грунтов зоны аэрации с целью определения их фильтрационных характеристик. Метод оказался весьма продуктивным для вертикального расчленения по проницаемости защитных целиков, сложенных скальными и полускальными трещиноватыми и глинистыми породами. Показательны в этом отношении результаты ведения мониторинга состояния водозащитных целиков на месторождениях Якутской алмазоносной провинции: «Айхал», «Интернациональный», «Удачный», «Мир» и другие, где ведется подземная отработка подкарьерных запасов кимберлитовых трубок [7]. В условиях этих рудников успешно осуществляется ежегодный контроль за изменчивостью проницаемости водозащитных целиков и миграцией зоны водопроводящих трещин путем проведения пневмоиспытаний в восстающих скважинах.

Концептуальное сходство гидрогеологических условий указанных месторождений с Яковлевским рудником, а также рекомендации действующего проекта разработки по проведению специальных гидрогеомеханических исследований указывает на положительный ожидаемый результат проведения пневмоиспытаний «водозащитной» толщи.

Сущность метода заключается в нагнетании некоторого количества воздуха в исследуемый интервал опытной скважины, который изолируется тампонирующим устройством. Нагнетаемый воздух вызывает динамическое возмущение газа, насыщающего пласт.

Абсолютные значения глубины залегания кровли слоев и их коэффициенты фильтрации
Absolute values of the depth of the roofing layers and their coefficients of permeability

Номер слоя	Название слоя	Абсолютные отметки кровли, м	Коэффициент фильтрации, м/сут
1	Бат-байосский	–210	0,001
2	Каменноугольный 1	–270	2,0
3	Каменноугольный 2	–300	0,5
4	ВЗТ 1	–310	0,001
5	ВЗТ 2	–317	0,01
6	ВЗТ 3	–324	0,05
7	ВЗТ 4	–331	0,03
8	ВЗТ 5	–338	0,1
9	ВЗТ 6	–345	0,15
10	ВЗТ 7	–352	0,5
11	ВЗТ 8	–359	1,0
12	Выработки	–366	0,01
13	Руда 1	–370	0,01
14	Руда 2	–470	0,0001
Подошва модели		–570	–

По характеру изменения расхода нагнетаемого воздуха и давления в опытной скважине либо наблюдательном пьезометре определяются фильтрационные параметры. По полученным данным делается вывод о степени подработки целика, о существовании и формировании зон трещиноватости, в частности, водопроводящих трещин.

Для повышения эффективности проведения полевых работ необходима оценка условий, в которых будут работать скважины, предназначенные для проведения пневмоиспытаний, и, как следствие, для дальнейшей прогнозной оценки состояния гидрогеологических условий на Яковлевском руднике. В связи с чем в описываемой работе производится оценка текущего положения уровня подземных вод в теле ВЗТ, в зависимости от неоднородного распределения коэффициента фильтрации по вертикали, имитирующего наличие зон разуплотнения.

При решении поставленной задачи использовалось специализированное программное обеспечение для геофильтрационного моделирования: Visual MODFLOW Flex (3D) и Rocksciences Slide (2D). При этом конфигурация моделей включала в себя 14 слоев, абсолютные отметки кровли и подошвы которых, а также их начальные коэффициенты фильтрации приведены в таблице. Как видно из таблицы, некоторые литологические разности, для удобства задания фильтрационной неоднородности, были разбиты на несколько слоев: так, например, ВЗТ была дискретно разделена на 8 равных по мощности слоев (рис. 2, 3).

Учитывая реальные условия Яковлевского месторождения, в интерфейсе Visual MODFLOW было задано:

- напор 70 м на кровле бат-байосского горизонта, отвечающий осредненным значениям;
- нижнекаменноугольный водоносный горизонт условно разделен на две части: первая часть представлена более проницаемыми отложениями и приурочена к толще известняков, вторая, менее водопроницаемая часть, представлена глинистыми отложениями мощностью 10 м;

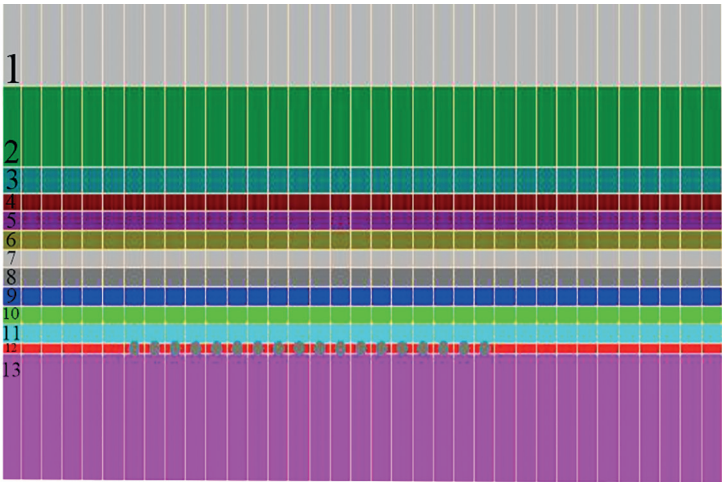


Рис. 2. Схематический разрез вкрест простирания рудного тела моделируемой области, представленный подземной горной выработкой (слой 12) и массивом пород над ней (слои 1 – 11, 13), в ПО Visual MODFLOW Flex (пронумерованы модельные слои)

Fig. 2. Schematic section across the strike of the ore body of the modeled area, represented by an underground mine working (lay 12) and a rock mass above it (layes 1 – 11, 13), in Visual MODFLOW Flex software (model layers are numbered)

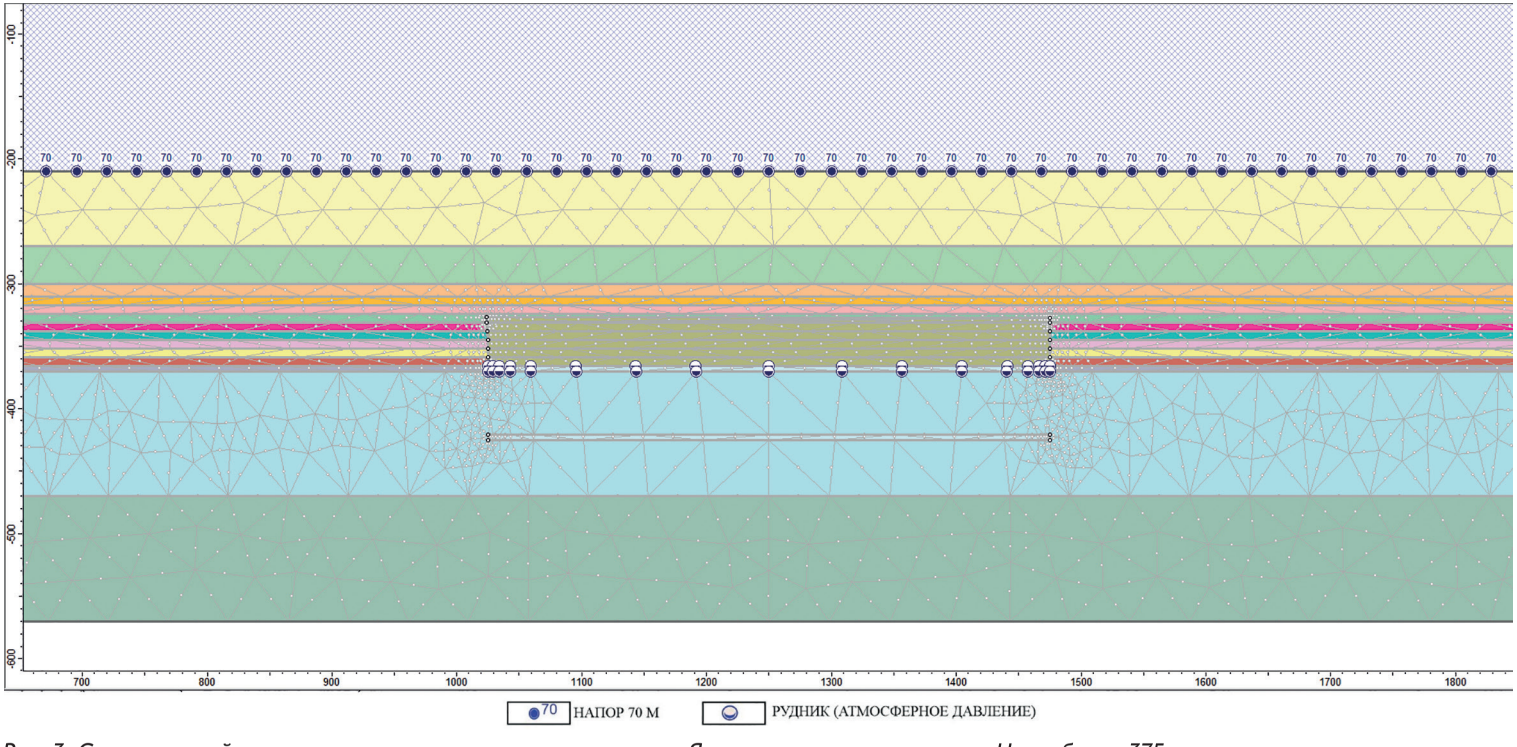


Рис. 3. Схематический разрез вкрест простирания рудного тела на Яковлевском месторождении. На глубине –375 м в качестве модуля дрена задана горная выработка в программном обеспечении Slide

Fig. 3. Schematic section across the strike of the ore body at the Yakovlevskiy deposit. At a depth of minus 375 m, as a drainage module, a mine working is set in the Slide software

• стационарный режим фильтрации, близкий к текущему на ЯР;

• абсолютные отметки залегания кровли и подошвы пород, представленных в разрезе (см. таблицу);

• горные выработки –370 горизонта имитировались при помощи модуля Drain;

• напор по внутреннему контуру горной выработки равен геометрической высоте (условие свободной разгрузки воды);

• ниже –370 отметки, совпадающей с подошвой горной выработки, заданы буферные зоны, соответствующие рудно-кристаллическому горизонту (руда 1 и руда 2).

Результаты

В результате численного моделирования установлено, что в нижней части водозащитной толщи с примыканием к горизонту –370 м происходит формирование зоны неполного водонасыщения (рис. 4). Однако из рисунка видно, что алгоритм расчета в программе Visual MODFLOW не позволяет моделировать ненасыщенную фильтрацию, что отражается в «выключении» из расчетов ячеек, в которых происходит разрыв сплошности водной массы. Таким образом, моделирование в Visual MODFLOW не позволяет сделать достоверные выводы о положении уровня подземных вод в теле ВЗТ и, тем более, дать прогноз его развития при моделировании зон разуплотнения.

Отличительной особенностью программного пакета Slide является возможность учета переноса воды через ненасыщенную зону, в данном случае — ранее установленную непосредственно над выработками — 370 м.

Первоначально были произведены расчеты положения границы зоны ненасыщенной фильтрации в водозащитной толще при различных значениях в каждом из экспериментов; были заданы 6 разных коэффициентов фильтрации: 1, 5, 10, 50, 100, 1000 м/сут соответственно.

В ходе моделирования было обнаружено, что изменение положения контура зоны неполного водонасыщения над выработкой варьирует в пределах 2—5 м. Данное обстоятельство указывает на то, что изменение фильтрационных свойств горных пород над контуром горной выработки в диапазоне от 1 до 1000 м/сут не дает значимых изменений положения кровли зоны неполного водонасыщения над выработкой (рис. 5, 6).

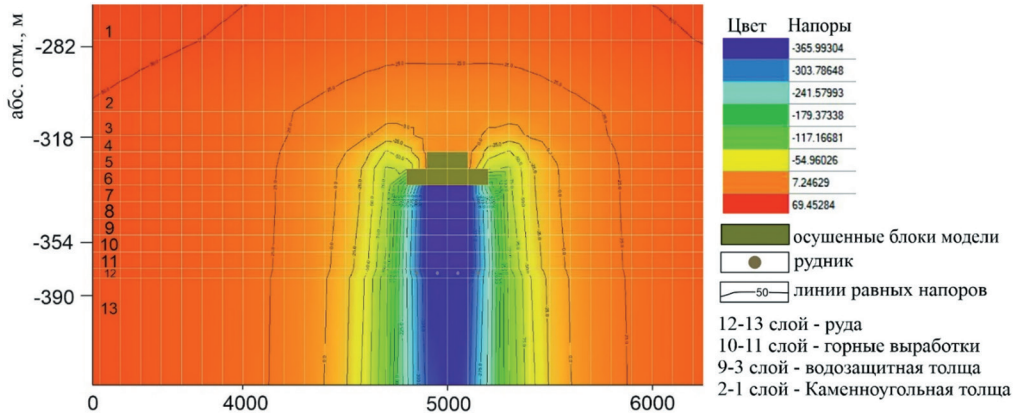


Рис. 4. Итоговый результат решения задачи в программном обеспечении Visual MOODFLOW Flex
Fig. 4. The final result of solving the problem in the Visual MOODFLOW Flex software

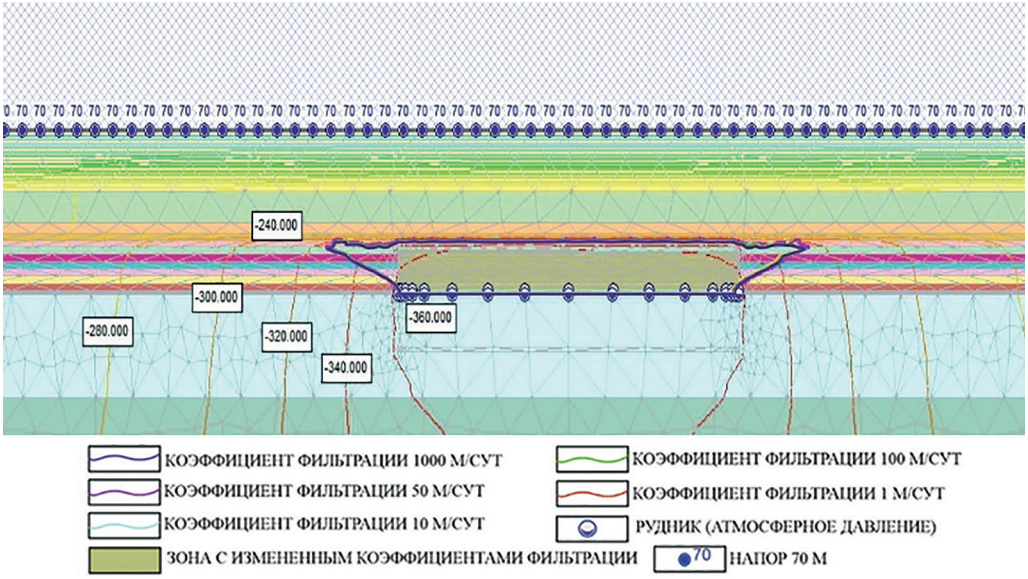


Рис. 5. Результаты эксперимента, в котором проводилось изменение коэффициента фильтрации в ВЗТ
Fig. 5. Results of the experiment in which change in coefficient of permeability of water-protective layer was carried out

Далее, при моделировании зон разуплотнения в теле ВЗТ и задании повышенных коэффициентов фильтрации в слоях ВЗТ 3, 4 и 5 по сравнению со слоями ВЗТ 6, 7, 8 в диапазоне от 10 до 106 м/сут были получены примерно те же результаты:

- при увеличении проницаемости водозащитной толщи происходит изменение положения контура зоны неполного водонасыщения не более чем на 6 м, что позволяет скорректировать методику полевых фильтрационных опробований с учетом возможной изменчивости напоров;

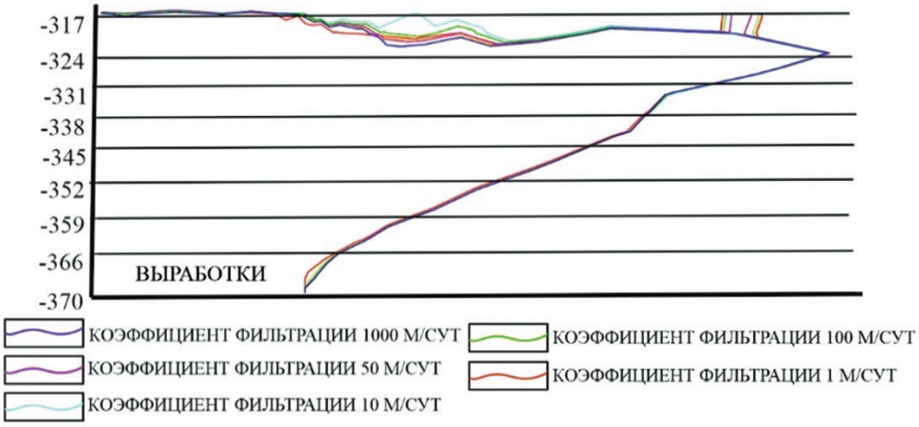


Рис. 6. Детальные результаты эксперимента (правая часть), в котором проводилось изменение коэффициента фильтрации в ВЗТ
Fig. 6. Detailed results of the experiment (right side), in which the change in the coefficient of permeability in the water-protective layer was carried out

• небольшие изменения положения контура зоны неполного водонасыщения над выработкой позволяют сделать вывод о том, что она является менее чувствительной к изменению фильтрационных параметров, следовательно, возможно достоверно предположить места опробований вне зависимости от значений коэффициента фильтрации.

При бурении восстающих скважин для проведения специальных гидрогеомеханических исследований необходимо обоснование их безопасной глубины для снижения риска прорывоопасности подземных вод [8]. Для решения данной задачи интересен опыт ранее проведенных исследований в рамках работы над диссертацией Екатерины Феллер, в которой произведен расчет прорывов подземных вод из нежнекаменноугольного водоносного горизонта в подземную горную выработку шириной в 13 м [6].

Расчет произведен по формуле В.А. Мироненко — В.М. Шестакова, которая хорошо реализуется в условиях, когда ширина одиночной выработки сопоставима или значительно меньше мощности целика, что во многом отвечает рассматриваемому случаю проведения опытов. Механика расчета основана на предпосылках о том, что деформации разрушения целика развиваются по типу поперечного сдвига. Такой подход хорошо применим для рыхлых и мягких связных пород, в отличие от пород, имеющих хрупкий характер разрушения с образованием трещин [9].

$$H_{пр} = \frac{m}{\gamma_в}\left(\gamma_{г.п} + \frac{2c}{b - tg\varphi * m\zeta}\right), \quad (1)$$

где m — мощность целика, м; $\gamma_{г.п}$ и $\gamma_в$ — удельный вес горной породы и воды соответственно Н/м^3; c и φ — параметры прочности целика, Па и градусы соответственно; ς — коэффициент бокового давления в толще пород; b — ширина одиночной выработки, м.

Из формулы также следует, что для корректного расчета необходимо соблюдение еще одного условия — неравенства $b > tg\varphi * m\varsigma$. В ином случае прорыв подземных вод в одиночную выработку невозможен.

Целесообразно использовать данный расчет для обоснования глубины бурения восстающих скважин под пневмоиспытания для обеспечения их устойчивости и минимизации риска прорыва подземных вод.

Физико-механические свойства пород целика из приведенных выше исследований следует использовать ввиду высокой степени обоснованности параметров, подкрепленными экспериментальными данными и научными исследованиями в области природы прочности и устойчивости БЖР и их изменений в результате воздействия техногенных и биогенных факторов.

Очевидно, что в ходе расчета следует ориентироваться на неблагоприятные условия бурения — в обводненных железных рудах, когда угол трения снижается с 23° до 8°, а сцепление соответствует средней величине в 150 000 Па. В данном состоянии руды имеют удельный вес 30 000 Н/м^3 при коэффициенте бокового давления ς = 0,67.

Учитывая ранее озвученные положения о текущем состоянии ведения горных работ на ЯР, существует вероятность бурения в наиболее опасных условиях — вторично обводненных БЖР, величина сцепления в которых может снижаться до 0,025 МПа, а угол внутреннего трения φ сохраняется равным 8°.

Результаты расчетов для неблагоприятных и наихудших условий бурения приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

Из графиков видно, что при бурении восстающих скважин диаметрами 112—96 мм до непосредственной близости к подошве нижнекаменноугольного водоносного горизонта (m = 0,1÷0,5м) суще-

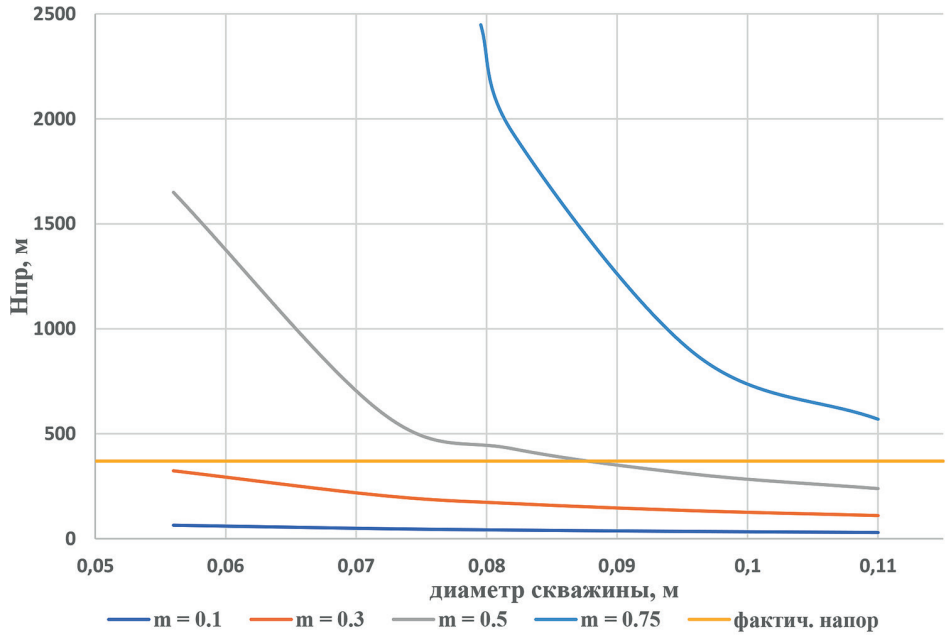


Рис. 7. Графики изменения величин предельных напоров при различных значениях параметров m и b для неблагоприятных условий

Fig. 7. Graphs of changes in the values of limiting pressures for various values of the parameters m and b for unfavorable conditions

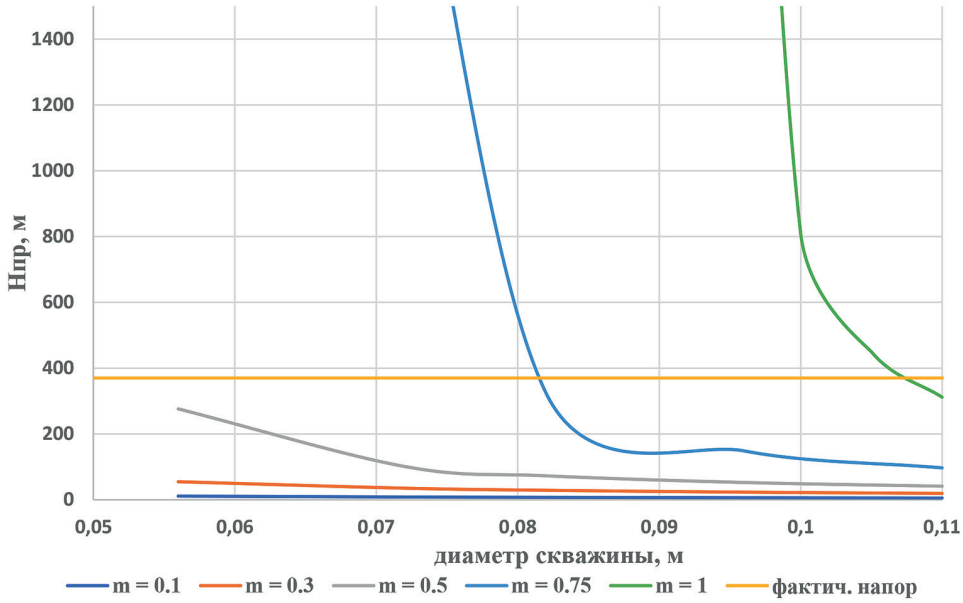


Рис. 8. Графики изменения величин предельных напоров при различных значениях параметров m и b для наихудших условий

Fig. 8.Graphs of changes in the values of limiting pressures for various values of the parameters m and b for the worst conditions

ствует большая вероятность прорыва подземных вод в ствол скважины, однако такая близость забоя к подошве горизонта является необязательной для планируемых опытов.

Из вышеприведенного следует, что обоснованно может быть установлено ограничение на остаточную мощность целика в интервале 1,5 — 2 м при бурении диаметрами 0,95 — 112 мм соответственно. Данное обстоятельство существенно снизит вероятность проявления подземных вод при бурении и проведении специальных гидрогеомеханических исследований в рамках текущего регламента.

Обсуждение

На основании полученных результатов можно сделать вывод о малой чувствительности контура зоны неполного водонасыщения над выработкой, что свидетельствует о его слабом отклике на колебания фильтрационных параметров и позволяет скорректировать методику проведения исследований.

Подытоживая полученные результаты, следует отметить, что они полностью удовлетворяют поставленной цели исследования, согласуются с теоретическими предпосылками положений механики горных пород и динамики подземных вод, процессов фильтрации и влагопереноса. Однако без геофильтрационного моделирования и аналитических расчетов сложно предположить условия и обосновать безопасные параметры проведения натурных исследований.

Данное обстоятельство указывает на необходимость аналогичных предварительных работ и на перспективы использования подобных подходов как для объектов горной промышленности, так и для создания инженерных сооружений в рамках градостроительного освоения подземного пространства в условиях непрекращающегося роста мегаполисов [10].

Выводы

На основании выполненных численных экспериментов выявлено оптимальное положение контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) в водозащитной толще. В частности, определен интервал глубин установки датчиков гидростатического давления в гидронаблюдательных скважинах: при проведении планируемых полевых исследований и расширении мониторинговой сети скважин следует располагать гирлянды датчиков в верхних слоях водозащитной толщи (ВЗТ 1-4), что составляет 1/5 всей ее мощности, но не менее чем в 1,5 м от подошвы нижнекаменноугольного горизонта. Такое положение КИА позволит проводить наблюдения в зоне полного водонасыщения при обоснованной минимизации риска прорыва подземных вод в восстающие скважины.

Следует отметить, что для проведения полевых опытов, как в простых, так и сложных (уникальных) условиях, необходим обоснованный и заранее спланированный подход, учет всех возможных факторов, которые могут послужить причиной аварий на производстве. Также заранее подготовленный и обоснованный эксперимент часто оказывается экономически и экологически оправданным [8, 11].

Применительно к уникальным условиям Яковлевского месторождения открытыми остаются вопросы количественной взаимосвязи водопритоков подземных вод к горным выработкам и степени и характера деформирования рудной потолочины.

Требует изучения механизм растворения, выносы карбонатного и хлоридного цемента из верхней части ВЗТ под действием перетекания подземных вод из нижнекаменноугольного горизонта, ввиду подготовительного характера этих процессов перед аварийной ситуацией [12]. Заслуживают внимания вопросы

постановки и проведения комплексного гидрогеомеханического мониторинга среды с привлечением современных технологий фиксации натурных данных, что открывает широкие горизонты для дальнейших исследований и уже имеет место в международной практике [13, 14]. Более того, подобного рода исследования имеют приложение не только при сооружении и строительстве горных выработок под неосушенными водоносными горизонтами, но и при освоении подземного пространства под водными объектами: морями, океанами [15, 16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Григорьев А. М.*, *Зотеев О. В.*, *Макаров А. Б.* Геомеханическое обоснование разработки Яковлевского месторождения под неосушенными водоносными горизонтами // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 4. — С. 27—37.

2. *Дашко Р. Э.*, *Феллер Е. Н.* Формирование и развитие горно-геологических процессов в зависимости от изменения инженерно-геологических и гидрогеологических условий на Яковлевском руднике // Записки Горного института. — 2012. — Т. 199. — С. 151—160.

3. *Протосеня А. Г.*, *Петров Д. Н.*, *Синякин К. Г.*, *Марьемьянов Г. А.* Натурные наблюдения за осадкой рудной потолочины при ведении горных работ на Яковлевском руднике // Записки Горного института. — 2011. — Т. 190. — С. 158—162.

4. *Малюхина Е. М.* Обоснование параметров геомеханических процессов развития техногенных водопроводящих трещин при разработке железорудных месторождений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПбГУ, 2020. — 21 с.

5. *Гусев В. Н.*, *Илюхин Д. А.*, *Алексенко А. Г.* Определение параметров зоны водопроводящих трещин через горизонтальные деформации подрабатываемой толщи // Записки Горного института. — 2013. — Т. 204. — С. 69—73.

6. *Феллер Е. Н.* Прогнозирование изменения инженерно-геологических условий при ведении очистных работ на Яковлевском руднике (Яковлевское месторождение богатых железных руд, КМА): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — СПб.: СПбГУ, 2014. — 25 с.

7. *Дроздов А. В.*, *Крамсков Н. П.*, *Гензель Г. Н.* Особенности гидрогеомеханического мониторинга под водными объектами на алмазных месторождениях Западной Якутии // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2011. — № 1(48). — С. 72—79.

8. *Стась Г. В.*, *Смирнова Е. В.*, *Перелыгин И. А.*, *Перелыгина Я. А.* Системный подход к оценке риска аварий при восстановлении Подмосковного угольного бассейна // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2016. — № 1. — С. 71—80.

9. *Staat M.* An extension strain type Mohr-Coulomb criterion // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, vol. 54, pp. 6207—6233. DOI: 10.1007/s00603-021-02608-7.

10. *Куликова А. С.* К вопросу об эколого-экономической оценке инновационных решений при использовании подземного пространства под водными объектами // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 8. — С. 279—286.

11. *Kong W. K.* Water ingress assessment for rock tunnels: A tool for risk planning // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2011, vol. 44, pp. 755—765. DOI: 10.1007/s00603-011-0163-4.

12. *Davidson S., Baker P.* A levee breach induced by internal erosion in Western Australia // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2021, vol. 55, no. 2. DOI: 10.1144/qjegh2021-037.

13. *Schweizer D., Acworth R. I., Andersen M. S., Blum P., Carrara E., Rasmussen T. C., Ge S.* Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice // Hydrogeology Journal. 2020, vol. 28, no. 8, pp. 2963—2969. DOI: 10.1007/s10040-020-02242-7.

14. *Zhimin Xu, Yajun Sun, Shang Gao, Xianming Zhao, Ruiqi Duan, Minghao Yao, Qin Liu*. 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 Environ. 2018, vol. 37, pp. 385—392. DOI: 10.1007/s10230-018-0512-6.

15. *Нисковский Ю. Н.* Исследование и выбор экологически допустимых технологий добычи полезных ископаемых под морским дном // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 1995. — № 3. — С. 56—58.

16. *Sudarikov S., Petrov V., Narkevsky E., Dobretsova I.* In-situ study methods used in the discovery of sites of modern hydrothermal ore formation on the mid-atlantic ridge // Minerals. 2020, vol. 12, no. 10, article 1219. DOI: 10.3390/min12101219. ГИАБ

REFERENCES

1. Grigor'ev A. M., Zoteev O. V., Makarov A. B. Geomechanical substantiation of the development of the Yakovlevskoye field under non-drained aquifers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 4, pp. 27—37. [In Russ].

2. Dashko R. E., Feller E. N. Formation and development of mining and geological processes depending on changes in engineering-geological and hydro-geological conditions at the Yakovlevsky mine. *Journal of Mining Institute*. 2012, no. 199, pp. 151—160. [In Russ].

3. rotosenya A. G., Petrov D. N., Sinyakin K. G., Mar'em'yanov G. A. Field observations of the settlement of the ore ceiling during mining operations at the Yakovlevsky mine. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 190, pp. 158—162. [In Russ].

4. Malyukhina E. M. *Obosnovanie parametrov geomekhanicheskikh protsessov razvitiya tekhnogennykh vodoprovodyashchikh treshchin pri razrabotke zhelezorudnykh mestorozhdeniy* [Substantiation of the parameters of geomechanical processes of development of technogenic water-conducting cracks in the development of iron ore deposits], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2020, 21 p.

5. Gusev V. N., Ilyuhin D. A., Aleksenko A. G. Determination of the parameters of the zone of water-conducting cracks through horizontal deformations of the undermined stratum. *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 204, pp. 69—73. [In Russ].

6. Feller E. N. *Prognozirovanie izmeneniya inzhenerno-geologicheskikh usloviy pri vedenii ochistnykh rabot na Yakovlevskom rudnike (Yakovlevskoe mestorozhdenie bogatykh zheleznykh rud, KMA)* [Forecasting changes in engineering geological conditions in the course of mining operations at the Yakovlevskoye mine (Yakovlevskoye rich iron ore deposit, KMA)], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2014, 25 p.

7. Drozdov A. V., Kramskov N. P., Genzel G. N. Features of hydrogeomechanical monitoring under water bodies in the diamond deposits of Western Yakutia. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011, no. 1(48), pp. 72—79. [In Russ].

8. Stas' G. V., Smirnova E. V., Perelygin I. A., Perelygina Ya. A. A systematic approach to assessing the risk of accidents during the restoration of the Moscow region coal basin. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2016, no. 1, pp. 71—80. [In Russ].

9. Staat M. An extension strain type Mohr-Coulomb criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, pp. 6207—6233. DOI: 10.1007/s00603-021-02608-7.

10. Kulikova A. S. On the issue of environmental and economic assessment of innovative solutions when using underground space under water bodies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 8, pp. 279—286. [In Russ].

11. Kong W. K. Water ingress assessment for rock tunnels: A tool for risk planning. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2011, vol. 44, pp. 755—765. DOI: 10.1007/s00603-011-0163-4.

12. Davidson S., Baker P. A levee breach induced by internal erosion in Western Australia. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2021, vol. 55, no. 2. DOI: 10.1144/qjegh2021-037.

13. Schweizer D., Acworth R. I., Andersen M. S., Blum P., Carrara E., Rasmussen T. C., Ge S. Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice. *Hydrogeology Journal*. 2020, vol. 28, no. 8, pp. 2963 — 2969. DOI: 10.1007/s10040-020-02242-7.

14. Zhimin Xu, Yajun Sun, Shang Gao, Xianming Zhao, Ruiqi Duan, Minghao Yao, Qin Liu. 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 Environ*. 2018, vol. 37, pp. 385 — 392. DOI: 10.1007/s10230-018-0512-6.

15. Нисковский Ю. Н. Исследование и выбор экологически допустимых технологий добычи полезных ископаемых под морским дном. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 1995, no. 3, pp. 56 — 58. [In Russ].

16. Sudarikov S., Petrov V., Narkevsky E., Dobretsova I. In-situ study methods used in the discovery of sites of modern hydrothermal ore formation on the mid-atlantic ridge. *Minerals*. 2020, vol. 12, no. 10, article 1219. DOI: 10.3390/min12101219.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Котлов Сергей Николаевич[1] — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, e-mail: sergei_k@spmi.ru,
Целищев Николай Анатольевич[1] — аспирант,
e-mail: s205006@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7737-9686,
Горло Мария Андреевна[1] — студент,
e-mail: s171506@stud.spmi.ru,
[1] Санкт-Петербургский Горный университет.
Для контактов: Горло М.А., e-mail: orlovamaria17@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.N. Kotlov[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Assistant Professor, e-mail: sergei_k@spmi.ru,
N.A. Tselischev[1], Graduate Student,
e-mail: s205006@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7737-9686,
M.A. Gorlo[1], Student,
e-mail: s171506@stud.spmi.ru,
[1] Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: M.A. Gorlo, e-mail: orlovamaria17@mail.ru.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 13.04.2023; принята к печати 10.05.2023.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 13.04.2023; accepted for printing 10.05.2023.