

# Основные направления цифровизации гидрогеологических процессов на Михайловском ГОКе им. А.В. Варичева

В.Н. Квачев<sup>1,2</sup>, Е.В. Леонтьева<sup>1,2</sup>, В.В. Хаустов<sup>1</sup>, А.В. Козуб<sup>3</sup>, В.В. Кушнерчук<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Белнедра», г. Белгород, Российская Федерация

<sup>3</sup> АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», г. Железнодорожск, Российская Федерация

✉V\_Kushnerchuk@mgok.ru

**Резюме:** В настоящее время цифровизация горнорудной промышленности стала трендом развития горнорудного производства на ближайшее будущее. В статье предложены наиболее актуальные направления цифровизации гидрогеологических процессов для Михайловского ГОКа исходя из концепции цифровизации горной промышленности, состава основных гидрогеологических процессов, имеющих развитие при добыче и обогащении полезных ископаемых, современного международного опыта защиты горных выработок от воды и моделирования, достижений в геоинформатике, автоматизации гидрогеологических работ, существующей системы мониторинга. Для Михайловского ГОКа наиболее целесообразными являются создание системы оперативного мониторинга на надкелловейский и подкелловейский водоносные комплексы и постоянно действующих гидрогеологических 3D региональных моделей, моделей масштаба отвального хозяйства и карьера с моделированием в них процессов фильтрации, распределения порового давления, градиентов потока и переноса загрязняющих веществ в зоне влияния горного производства. Сделаны выводы, что необходимы реструктуризация и развитие существующей системы мониторинга гидрогеологических процессов. При внедрении данной системы необходимо организовать обучение, переподготовку специалистов гидрогеологов, операторов диспетчерских систем навыкам работы с технологиями цифровизации гидрогеологических процессов в соответствии с требованиями Индустрии 4.0.

**Ключевые слова:** цифровизация горнорудной промышленности, гидрогеологические процессы, геоинформационные технологии, поровое давление, гидравлический градиент, модели масштаба карьера, борта карьера, оперативный мониторинг, горное производство, дренажные устройства, водопритоки, концептуальные и численные модели месторождений полезных ископаемых

**Для цитирования:** Квачев В.Н., Леонтьева Е.В., Хаустов В.В., Козуб А.В., Кушнерчук В.В. Основные направления цифровизации гидрогеологических процессов на Михайловском ГОКе им. А.В. Варичева. *Горная промышленность*. 2020;(3):91–97. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-3-91-97.

## Main Trends in Digitalization of Hydrogeological Processes at Andrei Varichev Mikhailovsky GOK

V.N. Kvachev<sup>1,2</sup>, E.V. Leontieva<sup>1,2</sup>, V.V. Khaustov<sup>1</sup>, A.V. Kozub<sup>3</sup>, V.V. Kushnerchuk<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation

<sup>2</sup> Belnedra LLC, Belgorod, Russian Federation

<sup>3</sup> Andrei Varichev Mikhailovsky GOK, Zheleznogorsk, Russian Federation

✉V\_Kushnerchuk@mgok.ru

**Abstract:** Digitalization of mining operations is a current trend in development of mining companies in the near future. The paper proposes the most relevant directions for digitalization of hydrogeological processes at Mikhailovsky GOK based on the concept of mining industry digitalization, structure of the main hydrogeological processes that have developed in mining and processing of minerals, current international expertise in water protection of mine workings and modeling, advances in geoinformatics, automation of hydrogeological work, as well as the existing monitoring system. For conditions of the Mikhailovsky Mining and Processing Integrated Works (GOK), the most expedient is the creation of an on-line monitoring system for the Nadkelloweyskiy and Podkelloweyskiy aquifer systems as well as development of permanent regional hydrogeological 3D models, dump and open-pit scale models with modeling of filtration processes, pore pressure distribution, flow gradients and transfer of pollutants in the impact zone of mining production. Conclusion is made that existing monitoring system of hydrogeological processes needs restructuring and further development. Implementation of this system requires training and retraining of hydrogeologists and operators of the control systems to work with technologies for digitalization of hydrogeological processes in accordance with Industry 4.0 requirements.

**Keywords:** digitalization of mining industry, hydrogeological processes, geoinformation technologies, pore pressure, pressure gradient, open-pit scale models, pit walls, operational monitoring, mining operations, drainage equipment, water inflows, conceptual and numerical models of mineral deposits

**For citation:** Kvachev V.N., Leontieva E.V., Khaustov V.V., Kozub A.V., Kushnerchuk V.V. Main Trends in Digitalization of Hydrogeological Processes at Andrei Varichev Mikhailovsky GOK. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2020;(3):91–97. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2020-3-91-97.



**Квачев Василий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела, Белгородский государственный национальный исследовательский университет; генеральный директор, ООО «Белнедра»



**Леонтьева Елена Васильевна** – кандидат географических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела, Белгородский государственный национальный исследовательский университет; ведущий специалист ООО «Белнедра»



**Хаустов Владимир Васильевич** – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии и горного дела, Белгородский государственный национальный исследовательский университет



**Козуб Александр Васильевич** – кандидат технических наук, главный инженер, АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева»



**Кушнерчук Вячеслав Викторович** – начальник Дренажной шахты, АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева»

## Введение

Терминология цифровизации промышленности зародилась в Германии и связана с понятием 4-й промышленной революции – «Индустрия 4.0», предусматривающей сквозную цифровизацию всех физических процессов и их интеграцию в цифровую систему управления производства вместе со всеми элементами, участвующими в цепочке создания стоимости [1]. В развитие этого в России в 2018 г. была разработана и принята национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации»<sup>1</sup>.

По мнению германских исследователей, наибольшее влияние цифровизации в горнодобывающей промышленности на стоимость конечной продукции следует ожидать в следующих пяти областях формирования значимой стоимости:

- детальное понимание базы ресурсов;
- оптимизация расходов на материалы и оборудование;
- совершенствование прогнозирования сбоев в работе оборудования;
- повышение механизации за счет автоматизации;
- мониторинг производительности в реальном времени и сопоставление его с планом.

При этом программно-техническое обеспечение рудника должно обеспечивать:

- киберзащиту;
- глобальное геокартирование;
- геоинформационные платформы для совместной работы различных подразделений горной промышленности;
- автономные децентрализованные системы по направлениям деятельности;
- виртуальную эксплуатацию рудника;
- искусственный интеллект;
- интегрирование горнотехнических мероприятий;
- диагностическое обслуживание [1].

Тема цифровизации горного производства нашла отражение и у российских горнопромышленников. Программа

международного форума «Цифровизация в горной промышленности. Индустрия 4.0», проведенного Техническим университетом УГМК в конце октября 2019 г., включала следующие основные вопросы:

1. Что дает цифровизация?
2. Эффекты от внедрения цифровизации на горно-металлургических предприятиях России. Итоги аналитического исследования.

3. Преимущества и недостатки цифровизации<sup>2</sup>. Данный вопрос на правительственном уровне в 2019 г. рассматривали угледобывающие предприятия.

Таким образом, цифровизация горнорудной промышленности стала трендом развития горнорудного производства на ближайшее будущее.

Наличие воды в порах любого грунта создает потенциальные возможности к образованию порового давления, но время его существования будет различным в зависимости от проницаемости грунта. На практике при рассмотрении работы сооружения под действием статических сил поровое давление имеет смысл определять только в глинистых грунтах (супесь, суглинки, глина). В песчаных и более крупнозернистых грунтах его не определяют, так как оно быстро уменьшается (рассеивается) за счет высокой водопроницаемости этих грунтов.

Начало разработки месторождения и добыча полезных ископаемых с их обогащением в условиях обводненности карьерного поля сопровождаются рядом гидрогеологических процессов.

Разберем два из них:

1) *изменение порового давления, напорных градиентов* на участках разгрузки подземных вод в бортах карьеров, кровле и подошве подземных горных выработок, в зоне влияния дренажных устройств. По мере увеличения выемки вскрышных пород поровое давление распределяется в прибортовом массиве грунтов и напорные градиенты стабильно снижаются;

<sup>1</sup> Международный форум «Цифровизация в горной промышленности. Индустрия 4.0». Режим доступа: <https://www.croc.ru/action/detail/84187/>

<sup>2</sup> Международный форум «Цифровизация в горной промышленности». Режим доступа: <https://www.digital4.ru/>

2) изменение природного качественного состава подземных вод в зоне ведения горных работ, хвостохранилищ, подземных горных работ, буровзрывных работ и других производств.

Процессы существенного понижения порового давления и напорных градиентов связаны с затратами, обеспечивающими безопасность производственных процессов, поддержание высокой производительности горных работ и возмещения ущерба окружающей среде, по оценке органов госконтроля.

### Предыстория и обзор современных технологий

Основные направления развития отечественных технологий по защите горных работ от обводнения были определены прежде всего особенностями освоения железорудных месторождений Курской магнитной аномалии, Северного Казахстана, Украины, бокситовых месторождений Урала, угольных месторождений Подмосковья и др., находящихся в сложных гидрогеологических условиях, где водовмещающие породы в районах месторождений характеризовались значениями коэффициентов фильтрации  $> 10-6$  м/с [2–5]. Защита горных выработок от обводнения была направлена на опережающие горные работы по понижению уровня подземных вод, защите карьерных и шахтных полей от водопритоков извне с использованием поверхностных, подземных, комбинированных систем осушения. Дренажные устройства главным образом были представлены водопонижающими скважинами, сквозными фильтрами, восстающими, горизонтальными скважинами, забивными фильтрами, горизонтальными дренами. Применялись также различного рода противofильтрационные завесы.

Система мониторинга подземных вод горнодобывающих предприятий в советский период была ориентирована на эпизодический режим его ведения, предусматривающий осуществление замеров, обследований с периодичностью 1–3 раза в месяц [6]. При этом наблюдательная сеть обычно располагается за контуром карьеров и нацелена на контроль порового давления, определение горизонтальных градиентов потока подземных вод и не всегда позволяет выявить участки концентрации повышенного порового давления и вертикального градиента, влияющие на устойчивость бортов карьеров и безопасность ведения горных работ в целом, а также содержание и эксплуатацию подземных горных выработок. Система мониторинга геологической среды на Михайловском ГОКе (МГОК) ориентирована на контроль режимов уровня и химического состава подземных вод.

В зоне ведения горных работ МГОКа выделяются два – надкелловейский и подкелловейский – водоносных комплекса, разделенных водоупорным келловейским терригенным горизонтом.

Водоносные горизонты надкелловейского водоносного комплекса кайнозойского возраста имеют практически повсеместное распространение и представлены в долинах рек аллювиальными горизонтами пойменных и надпойменных террас, а на водоразделах – водоносным горизонтом в покровных образованиях суглинков. Водоносные горизонты мезозойского комплекса преимущественно безнапорные, редко – с небольшим напором. Все водоносные горизонты в меловых и четвертичных отложениях находятся в зоне активного водообмена и составляют единый водоносный комплекс – надкелловейский.

Питание водоносных горизонтов мезокайнозойского

возраста происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и фильтрации из поверхностных водотоков и водохранилищ. Современная гидрографическая сеть оказывает дренирующее влияние на все водоносные горизонты комплекса и определяет форму потока подземных вод в сторону речных долин при его общем южном направлении. Вследствие разработки карьера на несколько сотен метров от него надкелловейский водоносный комплекс оказался практически осушенным, и появление в нём небольшой обводнённости носит периодический сезонный характер, связанный с фильтрацией осадков.

Водоупорный келловейский терригенный горизонт распространён на описываемой территории повсеместно. Он образует мощную, достаточно выдержанную водоупорную толщу глинистых пород, изолирующую мезозойско-кайнозойские водоносные горизонты от нижележащих юрско-девонских.

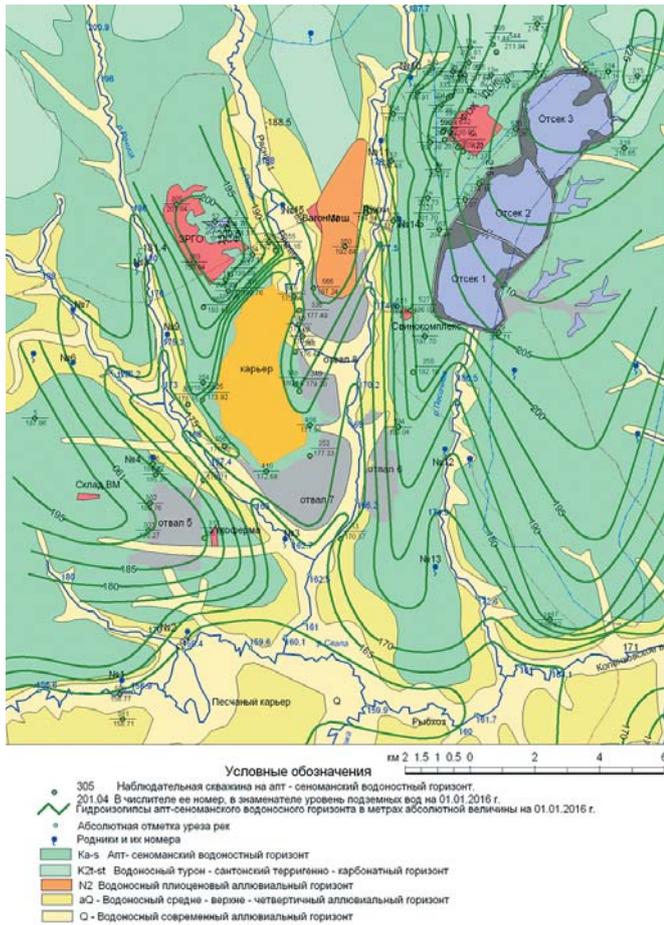
Подкелловейский водоносный комплекс в соответствии с условиями разгрузки и питания водоносных горизонтов и с учетом распространения основных водоупорных толщ в районе условно разделяется на две зоны. Верхняя зона включает отложения батского яруса юры и водоносных горизонтов франского яруса девона и образует единый девонско-юрский водоносный горизонт. Она характеризуется затрудненным водообменом, питание ее происходит на северо-востоке района в долине р. Оки и за счет перетекания из вышележащих горизонтов.

Нижняя зона замедленного водообмена охватывает отложения ряжского и мосоловского водоносных горизонтов среднего девона и архей-протерозойскую водоносную зону, образуя среднедевонско-докембрийский водоносный комплекс. Верхняя зона отделена от нижней мощной толщей (40–100 м) слабопроницаемых терригенных отложений среднего девона.

Между водоносными горизонтами нижнего подкелловейского водоносного комплекса существует гидравлическая связь, обусловленная наличием непосредственного контакта батских песков и девонских водоносных слоев с трещиноватой зоной железистых кварцитов и богатых руд.

В результате проведения геолого-маркшейдерской службой МГОКа систематических работ по проекту «Ведение мониторинга геологической среды Михайловского горнопромышленного района КМА», целевым назначением которых является: оперативное и достоверное информационное обеспечение органов управления фондом недр о проявлениях негативных геологических процессов, вредном влиянии горных работ и других видов хозяйственной деятельности на окружающую среду для обоснования мероприятий по предотвращению или ослаблению их последствий, рациональному использованию и охране геологической среды, – установлено следующее.

Ведение горных работ привело к нарушению гидродинамических режимов всех водоносных комплексов и стока поверхностных вод. В результате осуществления природоохранных мероприятий, в частности, строительства в верховьях рек многочисленных дамб, режим надкелловейского водоносного горизонта был стабилизирован, а уровни в водоносных горизонтах восстановились (рис. 1). Эксплуатация водоносных горизонтов подкелловейского водоносного комплекса привела к образованию региональной депрессионной воронки, снижению уровней воды на расстоянии 40–105 км (рис. 2, 3), рассеиванию порового давления воды ниже имеющих влияние на устойчивость грунтов значений в прибортовом массиве карьера

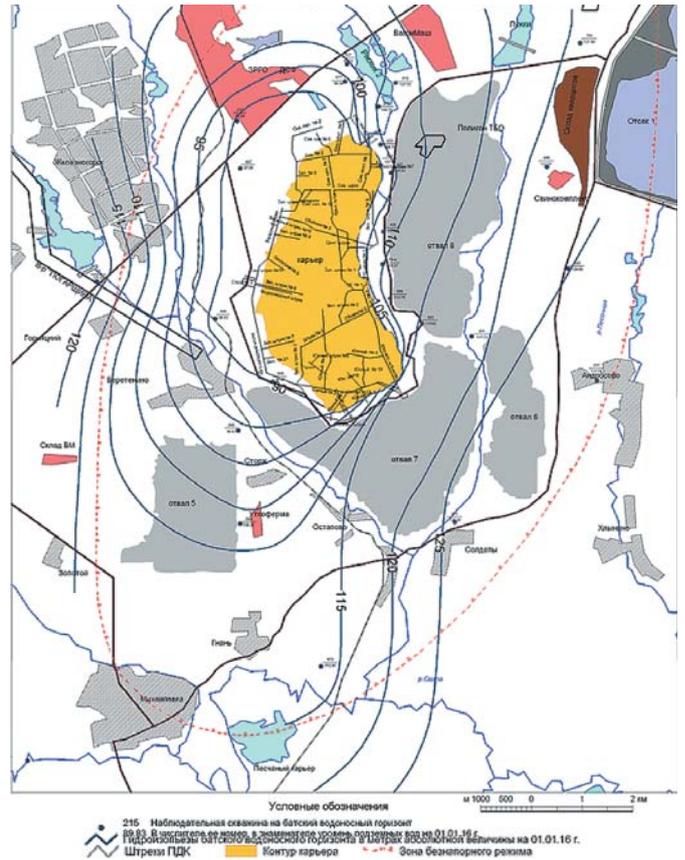


**Рис. 1**  
Карта-схема гидроизогипс апт-сеноманского водоносного горизонта по состоянию на 01.01.2016 г.

**Fig. 1**  
Schematic map of groundwater contours of Aptian-Cenomanian aquifer as of 01.01.2016

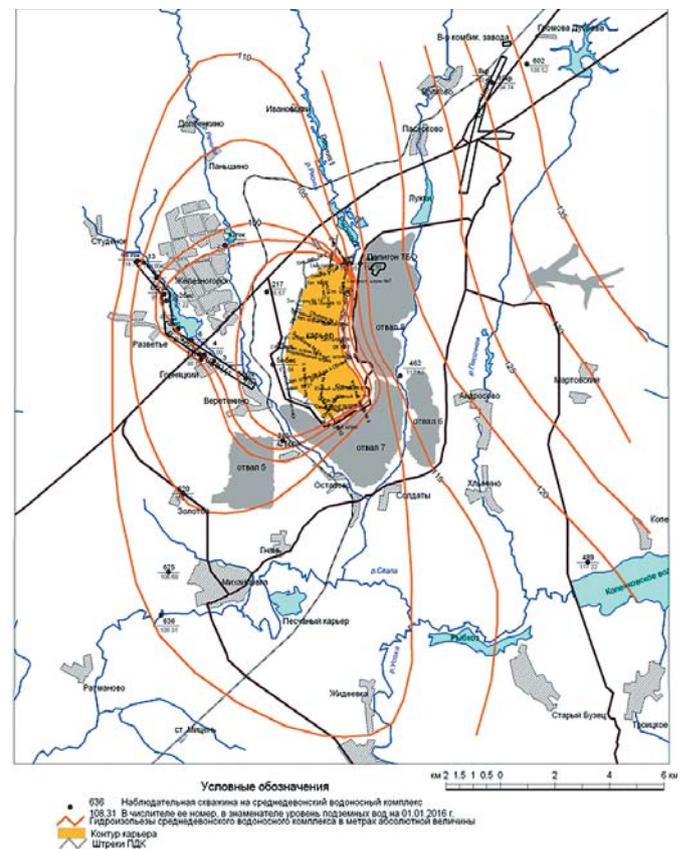
и к исчезновению напорных градиентов. Последние исследования порового давления проводились в 2018 г. на юго-восточном борте карьера, вдоль строящейся трассы крутонаклонного конвейера. Целью исследований являлось установление значений порового давления в грунтах, способных оказывать влияние на устойчивость вмещающего массива пород. По профилю были отбурены скважины, в которые устанавливались датчики порового давления в пределах горизонтов надкелловейского и подкелловейского водоносного комплекса, включая водоупоры. По результатам проведенных исследований было установлено, что значения порового давления в водоносных горизонтах прибортового массива ничтожны на протяжении нескольких сотен метров от карьера, колеблются при сезонном воздействии инфильтрации осадков через откосовый срез массива и не могут оказывать влияния на устойчивость всего борта в целом. Значения порового давления в водоупорах водоносных комплексов также ничтожны, статичны и из-за высокой плотности слагающих их глин не подвержены каким-либо внешним воздействиям и не оказывают влияния на устойчивость прибортового массива. Учитывая площадное и повсеместное распространение исследуемых водоносных комплексов по территории всего месторождения, аналогичные результаты будут получены в любой точке прибортового массива.

К сожалению, последнее обобщение отечественного опыта защиты горных работ от воды датируется 1984 г. [5], поэтому в период развития «Индустрии 4.0» российским



**Рис. 2**  
Карта-схема гидроизопьез батского водоносного горизонта по состоянию на 01.01.2016 г.

**Fig. 2**  
Schematic map of piezometric contours of Bathonian aquifer as of 01.01.2016



**Рис. 3**  
Карта-схема гидроизопьез среднедевонского водоносного комплекса по состоянию на 01.01.2016 г.

**Fig. 3**  
Schematic map of piezometric contours of Middle Devonian aquifer system as of 01.01.2016

горнопромышленникам в большей мере приходится ориентироваться на зарубежный опыт.

Последние достижения в области защиты горных работ от обводнения обобщены в рамках международного проекта «Большой карьер» LOP, работы и исследования по которому проведены в период с 2005 по 2018 г. По материалам исследований вышли три руководства, два из которых – по технологии проектирования устойчивости обводненных бортов карьеров в устойчивых и неустойчивых породах и одно – по оценке влияния обводнения на устойчивость бортов карьеров [7–9].

При этом целесообразно выделить следующие аспекты проекта «Большой карьер» LOP:

1. Планирование ведения горных работ нацелено на минимизацию их воздействия на окружающую среду в плане снижения уровней и загрязнения подземных вод, уменьшения объема вскрышных работ, следовательно, сокращение площадей земель, находящихся под отвалами пород, хвостохранилищами. Обязательным элементом в процессе проектирования и эксплуатации карьеров является оценка неопределенности данных и рисков.

2. Обобщение опыта и проведение исследований осуществлены для месторождений полезных ископаемых, гидрогеологические условия которых характеризовались коэффициентом фильтрации водовмещающих пород преимущественно <math>10-6</math> м/с, т.е., как и для Михайловского ГОКа, не стоял остро вопрос защиты контуров карьеров и шахтных полей от водопритоков извне, снятия порового давления воды на десятки метров за пределами площадей ведения горных работ. Защита от обводнения решалась либо пассивными способами – за счет естественного дренажа по существующим и сформировавшимся в процессе буровзрывных работ системам трещин с последующим карьерным (шахтным) водоотливом, либо использовались активные способы снятия порового давления – путем использования вертикальных, горизонтальных, наклонных дренажных устройств и выработок, работающих самотеком, откачивающих подземные воды насосами, эрлифтами в пределах контура карьера, если темпы снижения уровня подземных вод не обеспечивали должной степени безопасности из-за неустойчивости бортов карьеров и запланированной производительности ведения горных работ.

3. Методология исследований устойчивости бортов карьера и отвалов базировалась на том, что взаимосвязь между сдвиговой прочностью породы или грунтового массива и поровым давлением подземных вод выражается с помощью сочетания закона/критерия разрушения Мора-Кулона и концепции эффективного напряжения, разработанной Терцаги:

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi + c, \quad (1)$$

где  $\tau$  – сдвиговая прочность по потенциальной поверхности разрушения;  $u$  – поровое давление подземных вод;  $\sigma$  – общее нормальное напряжение, действующее перпендикулярно потенциальной поверхности разрушения;  $\phi$  – угол внутреннего трения;  $c$  – сцепление по потенциальной поверхности разрушения.

4. Мониторинг фактического распределения порового давления, градиентов подземных вод по вертикали оценивается по внутрикарьерным профилям, выходящим в область питания подземных вод (рис. 4). Следует отметить, что современный уровень развития средств контроля за состоянием подземных вод позволяет в автоматическом режиме с частотой от несколько секунд до года считывать показатели порового давления, температуры, минерали-

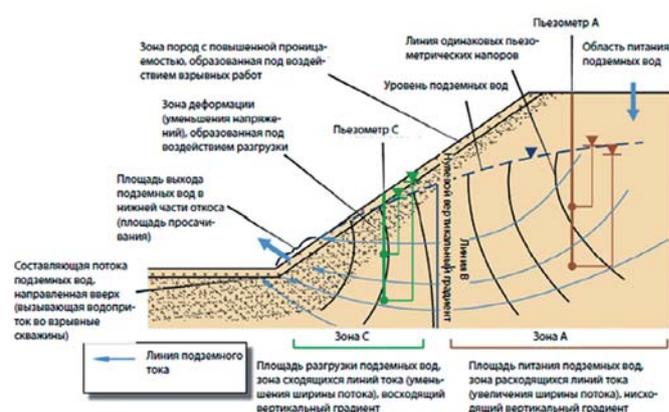


Рис. 4  
Схема размещения пьезометров для определения вертикальных градиентов [5]

Fig. 4  
Piezometer layout for vertical gradient measurements [5]

зации подземных вод, дебита дренажных устройств, производительности водоотлива, переводить их в цифры и по радиоканалам передавать на станцию мониторинга.

Оценка области развития значений порового давления, градиентов потока в пространстве и прогноз их изменения осуществляются на 2D, 3D компьютерных моделях фильтрации подземных вод регионального уровня, уровня карьера и участков борта карьера и отвалов, которые интегрируются в геомеханическую модель.

При этом также учитывается изменение проницаемости водовмещающих пород за счет консолидации массива.

Процессы моделирования фильтрации, распределения порового давления и передвижения загрязняющих веществ наиболее сложные, когда природная модель месторождения полезных ископаемых представлена несогласно залегающими водоносными системами, из которых одна представлена поровым типом вод, а другая трещинными водами с неоднородно развитой трещиноватостью. Это характерно для месторождений, рудовмещающая толща которых перекрыта обводненными и слабопроницаемыми осадочными отложениями или когда такие условия создаются в теле отвалов смешанного типа. Распределение порового давления подземных вод в сплошной пористой среде в таких случаях обычно представляют в виде компьютерных численных моделей конечных разностей, конечных элементов, а в отдельных видах трещинного массива – виде моделей с фильтрацией по трещинам (модель сети дискретных трещин – Discrete fracture network, DFN) [7; 10–17]. Последняя в явном виде отражает пространственное распределение в породном массиве разломов и трещин.

#### Возможные направления цифровизации гидрогеологических процессов на Михайловском ГОКе

Исходя из концепции цифровизации горной промышленности, состава основных гидрогеологических процессов, имеющих развитие при добыче и обогащении полезных ископаемых, современного международного опыта защиты горных выработок от воды и моделирования, достижений в геоинформатике, автоматизации гидрогеологических работ, фактического состояния развития депрессионной кривой в водоносных горизонтах (см. рис. 1–3) для МГОКа наиболее целесообразными являются следующие основные направления цифровизации гидрогеологических процессов:

1) создание системы *оперативного мониторинга* на надкелловейский и подкелловейский водоносные комплексы, позволяющей в  $x, y, z, t$  координатах в режиме реального времени отображать состояния воды в точке, на площади контроля, включающего поровое давление, температуру, минерализацию, дебит дренажных, водозаборных устройств, производительность насосного оборудования шахтного и карьерного водоотлива, водопроявлений в бортах карьера, подземных горных выработках, в зоне влияния горного производства. Кроме того, целесообразно производить подобный мониторинг на отвальных площадях, где образуется техногенный водоносный горизонт с имеющими влияние на устойчивость отвалов значениями порового давления воды;

2) создание постоянно действующих гидрогеологических 3D региональных моделей, моделей масштаба отвального хозяйства и карьера с моделированием в них процессов фильтрации, распределения порового давления, градиентов потока и переноса загрязняющих веществ в зоне влияния горного производства.

**Цель оперативного мониторинга** – предоставлять точечную информацию во внутрисуточном разрезе о формировании порового давления, вертикальных градиентах в бортах карьера и отвальном массиве, производительности шахтного, карьерного водоотлива.

**Назначение** – информационное обеспечение процедуры оценки эффективности работы дренажных устройств, выявления на ранних стадиях формирования опасных процессов деформации бортов карьеров, массивов отвалов.

Цель постоянно действующих гидрогеологических моделей – на основе точечных данных оперативного, эпизодического мониторинга формирование целостного 3D представления о формировании результатов взаимных воздействий добычных работ и окружающей среды.

Назначение – информационное обеспечение оценки масштабов развития и прогнозирования гидрогеологических, инженерно-геологических процессов и явлений, которые могут привести к удорожанию выпускаемой продукции.

## Выводы

1. Для получения эффекта от технологий цифровизации гидрогеологических процессов в плане увеличения безопасности ведения горных работ, снижения затрат на предотвращение, снижение степени воздействия негативных гидрогеологических и других процессов и явлений, связанных с обводнением горных выработок, подтоплением объектов горного производства, необходимы реструктуризация и развитие существующей системы мониторинга гидрогеологических процессов.

2. Развитие системы мониторинга гидрогеологических процессов необходимо ориентировать на решение следующих вопросов:

- следует эпизодический режим ведения мониторинга, предусматривающий проведение замеров, обследований с периодичностью 1–3 раза в месяц, дополнить оперативным внутрисуточным мониторингом в режиме реального времени;

- действующие системы мониторинга дополнить станциями мониторинга в бортах карьера и подземных горных выработках, на отвалах с обоснованием достоверности получения 3D данных изменения порового давления и напорных градиентов;

- данные оперативного мониторинга следует в режиме реального времени визуализировать на мониторах, анализировать направленность, динамику развития процессов и сигнализировать оператору при выходе за границы доверительных интервалов;

- масштабы развития гидрогеологических процессов, распределения порового давления, пространственных градиентов потока, их количественные характеристики оценивать и прогнозировать их изменения на постоянно действующих динамических компьютерных 3D моделях.

3. При внедрении данной системы необходимо организовать обучение, переподготовку специалистов гидрогеологов, операторов диспетчерских систем навыкам работы с технологиями цифровизации гидрогеологических процессов в соответствии с требованиями Индустрии 4.0.

## Список литературы

1. Веди́г М. *Цифровизация в горнодобывающей промышленности*. Режим доступа: <http://www.good-climate.com/materials/files/152.pdf>
2. Абрамов С.К., Скиргелло О.Б., Чельцов М.И. *Осушение шахтных полей и карьеров угольных месторождений*. М.: Госгортехиздат; 1961.
3. Оксанич И.Ф., Береснев В.С., Гордон А.Б. и др. *Осушение месторождений при строительстве железорудных предприятий*. М.: Недра; 1977.
4. Штро́дка К., Фи́шер М., Доман Х. и др. *Гидротехника в горном деле и строительстве*. М.: Недра; 1978.
5. Станченко И.К. (ред.) *Справочник по осушению горных пород*. М.: Недра; 1984.
6. Норватов Ю.А. *Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод*. Л.: Недра; 1988.
7. Read J., Stacey P. *Guidelines for open pit slope design*. CRC Press; 2009. DOI: 10.1071/9780643101104.
8. Read J., Beale G. *Guidelines for Evaluating Water in Pit Slope Stability*. CSIRO PUBLISHING; 2013.
9. Martin D., Stacey P. *Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*. CRC Press; 2018. Available at: <https://www.routledge.com/Guidelines-for-Open-Pit-Slope-Design-in-Weak-Rocks/Martin-Stacey/p/book/9781138298095>
10. Rivera A. *Groundwater modelling: from geology to hydrogeology*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/229005360>
11. Chmakov S., Hesch W., Tu C. *Conceptual Model Development for FEFLOW or MODFLOW Models – A New Generation of Schlumberger Water Services Software*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/228688843>
12. Kitanidis P.K. *Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology*. Cambridge University Press; 1997.
13. Демьянов В.В., Савельева Е.А. *Геостатистика: теория и практика*. М.: Наука; 2010.
14. van den Meiracker I.J. *Exploring 3D functionalities: A research into software that support the spatial analysis and visualisation of 3D subsurface data* (Master's Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands). Available at: [http://www.gdmc.nl/publications/2019/MSc\\_thesis\\_Inge\\_van\\_den\\_Meiracker.pdf](http://www.gdmc.nl/publications/2019/MSc_thesis_Inge_van_den_Meiracker.pdf)
15. Глисон П. *Освоение новых инструментов для решения современных задач оценки ресурсов*. Режим доступа: <https://www.leafrog3d.com/ru/news/>

16. Леонтьева Е.В., Квачев В.Н. Способы автоматизации гидрогеологических работ на этапах геологического изучения недр, разведки и освоения месторождений подземных вод. В: *Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях: материалы XIV междунар. конф.* Белгород: БелГУ; 2019. С. 48–53.
17. Леонтьева Е.В., Квачев В.Н., Сергеев С.В. Методологические и технологические аспекты автоматизации процесса создания трехмерных моделей геофильтрации при решении геоэкологических задач. В: *Моделирование при решении геоэкологических задач: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Москва, 23–24 марта 2009 г.* М.: ГЕОС; 2009. С. 114–118. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25719938>

## References

- Vedig M. *Digitalization in mining*. Available at: <http://www.good-climate.com/materials/files/152.pdf> (In Russ.)
- Abramov S.K., Skirgello O.B., Cheltsov M.I. *Drainage of mine takes and open-cast coal mines*. Moscow: Gosgortekhzdat; 1961. (In Russ.)
- Oksanich I.F., Beresnev V.S., Gordon A.B. et al. *Drainage of deposits during construction of iron ore operations*. Moscow: Nedra; 1977. (In Russ.)
- Shtrodka K., Fisher M., Doman Kh. et al. *Hydraulic engineering in mining and construction*. Moscow: Nedra; 1978. (In Russ.)
- Stanchenko I.K. (ed.) *Rock Drainage Handbook*. Moscow: Nedra; 1984. (In Russ.)
- Norvatov Yu.A. *Studies and forecast of man-caused groundwater mode*. Leningrad: Nedra; 1988. (In Russ.)
- Read J., Stacey P. *Guidelines for open pit slope design*. CRC Press; 2009. DOI: 10.1071/9780643101104.
- Read J., Beale G. *Guidelines for Evaluating Water in Pit Slope Stability*. CSIRO PUBLISHING; 2013.
- Martin D., Stacey P. *Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*. CRC Press; 2018. Available at: <https://www.routledge.com/Guidelines-for-Open-Pit-Slope-Design-in-Weak-Rocks/Martin-Stacey/p/book/9781138298095>
- Rivera A. *Groundwater modelling: from geology to hydrogeology*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/229005360>
- Chmakov S., Hesch W., Tu C. *Conceptual Model Development for FEFLOW or MODFLOW Models – A New Generation of Schlumberger Water Services Software*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/228688843>
- Kitanidis P.K. *Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology*. Cambridge University Press; 1997.
- Demiyanov V.V., Savelieva E.A. *Geostatistics: Theory and Practice*. Moscow: Nedra; 2010. (In Russ.)
- van den Meiracker I.J. *Exploring 3D functionalities: A research into software that support the spatial analysis and visualisation of 3D subsurface data* (Master's Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands). Available at: [http://www.gdmc.nl/publications/2019/MSc\\_thesis\\_Inge\\_van\\_den\\_Meiracker.pdf](http://www.gdmc.nl/publications/2019/MSc_thesis_Inge_van_den_Meiracker.pdf)
- Glison P. *Mastering of new tools to address current challenges in resource appraisal*. Available at: <https://www.leapfrog3d.com/ru/news/> (In Russ.)
- Leontieva E.V., Kvachev V.N. Ways of hydrogeological work automation during the stages of geological surveys, exploration and development of underground water deposits. In: *Development of mineral deposits and underground construction in difficult hydrogeological conditions: materials of XIV International Conference*, Belgorod: Belgorod National Research University; 2019, pp. 48–53. (In Russ.)
- Leontieva E.V., Kvachev V.N., Sergeev S.V. Methodological and technological aspects in automation of 3D geofiltration modelling to solve geocological challenges. In: *Modelling in Solving Geocological Challenges: Materials of the Annual Session of the RAS Scientific Council on Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology, Moscow, March 23-24, 2009*, Moscow: GEOS; 2009, pp. 114–118. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25719938> (In Russ.)

### Информация об авторах

**Квачев Василий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела, Белгородский государственный национальный исследовательский университет; генеральный директор, ООО «Белнедра», г. Белгород, Российская Федерация; e-mail: kvachev@bsu.edu.ru.

**Леонтьева Елена Васильевна** – кандидат географических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела, Белгородский государственный национальный исследовательский университет; ведущий специалист ООО «Белнедра», г. Белгород, Российская Федерация.

**Хаустов Владимир Васильевич** – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии и горного дела, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация.

**Козуб Александр Васильевич** – кандидат технических наук, главный инженер, АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», г. Железногорск, Российская Федерация.

**Кушнерчук Вячеслав Викторович** – начальник Дренажной шахты, АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», г. Железногорск, Российская Федерация; e-mail: V\_Kushnerchuk@mgok.ru.

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.06.2020

Поступила после рецензирования: 09.06.2020

Принята к публикации: 22.06.2020

### Information about the author

**Vasily N. Kvachev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Geology and Mining, Belgorod National Research University; Director General, Belnedra LLC, Belgorod, Russian Federation; e-mail: kvachev@bsu.edu.ru.

**Elena V. Leontieva** – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Geology and Mining, Belgorod National Research University; Leading Specialist, Belnedra LLC, Belgorod, Russian Federation.

**Vladimir V. Khaustov** – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Department of Applied Geology and Mining, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation.

**Aleksandr V. Kozub** – Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer, Andrei Varichev Mikhailovsky GOK, Zheleznogorsk, Russian Federation.

**Vyacheslav V. Kushnerchuk** – Drainage Mine Manager, Andrei Varichev Mikhailovsky GOK, Zheleznogorsk, Russian Federation; e-mail: V\_Kushnerchuk@mgok.ru.

### Article info:

Received: 01.06.2020

Revised: 09.06.2020

Accepted: 22.06.2020