

УДК 556.3:622:004

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Е. В. ЛЕОНТЬЕВА, доцент, канд. геогр. наук, leonteva@bsu.edu.ru
В. Н. КВАЧЕВ, доцент, канд. техн. наук

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

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 производством 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» [2].

По мнению немецких 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 режиме реального времени и сопоставление с планом.

При этом программно-техническое оснащение 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:

- отдача от цифровизации;

Рассмотрены рабочие циклы цифровизации данных оперативного и эпизодического мониторинга о состоянии подземных вод в точках контроля и 3D-представления на постоянно действующих моделях процессов фильтрации, распределения порового давления, напорных градиентов, движения загрязняющих веществ для обеспечения безопасного и конкурентоспособного освоения обводненных месторождений полезных ископаемых в современных условиях. Обоснована актуальность разработки технологий цифровизации гидрогеологических процессов, основанных на последних достижениях в области геоинформатики, гидрогеоинформатики, автоматизации гидрогеологических работ.

Ключевые слова: горнорудная промышленность, цифровизация, гидрогеологические процессы, геоинформационные технологии, поровое давление, гидравлический градиент, региональные модели фильтрации, борта карьера, оперативный мониторинг.

DOI: 10.17580/gzh.2020.10.11

- эффекты от внедрения цифровизации на горно-металлургических предприятиях России; итоги аналитического исследования;

- преимущества и недостатки цифровизации [3].

Данный вопрос на правительственном уровне в 2019 г. рассматривали угледобывающие предприятия. Таким образом, цифровизация горнорудной промышленности стала трендом развития горнорудного производства на ближайшее будущее.

Актуальность цифровизации гидрогеологических процессов

Добыча полезных ископаемых и их обогащение в условиях обводненных месторождений сопровождаются двумя основными гидрогеологическими процессами:

- *изменением порового давления, напорных градиентов на участках разгрузки подземных вод в бортах карьеров, кровле и подошве подземных горных выработок, в зоне влияния дренажных устройств, на участках подтопления территорий промплощадок обогатительных фабрик и территорий, примыкающих к зоне влияния хвостохранилищ;*
- *изменением природного качественного состава подземных вод в зоне влияния хвостохранилищ, буровзрывных работ и других производств.*

Так, в Губкинско-Старооскольском горнорудном районе в зоне влияния предприятий Лебединского горно-обогатительного комбината (ЛГОКа) и Старооскольского горно-обогатительного комбината (СГОКа) амплитуда изменения уровня подземных вод за пределами контуров карьеров составляет около 70 м на площади 317 км² (рис. 1). При этом в зоне активного влияния оказался государственный заповедник «Белогорье — Ямская степь».

Процессы существенного изменения порового давления, напорных градиентов, качества подземных вод, с одной стороны, связаны с затратами на обеспечение безопасности, поддержание высокой производительности горных работ, а с другой — с возмещением ущерба окружающей среде путем выплаты штрафных санкций органам госконтроля, субъектам хозяйственной деятельности, физическим лицам.

Предыстория развития и обзор современных технологий

В советское время основные направления развития отечественных технологий по защите горных работ от обводнения были определены прежде всего особенностями освоения железорудных месторождений КМА, 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 [4–7]. Защита горных выработок от обводнения была направлена на опережающее горные работы понижение уровня подземных вод, защиту 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. Применяли 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 [8]. При этом наблюдательная сеть обычно располагается за контуром карьеров и нацелена на контроль порового давления, определение горизонтальных градиентов потока подземных вод и не позволяет выявить участки концентрации повышенного порового давления и вертикального градиента, негативно влияющие на устойчивость бортов карьеров и безопасность ведения горных работ в целом. К примеру, это наглядно видно на схеме размещения наблюдательных скважин в зоне влияния горных работ ЛГОКа и СГОКа (рис. 2).

К сожалению, последнее обобщение отечественного опыта защиты горных работ от воды датируется 1984 г. [7], поэтому в период развития «Индустрии 4.0» российским 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 выпущены 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 [9–11].

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



Рис. 1. Масштабы изменения уровня подземных вод



Рис. 2. Схема размещения наблюдательной сети скважин в Губкинско-Старооскольском горнорудном районе

1. Планирование ведения горных работ нацелено на минимизацию их воздействия на окружающую среду в плане снижения уровня и загрязнения подземных вод, уменьшения объема вскрышных работ, а следовательно, сокращения площадей земель, занятых отвалами пород, хвостохранилищами. Обязательным элементом в процессе проектирования и эксплуатации карьеров является оценка неопределенности данных и рисков [12].

2. Обобщение опыта и проведение исследований осуществлено для месторождений полезных ископаемых, гидрогеологические условия которых характеризовались коэффициентом фильтрации водовмещающих пород преимущественно $<10^{-6}$ м/с, т. е. не стоял остро вопрос о защите контуров карьеров и шахтных полей от водопритоков извне, снятии порового давления воды на десятки метров за пределами площадей ведения горных работ. Защиту от обводнения либо обеспечивали пассивными способами за счет естественного дренажа по существующим и сформировавшимся в процессе буровзрывных работ системам трещин с последующим карьерным (шахтным) водоотливом, либо использовали активные способы снятия порового давления путем эксплуатации вертикальных, горизонтальных, наклонных дренажных устройств и выработок с самотечным оборудованием, 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 горных работ.

3. Методология исследований устойчивости бортов карьера базировалась на том, что взаимосвязь между сдвиговой прочностью породы или грунтового массива и поровым давлением

подземных вод выражается совместным действием закона (критерия) разрушения Кулона – Мора и концепции эффективного напряжения, разработанной Терцаги:

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

где τ – сдвиговая прочность по потенциальной поверхности разрушения; σ – общее нормальное напряжение, действующее перпендикулярно потенциальной поверхности разрушения; u – поровое давление подземных вод; φ – 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. 3). Следует отметить, что современный уровень развития средств контроля за состоянием подземных вод позволяет в автоматическом режиме с частотой от нескольких секунд до года считывать показатели порового давления, температуры, минерализации подземных вод, дебита дренажных устройств, производительности водотлива, 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, 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 являются наиболее сложными, 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. 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 – в виде моделей с фильтрацией по трещинам (модель сети дискретных трещин – Discrete fracture network, DFN). Последняя в явном виде отражает пространственное распределение в породном массиве разломов и трещин [9, 13].

В современном понимании модель распределения порового давления – фильтрации состоит из концептуальной и численной моделей. Процедура подготовки концептуальной модели фильтрации предусматривает создание и ввод данных цифровой



Рис. 3. Схема размещения пьезометров для определения вертикальных градиентов [7]

модели местности, структурной модели гидрогеологических объектов, моделей фильтрационных свойств и граничных условий [14]. Рабочий цикл численной модели предусматривает определение расчетной блок-схемы, разбику блок-схемы на расчетные слои и элементы, собственно процедуру расчета распределения порового давления на основе заданных условий и свойств концептуальной модели, визуализацию, анализ и проверку полученных результатов. Процедура подготовки концептуальной модели и функционирование численной модели осуществляются по замкнутому циклу (рис. 4) [14].

Достоверность модельных прогнозов прежде всего зависит от того, насколько концептуальная модель соответствует природным условиям и протекающим процессам, а также от правильности выбора численной модели. Достоверное количественное обоснование концептуальной модели, схемы размещения станций мониторинга возможно только на основе применения геостатических методов анализа и современных 3D-геоинформационных технологий [15–21].

Геоинформационные технологии в последние 10 лет сделали стремительный рывок в области создания 3D-моделей месторождений полезных ископаемых [14]. Так, современная версия программы моделирования фильтрации Visual MODFLOW Flex позволяет в рамках одной модели, используя неструктурированные сетки, моделировать фильтрацию в сплошной пористой среде, обладает гибкостью построения геометрии пласта и возможностью свободного задания трещин. В то же время быстро набирает популярность, в том числе у отечественных горнодобывающих предприятий, технология создания 3D-геологических структурных моделей месторождений полезных ископаемых, базирующаяся на использовании метода с перешагиванием (leapfrog). Заинтересованность пользователей обусловлена динамическим обновлением графических 3D-представлений рудных залежей, рудовмещающих и перекрывающих пород, исключая процесс создания триангуляционных, ортогональных сеток после ввода новых данных по скважинам различного назначения. Также это позволяет динамически

обновлять 3D-эквипотенциальные поверхности порового давления, отображения величин векторов градиентов.

Методические аспекты цифровизации гидрогеологических процессов

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, по мнению авторов, наиболее актуальной является разработка современных технологий цифровизации гидрогеологических процессов в горнодобывающей промышленности, направленных на:

- оперативный, эпизодический контроль и отображение в x -, y -, z -, t -координатах состояния воды в точке контроля, включающего измерение порового давления, температуры, минерализации, дебита дренажных, водозаборных устройств, с учетом производительности насосного оборудования шахтного и карьерного водоотлива, водопроявлений в бортах карьера, подземных горных выработках, в зоне влияния горного производства;
- создание постоянно действующих гидрогеологических моделей процессов фильтрации, распределения порового давления, градиентов потока и переноса загрязняющих веществ в рамках концептуальной и численной моделей недр, объектов горного производства, рельефа, природной среды и антропогенной деятельности в зоне влияния горного производства.

Технологии цифровизации состояния воды в точке контроля должны быть ориентированы на оперативный суточный мониторинг, проводимый внутри карьерных и шахтных полей, и эпизодический мониторинг за их пределами. Процесс присвоения численных значений контролируемым параметрам маркируется временем, датой снятия показаний, фиксируется в памяти, передается по каналам связи и отображается на мониторах контроля в режиме реального времени с частотой, определенной программой мониторинга и прогноза [22–24].

Технологии создания моделей процессов распределения порового давления, градиентов потока и переноса загрязняющих веществ должны обеспечивать отображения в 3D-виде на постоянно действующих динамических моделях с периодичностью, определенной программой моделирования и прогноза. Данные технологии должны охватывать прежде всего рабочие процессы, а именно:

- регистрацию первичных гидрогеологических данных и материалов в необходимой системе координат;
- разработку структурных моделей гидрогеологических объектов, распределения порового давления, концентраций подземных вод, их геостатистический анализ и обоснование достоверности;
- создание и обоснование моделей фильтрационных свойств;
- создание и обоснование модели граничных условий;
- обоснование расчетной блок-схемы, выбор типа разбивки блок-схемы на расчетные слои и элементы;
- визуализацию расчетных и вспомогательных данных в 3D-виде, оценку степени соответствия расчетных природным данным (оценку калибровки модели);

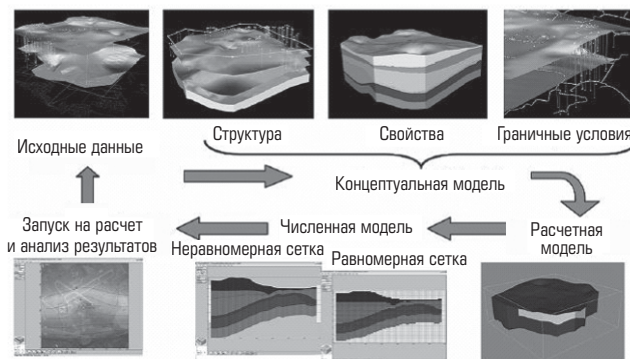


Рис. 4. Принципиальная схема моделирования распределения порового давления [13]

- оценку неопределенности данных и рисков от гидрогеологических процессов и т. д.

В современных условиях для того, чтобы перейти к построению динамических и достаточно адекватных 3D-моделей, позволяющих учитывать и визуализировать взаимодействие геотехнологических и гидродинамических процессов, необходимо прежде всего организовать в единых форматах цифровой документооборот геологических, гидрогеологических данных, планов горных работ.

Геолого-техническая документация должна формироваться по утвержденным правилам, классификациям и словарям первичной документации в плане пространственной привязки, описания горных пород и состояния массива при картировании выходов пород в бортах карьеров, подземных горных выработках, при документации керна (процесс должен быть автоматизирован, как и сканирование ствола скважины).

Факторы, определяющие динамику изменчивости гидрогеологических моделей и процессов, можно разделить на две группы.

Первая группа связана с интенсивностью изменения внешних и внутренних условий на границах моделей (граничных условий), обусловленных динамикой развития контуров горных работ в плане и по глубине, изменением углов откосов бортов карьеров, фронта очистных работ, наращиванием высотных отметок заполнения хвостохранилищ, скоростью проходки дренажных выработок, выхода из строя сооружений и новых дренажных устройств. Последние характеризуются наибольшей изменчивостью.

Вторая группа факторов связана с изменчивостью представлений о геологоструктурных и гидрогеологических условиях массива, формирующихся по материалам детальной разведки, горнопроходческих работ, геомеханического и гидрогеологического мониторинга разрабатываемого месторождения. Основными изучаемыми показателями являются: пространственное положение и морфометрические показатели тектонических нарушений разного порядка, природная и техногенная (вызванная добычными работами) трещиноватость, изменчивость водопроницаемости трещинного массива.

Вышерассмотренные направления разработки современных технологий цифровизации гидрогеологических процессов в горнодобывающей промышленности предъявляют высокие требования к компетенции специалистов-гидрогеологов, осуществляющих мониторинг подземных вод, эксплуатацию постоянно действующих моделей фильтрации и массопереноса.

Выводы

Для получения эффекта от технологий цифровизации гидрогеологических процессов в плане увеличения безопасности ведения горных работ, снижения затрат на предотвращение, сокращение уровня воздействия негативных гидрогеологических и других процессов и явлений, связанных с обводнением горных выработок, подтоплением объектов горного производства, снижения ущерба от штрафных санкций за негативное влияние горного производства на окружающую среду за пределами горного отвода необходимо выполнить следующее.

1. На действующих горнодобывающих предприятиях кардинально реконструировать существующую систему мониторинга гидрогеологических процессов. Следует эпизодический режим осуществления 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, с обоснованием достоверности получения 3D-данных изменения порового давления и напорных градиентов.

2. Данные оперативного мониторинга в режиме реального времени визуализировать на мониторах, анализировать направленность, динамику развития процессов и сигнализировать оператору при выходе за границы доверительных интервалов.

3. 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.

4. Организовать обучение (переподготовку) специалистов-гидрогеологов, операторов диспетчерских систем навыкам работы с технологиями цифровизации гидрогеологических процессов в соответствии с требованиями «Индустрии 4.0».

Библиографический список

1. Цифровизация в горнодобывающей промышленности : информационный бюллетень / Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2019. URL: <http://www.good-climate.com/materials/files/152.pdf> (дата обращения: 30.04.2020).
2. Цифровая экономика РФ / Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, 2020. URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/#section-docs> (дата обращения: 14.06.2020).
3. Цифровизация в горной промышленности. Индустрия 4.0 / Технический университет УГМК, 2019. URL: <https://tu-ugmk.com/upload/NPF-journal.pdf> (дата обращения: 14.06.2020).
4. *Абрамов С. К., Скиргелло О. Б., Чельцов М. И.* Осушение шахтных полей и карьеров угольных месторождений. – М. : Госгортехиздат, 1961. – 399 с.
5. *Оксанич И. Ф., Береснев В. С., Гордон А. Б.* и др. Осушение месторождений при строительстве железорудных предприятий. – М. : Недра, 1977. – 285 с.
6. *Strzodka K., Fischer M., Domann H.* Hydrotechnik im Bergbau und Bauwesen. – Leipzig, 1975. – 392 s.
7. Справочник по осушению горных пород / под ред. И. К. Станченко. – М. : Недра, 1984. – 575 с.
8. *Норватов Ю. А.* Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод. – Л. : Недра, 1988. – 260 с.
9. *Read J., Stacey P.* Guidelines for Open Pit Slope Design. – Collingwood : CSIRO Publishing, 2009. – 487 p.
10. *Beale G., Read J.* Guidelines for Evaluating Water in Pit Slope Stability. – Collingwood : CSIRO Publishing, 2013. – 611 p.
11. *Martin D., Stacey P.* Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks. – Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. – 416 p.
12. *Кибурев В. И.* Анализ производственного опыта складирования сгущенных хвостов // Обогащение руд. 2019. № 2. С. 27–32. DOI: 10.17580/or.2019.02.05
13. *Rivera A.* Groundwater modelling: from geology to hydrogeology. 2007. URL: <https://www.researchgate.net/publication/229005360> (дата обращения: 21.06.2020).
14. *Chmakov S., Hesch W., Tu C., Lima M., Sychev P.* Conceptual Model Development for FEFLOW or MODFLOW Models – A New Generation of Schlumberger Water Services Software. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/228688843_Conceptual_model_development_for_FEFLOW_or_MODFLOW_models-a_new_generation_of_Schlumberger_Water_Services_software (дата обращения: 21.06.2020).
15. *Kitanidis P. K.* Introduction to Gostatistics : Applications to Hydrogeology. – Cambridge : Cambridge University Press, 1997. – 271 p.
16. *Демьянов В. В., Савельева Е. А.* Геостатистика: теория и практика. – М. : Наука, 2010. – 327 с.
17. *Мусин П. Х., Храменков М. Г.* Введение в численное моделирование геофильтрации : учебно-методическое пособие. – Казань : Изд-во Казанского ун-та, 2019. – 41 с.
18. *Anderson M. P., Woessner W. W., Hunt R. J.* Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. 2nd ed. – London : Academic Press, 2015. – 564 p.
19. *Dassargues A.* Hydrogeology: Groundwater Science and Engineering. – Boca Raton : CRC Press, 2018. – 492 p.
20. *Волков Ю. И., Жданова Т. В.* Применения геофильтрационного моделирования при отработке карьеров Кременчугской магнитной аномалии // ГИАБ. 2015. Спец. выпуск 56. Глубокие карьеры. С. 356–367.
21. *Шамшев А. А., Котлов С. Н.* Совершенствование методики оценки фильтрационных параметров анизотропных слабопроницаемых отложений на основе опытно-фильтрационных наблюдений // ГИАБ. 2017. № 10. С. 194–204.
22. *Леонтьева Е. В., Квачев В. Н.* Способы автоматизации гидрогеологических работ на этапах геологического изучения недр, разведки и освоения месторождений подземных вод // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях : сб. матер. XIV Междунар. конф. – Белгород, 2019. С. 48–53.
23. *Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A.* Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
24. *Квачев В. Н., Квачева Е. В., Сергеев С. В.* Методологические и технологические аспекты автоматизации процесса создания трехмерных моделей геофильтрации при решении геоэкологических задач // Моделирование при решении геоэкологических задач (Сергеевские чтения) : матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – М. : ГЕОС, 2009. Вып. 11. С. 114–118. 

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 10, pp. 95–100

DOI: 10.17580/gzh.2020.10.11

Digitalization of hydrogeological processes in mining industry

Information about authors

E. V. Leontieva¹, Associate Professor, Candidate of Geographical Sciences, leonteva@bsu.edu.ru

V. N. Kvachev¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

¹Belgorod State University, Belgorod, Russia

Abstract

The groundwater monitoring reconstruction and hydrogeological digitalization are discussed on the ground of the past and modern mine flooding protection technologies and geo-information technologies. According to the authors, it is of the current concern to advance digitalization technologies for hydrogeological processes in the mining industry to be focused on:

– operative and episodic control and display of water condition at the control point in the x, y, z, t coordinates, including pore pressure, temperature, mineralization, flow rate of drainage water intake devices, productivity of pumping equipment of mine and quarry drainage, water-development in pit walls, in underground mines, in the influence zone of mining production;

– creation of permanent hydrogeological models of groundwater flow, pore pressure distribution, flow gradients and transport of pollutants within the framework of conceptual and numerical models of subsoil, mining facilities, terrain, natural environment and anthropogenic activity in the influence zone of mining. The article discusses the working cycles of digitalization of operational and occasional monitoring data on the status of groundwater at the control points and 3D representations of groundwater flow, distribution of pore pressure, pressure gradients and movement of pollutants using constantly operating models to ensure safe and competitive development of flooded mineral deposits in modern conditions. The relevance of the digitalization technologies for hydrogeological processes based on the latest achievements in the field of geoinformatics and automation of hydrogeological work is substantiated.

Keywords: mining industry, digitalization, hydrogeological processes, geoinformation technologies, pore pressure, hydraulic gradient, regional groundwater flow models, pit slopes, operational monitoring.

References

- Digitalization in mining industry : Information bulletin. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2019. Available at: <http://www.good-climate.com/materials/files/152.pdf> (accessed: 30.04.2020).
- Digital Economy of the Russian Federation. Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation, 2020. Available at: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/#section-docs> (дата обращения: 14.06.2020).
- Digitalization in mining industry. Industry 4.0. UMMC Technical University, 2019. Available at: <https://tu-ugmk.com/upload/NPF-journal.pdf> (accessed: 14.06.2020).
- Abramov S. K., Skirgello O. B., Cheltsov M. I. Drainage engineering in surface and underground coal mines. Moscow : Gosgortekhnizdat, 1961. 399 p.
- Oksanich I. F., Beresnev V. S., Gordon A. B. et al. Drainage of mineral deposits during iron ore mine construction. Moscow : Nedra, 1977. 285 p.
- Strzodka K., Fischer M., Domann H. Hydrotechnik im Bergbau und Bauwesen. Leipzig, 1975. 392 s.
- Stanchenko I. K. (Ed.). Reference book on dehumidifying of rocks. Moscow : Nedra, 1984, 575 p.
- Norvatov Yu. A. Research and prediction of induced groundwater dynamics. Leningrad : Nedra, 1988. 260 p.
- Read J., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design. Collingwood : CSIRO Publishing, 2009. 487 p.
- Beale G., Read J. Guidelines for Evaluating Water in Pit Slope Stability. Collingwood : CSIRO Publishing, 2013. 611 p.
- Martin D., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks. Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. 416 p.
- Kibirev V. I. Analysis of the industrial practice of thickened tailings storage. *Obogashchenie Rud.* 2019. No. 2. pp. 27–32. DOI: 10.17580/or.2019.02.05
- Rivera A. Groundwater modelling: from geology to hydrogeology. 2007. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/229005360> (accessed: 21.06.2020).
- Chmakov S., Hesch W., Tu C., Lima M., Sychev P. Conceptual Model Development for FEFLOW or MODFLOW Models—A New Generation of Schlumberger Water Services Software. 2009. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228688843_Conceptual_model_development_for_FEFLOW_or_MODFLOW_models-a_new_generation_of_Schlumberger_Water_Services_software (accessed: 21.06.2020).
- Kitanidis P. K. Introduction to Gostatistics : Applications to Hydrogeology. Cambridge : Cambridge University Press, 1997. 271 p.
- Demyanov V. V., Saveleva E. A. Geostatistics. Theory and practice. Moscow : Nauka, 2010. 327 p.
- Musin R. Kh., Khranchenkov M. G. Introduction of geo-permeation to digital modeling : Educational and teacher edition. Kazan : Izdatelstvo Kazanskogo universiteta, 2019. 41 p.
- Anderson M. P., Woessner W. W., Hunt R. J. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. 2nd ed. London : Academic Press, 2015. 564 p.
- Dassargues A. Hydrogeology: Groundwater Science and Engineering. Boca Raton : CRC Press, 2018. 492 p.
- Volkov Yu. I., Zhdanova T. V. Application of geofiltration modeling when developing open-pits of the Kremenchug magnetic anomaly. *GIAB.* 2015. Special issue 56. Deep open pits. pp. 356–367.
- 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.
- Leonteva E. V., Kvachev V. N. Methods of automation of hydrogeological works at the stages of geological survey, exploration and development of mineral deposits. *Mineral Mining and Underground Construction in Difficult Hydrogeological Conditions : XIV International Conference Proceedings.* Belgorod, 2019. pp. 48–53.
- Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining.* 2018. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
- Kvachev V. N., Kvacheva E. V., Sergeev S. V. Methodology and technology of automation in three-dimensional modeling of geo-permeation in solving of geo-ecological problems. *Modeling in Geocology (Sergeev's Lectures) : Proceedings of Annual Session of the Science Board for Geocology, Engineering Geology and Hydrogeology at the Russian Academy of Sciences.* Moscow : GEOS, 2009. Iss. 11. pp. 114–118.

УДК 556.3:622

О ДРЕНАЖНЫХ ВОДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТЫРНЫАУЗ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ И ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТАДИЯХ

В. В. ХАУСТОВ, проф., д-р геол.-минерал. наук, khaustov@bsu.edu.ru
В. Н. ТЮПИН, проф., д-р техн. наук
Н. Б. АГАРКОВ, аспирант

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Введение

Актуальность изучения процессов формирования дренажного стока рудных месторождений не нуждается в дополнительных доказательствах, прежде всего в связи с серьезными экологическими проблемами, возникающими в горнодобывающих районах. При этом значимость подобных исследований существенно возрастает для коренных месторождений сульфидных руд, расположенных в условиях сильно расчлененного рельефа на высокогорье, где резко увеличивается площадь техногенных потоков рассеяния характерных поллютантов [1–3].

Выявлены факторы формирования состава дренажных вод как на эксплуатационном, так и на постэксплуатационном этапе освоения высокогорного Тырнаузского месторождения вольфрам-молибденовых руд.

Показана высокая экологическая опасность их сброса в гидрографическую сеть. Обоснована острая необходимость разработки и осуществления технических мероприятий по их локализации и очистке.

Ключевые слова: Тырнаузское месторождение, подземные воды, дренажный сток, факторы формирования, поверхностные воды, загрязнение, поллютанты.

DOI: 10.17580/gzh.2020.10.12

Объект исследований

Тырнаузское месторождение вольфрама и молибдена скарнового типа расположено в пределах Эльбрусского вулканического района в левобережье р. Баксан. Оно связано с комплексом гранитоидов, образовавшихся в период активизации