

УДК 004.9:519.67:622

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОТКРЫТОЙ И ПОДЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

С. В. ЛУКИЧЕВ, директор, д-р техн. наук**О. В. НАГОВИЦЫН**, зам. директора по научной работе, д-р техн. наук,
nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

По оценкам авторитетных экспертов [1–5], экономически развитые страны находятся в настоящее время на первом этапе четвертой промышленной революции, которая призвана сформировать новый технологический уклад, получивший название «Индустрия 4.0». Его характерным признаком является появление новых технологий и совершенствование существующих на основе широкого использования методов работы с цифровой информацией. Ниже перечисляются те из них, которые уже находят или найдут в ближайшее время применение в горной промышленности.

Инструменты и методы информационных технологий

Информационные (цифровые) технологии включают в себя ряд составляющих, к наиболее значимым из которых можно отнести следующие.

Большие данные. Уже сейчас специалисты горнодобывающих предприятий имеют дело с данными, генерируемыми автоматизированными средствами получения информации о состоянии горных выработок и насыпных сооружений, их геометрии и положении в пространстве. Лазерные сканеры, беспилотные летательные аппараты, средства космического дистанционного зондирования Земли поставляют данные огромных объемов, требующие методов цифровой обработки для выделения полезной, критически важной информации об изменении ситуации при ведении горных работ. В перспективе могут появиться технические средства автоматизированного сбора информации о качестве добываемого полезного ископаемого (ПИ) в процессе подготовки массива горных пород (ГП) к выемке, погрузке и транспортированию, что поможет преодолеть проблему недостатка знаний о закономерностях распределения ПИ в массиве и развале ГП. Современные горные машины в процессе работы генерируют данные о состоянии машины как в целом, так и ее отдельных узлов. Эта информация собирается системами диспетчеризации, там же она трансформируется в информацию о производительности, необходимости проведения профилактических и ремонтных мероприятий. Наличие средств спутникового или иного определения местоположения машин и оборудования формируют массив цифровой информации о перемещении объектов в пространстве и во времени, что создает основу для автоматизации управления горными работами [6].

Роботизированные комплексы активно развиваются в рамках автоматизации технологических процессов горного производства.

Показаны отличительные особенности информационных технологий в горном деле. Приведены примеры цифровизации планирования и геомеханического обеспечения безопасности горных работ, проведения массовых взрывов и закладочных работ.

Ключевые слова: горная промышленность, цифровой двойник, горные работы, планирование горных работ, горно-геологическая информационная система, проектирование массовых взрывов, автоматизированное проектирование.

DOI: 10.17580/gzh.2019.06.06

Так, уже сейчас функционируют роботизированные карьерные самосвалы, буровые установки для подземных и открытых горных работ. Пока речь не идет о полной автономности этих машин, но прогресс в этом направлении ощущим и уже вносит свой вклад в повышение эффективности добычи ПИ. Важным преимуществом роботизированных машин и комплексов, кроме повышения коэффициента использования оборудования и продления срока его эксплуатации, является переход к малолюдным технологиям добычи и транспортирования ПИ. При этом формирование цифрового (виртуального) пространства, где осуществляется работа автономного оборудования, является необходимым условием его эксплуатации.

Искусственный интеллект становится инструментом анализа больших данных и принятия на основе самообучающихся алгоритмов оптимальных решений в области технологии и безопасности горных работ.

Веянием времени является *облачное хранение и обработка данных*. По мере развития компонентной базы, оптоволоконной и беспроводной связи, а также связанного с этим постоянного снижения стоимости хранения данных все более привлекательным становится использование data-центров взамен создания на каждом предприятии своих хранилищ цифровых данных. Особенно актуально это для небольших предприятий, где не имеет смысла создавать специализированные информационные подразделения. Получат также распространение интернет-сервисы, нацеленные на решение специализированных задач, связанных с использованием высококвалифицированных специалистов или больших вычислительных мощностей (например, обработка данных геологической разведки и построения моделей запасов ПИ с использованием программных средств геостатистического анализа, календарное и годовое планирование, проектирование массовых взрывов и т. д.).

Виртуальная реальность позволяет придавать цифровым моделям вид реальных объектов и процессов горной технологии. Достигается это созданием реалистичных цифровых моделей объектов и имитационным моделированием работы горных машин и оборудования в режимах реального, ускоренного или замедленного времени. Современные средства получения точной пространственной информации о местоположении и геометрии объектов

с использованием лазерного и радарного сканирования, космических и беспилотных летательных аппаратов позволяют значительно ускорить и упростить процедуру создания детальных цифровых моделей. Таким образом, появляется возможность, используя виртуальную реальность, «проигрывать» варианты реализации планов ведения горных работ; визуализировать результаты комплексного мониторинга технологических и техногенных процессов, связанных с ведением горных работ; осуществлять процесс обучения персонала в условиях, максимально приближенных к их будущей работе.

Дополненная реальность дает возможность при взгляде на реальный объект, как правило, с помощью специальных очков, дополнять его изображение графической или цифровой информацией об объекте из баз данных различного назначения. Это может быть информация о содержании ПИ в массиве или развале ГП, структуре поверхности откоса или выработки, характеристиках крепи, наличии внутри массива пустот и выработок, удароопасности отдельных выработок и т. п.

Промышленный Интернет вещей представляет собой способ цифровой интеграции машин и оборудования, задействованных в технологических процессах разработки месторождения ПИ. Достигается это использованием стандартных протоколов обмена данными как между отдельными единицами оборудования, так между ними и центральной управляющей информационной системой. Таким образом, формируется информационное цифровое поле, содержащее данные в режиме реального времени о местоположении и параметрах объектов, что позволяет формировать автоматизированную (роботизированную) технологию добычи и транспортирования ПИ. Уже в настоящее время современное горное оборудование оснащено десятками датчиков, позволяющих контролировать его состояния, и цифровыми устройствами, реализующими дистанционный и автоматизированный способ управления оборудованием.

Цифровая модель горнодобывающего предприятия

Важнейшим элементом цифровой технологии применительно к горному делу является информационная система, основным назначением которой является формирование моделей объектов горной технологии и предоставление инструментов для использования моделей при решении задач инженерного обеспечения горных работ. В силу специфики горного производства (отсутствие одинаковых месторождений и природных условий ведения горных работ, постоянное изменение геометрии выработанного пространства, влияние на очередность отработки выемочных единиц экономических факторов и т. д.) для работы с соответствующими моделями используются, как правило, горно-геологические информационные системы (ГГИС). За последние 40 лет в мире создано ограниченное число программных продуктов этого класса [7], и оно в последнее время не увеличивается. Связано это с большими временными и трудовыми затратами, необходимыми для создания конкурентоспособного программного продукта. Несмотря на отличия в программной реализации алгоритмов, все ГГИС построены на работе с векторными, каркасными и блочными моделями, обеспечивающими решение задач в различных областях горного дела.

Так, в области *геологии* такими задачами являются: формирование базы данных (БД) и 3D-визуализация результатов геологической

разведки месторождения; построение каркасных моделей рудных тел, пластов и геологических нарушений; создание блочных моделей рудных тел и интерполяция результатов геологической разведки на основе геостатистической оценки месторождения; оконтуривание запасов месторождения, определение содержания ПИ в выемочных единицах. К числу задач в области *маркшейдерии* относятся: формирование и работа с БД точек съемочного обоснования; обеспечение реализации проектных решений, представленных 3D-моделями виртуальных объектов, в реальном пространстве ведения горных работ; формирование 3D-моделей на основе данных инструментальных замеров реальных объектов. В области *геотехнологии* это задачи проектирования выработок, объектов подземной и наземной инфраструктуры; календарного планирования горных работ на основе моделирования проходки выработок (развития карьерного пространства) и отработки выемочных единиц; оперативного планирования и управления горными работами на основе мониторинга и диспетчеризации горнотранспортного оборудования.

Таким образом, можно констатировать, что на сегодня в рамках развития ГГИС создана инструментальная основа для создания цифровых моделей объектов горной технологии. Хуже обстоит дело с созданием моделей основных и вспомогательных технологических процессов, которые, с одной стороны, могут являться инструментом оптимизации технологических решений, а с другой — виртуальной моделью работы реального оборудования. Объединение же в рамках одного виртуального пространства моделей объектов и процессов горной технологии позволит получить цифровую модель горнодобывающего предприятия, что является базовым условиям перехода к четвертому технологическому укладу.

Следует также отметить, что наличие цифровой модели горнодобывающего предприятия открывает широкие возможности для автоматизации технологических процессов, повышения безопасности горных работ и перехода к малолюдным технологиям, что в конечном итоге обернется снижением затрат на добычу ПИ.

Опыт создания и функциональные возможности ГГИС MINEFRAME

В Горном институте Кольского научного центра РАН такая система, получившая название MINEFRAME, успешно развивается уже более 20 лет. Работы по созданию ГГИС начались в 1997 г. и, несмотря на достаточно большой срок с момента начала работ, на сегодня MINEFRAME является одной из самых молодых ГГИС в мире. Разработка ведется в основном силами сотрудников института, наличие в котором широкого круга специалистов в области горной технологии и геоинформатики обеспечивает сбалансированное развитие основных направлений по автоматизации решения геологических, маркшейдерских и технологических задач. Тесный контакт с предприятиями, понимание специфики и реалий российской горной промышленности помогают развивать ГГИС MINEFRAME с учетом текущих и перспективных потребностей горняков. Следует отметить роль академика Н. Н. Мельникова, который с большим вниманием относился к работам, связанным с созданием ГГИС, и всемерно способствовал ее внедрению на горнодобывающих предприятиях страны.

Изначально ГГИС MINEFRAME задумывалась как информационная система комплексной автоматизации решения геологических,

маркшейдерских и технологических задач. К моменту начала работ по созданию MINEFRAME на российском рынке уже появились как импортные, так и отечественные программные продукты, направленные на решение данных задач [8]. Анализ функционала этих систем и методов работы с моделями объектов горной технологии позволил сформулировать основные требования к создаваемой ГГИС, которые во многом определили ее отличительные особенности.

1. Модель объекта представляет собой структуру, хранящуюся в БД как единое целое. Данный подход обеспечивает целостность моделей и упрощает работу с ними особенно в том случае, когда необходимо оперировать сотнями и тысячами моделей.

2. Модели объектов хранятся в реляционной БД, а форма хранения позволяет организовать многопользовательский режим работы в рамках одного или нескольких проектов.

3. Для защиты моделей от несанкционированного изменения всем пользователям устанавливается уровень доступа к определенным группам моделей, а любые изменения автоматически фиксируются в электронном журнале, используя который можно восстановить измененные модели.

В состав ГГИС MINEFRAME входят 4 программы [9]:

- многооконный графический редактор GEOTECH-3D, содержащий инструменты для работы с моделями объектов горной технологии в трехмерном виртуальном пространстве;
- редактор геологической БД GEOTOOLS, обеспечивающей формирование БД геологического опробования месторождения, формирование геологической колонки и выделение рудных интервалов;
- программа управления БД GEOUSERS, содержащая список пользователей, имеющих доступ к данным с установленными ограничениями, а также инструменты восстановления измененных моделей объектов;
- программа-справочник БД технологического оборудования и расходных материалов MINEGEAR, предназначенная в перспективе для формирования моделей технологических комплексов.

Функционал и архитектура ГГИС MINEFRAME позволяют использовать ее как в качестве индивидуальных рабочих мест геологов, маркшейдеров, технологов, так и в качестве геоинформационной системы горнодобывающего предприятия [10], позволяющей за счет режима коллективного доступа к моделям объектов горной технологии и развитых средств 3D-визуализации формировать единое виртуальное пространство предприятия.

В результате адаптации ГГИС к потребностям и условиям работы различных горнодобывающих предприятий ее функционал постоянно пополняется инструментами автоматизации решения новых задач. В качестве примера можно отметить следующие из них.

Геомеханическое обеспечение подземных горных работ. Инструменты автоматизации решения этой задачи включают передачу данных из GEOTECH-3D в программу расчета напряженно-деформированного состояния массива и визуализацию результатов расчета в графической среде GEOTECH-3D совместно с моделями горно-геологических объектов [11], микросейсмических событий и полей распределения их плотности и энергии [12]. Представление результатов расчета НДС и мониторинга в виртуальном пространстве техногенно нарушенного массива дает более полное представление о его геомеханическом состоянии.

Автоматизированное планирование горнопроходческих работ [13, 14], включающее автоматическую разбивку моделей выработок на участки проходки в определенный период времени с оценкой объема извлекаемой горной массы, количества и качества руды (рис. 1). Результаты разбивки отображаются на календарном графике работ, что позволяет рациональным образом задать время реализации этапов (с учетом возможностей технологических комплексов), распределить оборудование и в режиме имитации просмотреть на моделях последовательность формирования запроектированных выработок. Варианты планов, так же, как и проектных решений, сохраняются в БД, что облегчает процедуры анализа и выбора наиболее эффективных сценариев развития горных работ.

Автоматизированное планирование закладочных работ [10], позволяющее с учетом геометрии заполняемого твердеющими смесями пространства оценить не только расход материалов, но также и будущие контуры искусственного объекта (рис. 2). Результаты планирования и фактического исполнения сохраняются в виде 3D-моделей в БД и могут использоваться для принятия последующих технологических решений.

Оценка конструктивных потерь и разубоживания при ведении открытых горных работ с учетом границ конечного контура карьера и направления его углубки (рис. 3). Автоматизация этой процедуры, основанная на анализе контактов рудного тела с пустой или слабоминерализованной ГП, позволяет повысить точность оценки и ускорить время выполнения этой работы.

Автоматизированное проектирование скважинной отбойки. Взрывная подготовка горной массы перед ее выемкой является одним из самых сложных технологических процессов как при проектировании, так и при реализации. Для автоматизации процесса проектирования созданы два набора инструментов, один из которых предназначен для

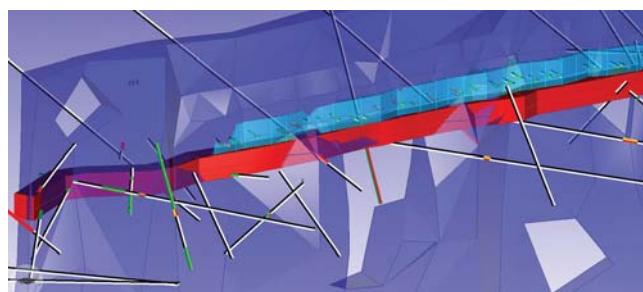


Рис. 1. Планирование горных работ при слоевой системе разработке

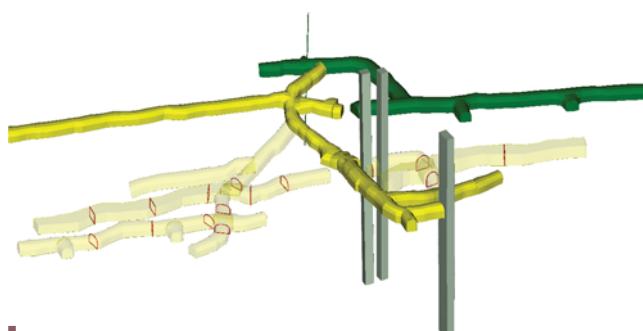


Рис. 2. Закладочные секции

открытых горных работ, а другой – подземных. В основе программных средств автоматизации, реализованных в инструментах, лежит работа с моделями рудных тел (каркасными и блочными), содержащими информацию о пространственном распределении типов ГП и содержания в них ПИ; с каркасными моделями карьера или подземных горных выработок, несущих информацию о геометрии исходной поверхности; со средствами имитационного моделирования действия взрыва скважинных зарядов, а также визуализации его результатов.

Для задания области размещения взрывных скважин при *открытых горных работах* формируется модель взрывного блока [15]. Если блок представлен типами ГП с отличающимися упругопрочностными характеристиками, то его разбивают на участки. Выбирают или формируют конструкцию зарядов (включая выбор диаметра скважины) для скважин 1, 2-го ряда, контурных и отбойных. Для каждой конструкции, исходя из энергетических и геометрических характеристик заряда, а также упругопрочностных характеристик ГП, рассчитывают параметры действия взрыва, на основе которых рассчитывают рациональные расстояния между взрывными скважинами. С использованием инструментов автоматизированного размещения формируют модели взрывных скважин и схему их коммутации. Проверку проектного решения осуществляют в режиме имитационного моделирования короткозамедленного взрыва скважинных зарядов, где на основе расчетных величин напряжений от действия взрыва зарядов на одно замедление находят поверхность отрыва и рассчитывают начальный вектор вылета оторванных от массива фрагментов. Использование уравнений баллистики с учетом механизма обмена импульсами скорости при столкновении фрагментов позволяет рассчитывать траекторию их перемещения и моделировать геометрию поверхности раз渲ала (рис. 4). Процесс моделирования массового взрыва записывается и при анализе может быть воспроизведен в режиме реального или замедленного времени. Отслеживание траектории перемещения фрагментов позволяет прогнозировать распределение ПИ в раз渲але, что используется инструментами оперативного планирования добычи.

При *подземных горных работах* модели взрывных скважин формируются с учетом параметров буровых установок, геометрии выработок и поверхности выработанного пространства, где осуществляется отбойка. При формировании конструкции зарядов и расчете параметров взрыва используются те же программные средства, что и для карьерных взрывов. При размещении моделей скважин автоматически учитывается наличие выработанного пространства по траектории скважины, что влияет на ее длину и местоположение соседних скважин. Проверка проектного решения осуществляется в режиме имитационного моделирования короткозамедленного взрыва скважинных зарядов с использованием тех же программных средств, что и для карьерных взрывов. Результатом имитационного моделирования является поверхность отрыва, прогнозирование которой особенно важно для снижения разубоживания и потерь ПИ при разработке маломощных рудных месторождений. Наличие границ отбойки, а также прогнозного распределения в объеме выемочной единицы качества и крупности раздробленной руды формирует исходные данные для моделирования и оптимизации режима выпуска руды.

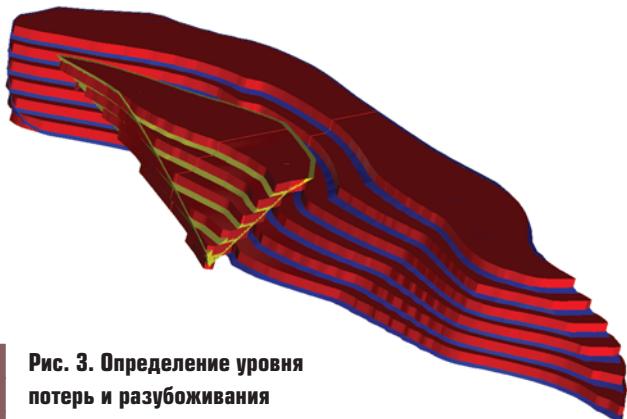


Рис. 3. Определение уровня потерь и разубоживания на открытых горных работах

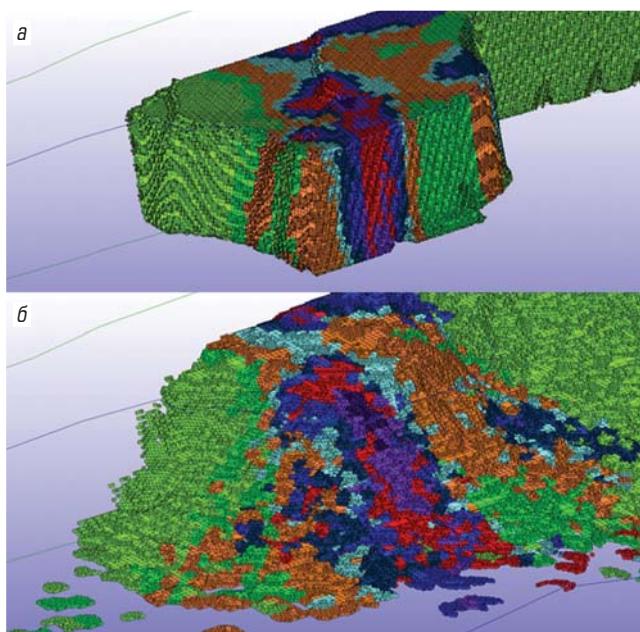


Рис. 4. Моделирование массового взрыва:
а, б – распределение ПИ в блоке до и после взрыва

Для подготовки проектной документации используются средства автоматизированного формирования графических и табличных материалов. В то же время наличие цифровых данных по пространственному местоположению каждой взрывной скважины позволяет передавать эти данные непосредственно в бортовой компьютер буровой установки, что обеспечивает безбумажный способ передачи технологического задания. Обратная передача данных о фактически пробуренных скважинах в ГГИС позволяет контролировать как процесс бурения, так и соответствие факта проекту.

Заключение

Более детальное по сравнению с другими инструментами описание программных средств автоматизированного проектирования скважинной отбойки сделано для того, чтобы показать возможности ГГИС с позиции соответствия требованиям «Индустрии 4.0». Переход от моделирования объектов горной технологии к ее процессам позволяет создавать цифровые двойники

горнодобывающих, а в перспективе и горно-обогатительных предприятий, где в едином виртуальном пространстве решаются задачи проектирования и планирования горных работ, обеспечения их безопасности, управления горными работами на основе диспетчеризации горнотранспортного оборудования, контроля за перемещением персонала и состоянием воздушной среды. Все

это наряду с широким использованием дистанционно управляемой и роботизированной техники создает условия для перехода к малолюдным технологиям добычи и обогащения ПИ. В связи с этим развитие российских программных средств в области горного дела является не только важной задачей импортозамещения, но и обеспечения технологической независимости страны.

Библиографический список

1. Yeates G. The mining industry disrupted: How 'industry 4.0' will fundamentally change the global mining industry // AusIMM Bulletin. 2017. April.
2. Взгляд в будущее или какие изменения грядут в добывающей промышленности до 2050 года / Dassault Systèmes, 2019. URL: <https://blogs.3ds.com/russia/natural-resources-by-2050/> (дата обращения: 23.04.2019).
3. Mustacoglu A. F., Fox G. C. A novel digital information service for federating distributed digital entities // Information Systems. 2016. Vol. 55. P. 20–36.
4. Anderson N. G. Information as a physical quantity // Information Sciences. 2017. Vol. 415–416. P. 397–413.
5. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. – Cologny/Geneva, 2016. – 198 p.
6. Zenkov I. V., Nefedov B. N., Zayats V. V., Kiryushina E. V. Remote monitoring of mining situation and disturbed land ecology at the Teisk and Abagas iron ore deposits // Eurasian Mining. 2018. No. 1. P. 41–44. DOI: 10.17580/em.2018.01.09
7. Kaputin Yu. E. Системы контроля содержаний (Grade Control) на горных предприятиях. – СПб.: Недра, 2012. – 330 с.
8. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы – история развития и современное состояние. – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2016. – 196 с.
9. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Современное состояние и перспективы развития горно-геологических информационных систем // ГИАБ. 2017. Спец. выпуск 23. Информационные технологии в реализации экологической стратегии развития горнодобывающей отрасли. С. 53–67.
10. Лукичев С. В., Наговицын О. В., Ильин Е. А., Рудин Р. С. Цифровые технологии инженерного обеспечения горных работ – первый шаг к созданию «умного» добывающего производства // Горный журнал. 2018. № 7. С. 86–90. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.17
11. Коzyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E. Опыт применения экспертных систем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород для выбора безопасных способов отработки рудных месторождений // Записки Горного института. 2012. Т. 198. С. 16–23.
12. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Просекин Б. А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // ФТПРИ. 2012. № 3. С. 3–13.
13. Белогородцев О. В., Савин Е. М. Планирование подземных горных работ в программном комплексе MINEFRAME // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ : сб. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием. – СПб. : Реноме, 2013. С. 318–321.
14. Громов Е. В., Belogorodcev O. V. Design of technological flowsheets for ore preconcentration and waste rocks disposal in mined space // Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. – Albena, 2015. Book 1. Vol. 3. P. 203–210.
15. Гурин К. П., Шишкин Л. С. Использование блочного представления массива горных пород для моделирования границы отрыва при взрыве скважинных зарядов // Геотехнология и обогащение полезных ископаемых : матер. VI Школы молодых ученых. – Апатиты : КНЦ РАН, 2015. С. 32–36. [\[PDF\]](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 51–55
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.06

Digital simulation in solving problems of surface and underground mining technologies

Information about authors

S. V. Lukichev¹, Director, Doctor of Engineering Sciences

O. V. Nagovitsyn¹, Deputy Director of Scientific Work, Doctor of Engineering Sciences, nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

According to the estimates of competent experts, the mature economies are at the first stage of the Fourth Industrial Revolution called to shape a new technological framework. A feature of this stage is technological innovations and improvement based on the wide application of digital information. Here belong such methods as Big Data, Robotics, Artificial Intelligence, Cloud Storage and cloud-based interpretation of data, Virtual and Augmented Reality, and Industrial Internet.

The critical element of a digital technology in terms of mining is the information system. The latter is meant to model components of mining technologies and to provide instruments for using the models in engineering support of mining operations. Such modeling involves mining and geological information systems (MGIS), as rule. Despite different implementation programs, all MGIS are compatible with vector, carcass and block models of problem solution in various areas of mining. On the whole, it can be stated that by now, within MGIS development, the instrumental framework has been created for digital simulation in mining technologies. The situation is worse in modeling process flowsheets while such models can promote optimization of engineering solutions, on the one hand, and offer a virtual model of real equipment operation, on the other hand.

Such MGIS named as MINEFRAME has been successively advanced by the Mining Institute, KSC RAS for more than 20 years. The features of MINEFRAME are:

1. Structure of models, which ensures integrity of model elements and simplifies operation;
2. Storage of models in data base, which enables multi-user mode of operation within one or a number of projects.
3. Protection of models from unauthorized changing; to this effect, a user is granted access to certain models and any change is automatically recorded in an e-log which can be used to recover the changed models.

The MINEFRAME functional and architecture allow using this MGIS both as individual workplace of geologists, surveyors, or technologies, or as a geoinformation system of mine. In the latter case, due to multiuser access to the models of objects of a mining technology and thanks to 3D visualization facilities, it is possible to generate a uniform virtual mine space.

Keywords: mining industry, digital twin, mining, mining planning, mining and geological information system, large-scale blast design, automated design.

References

1. Yeates G. The mining industry disrupted: How 'industry 4.0' will fundamentally change the global mining industry. AusIMM Bulletin. 2017. April.
2. Looking into the future, or oncoming changes in the mining industry up to 2050. Dassault Systèmes, 2019. Available at: <https://blogs.3ds.com/russia/natural-resources-by-2050/> (accessed: 23.04.2019).
3. Mustacoglu A. F., Fox G. C. A novel digital information service for federating distributed digital entities. Information Systems. 2016. Vol. 55. pp. 20–36.
4. Anderson N. G. Information as a physical quantity. Information Sciences. 2017. Vol. 415–416. pp. 397–413.
5. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Cologny/Geneva, 2016. 198 p.
6. Zenkov I. V., Nefedov B. N., Zayats V. V., Kiryushina E. V. Remote monitoring of mining situation and disturbed land ecology at the Teisk and Abagas iron ore deposits. Eurasian Mining. 2018. No. 1. pp. 41–44. DOI: 10.17580/em.2018.01.09
7. Kaputin Yu. E. Cutoff grade control in mines. Saint-Petersburg : Nedra, 2012. 330 p.
8. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. Mining and geological information systems—History and state-of-the-art. Apatity : Izdatelstvo KNTs RAN, 2016. 196 p.
9. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. Current state and prospects for the development of mining and geological information systems. GIAB. 2017. Special Issue 23. Information technologies in implementation of ecological strategy in the mining industry development. pp. 53–67.
10. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Ilin E. A., Rudin R. S. Digital technologies for sustainable engineering in mining – The first step towards a "smart mine". Gornyi Zhurnal. 2018. No. 7. pp. 86–90. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.17
11. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E. Experience in expert systems application for estimation of stress- strain state of rock mass for selection of safe methods of ore deposits mining. Zapiski Gornogo instituta. 2012. Vol. 198. pp. 16–23.
12. Rasskazov I. Y., Saksin B. G., Petrov V. A., Prosekin B. A. Geomechanics and seismicity of the antey deposit rock mass. Journal of Mining Science. 2012. Vol. 48, Iss. 3. pp. 405–412.
13. Belogorodtsev O. V., Savin E. M. Underground mining planning in MINEFRAME software environment. Monitoring of natural and induced processes in mining : Proceedings of All-Russian Scientific–Technical Conference with International Participation. Saint-Petersburg : Renome, 2013. pp. 318–321.
14. Gromov E. V., Belogorodcev O. V. Design of technological flowsheets for ore preconcentration and waste rocks disposal in mined space. Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. Albena, 2015. Book 1, Vol. 3. pp. 203–210.
15. Gurin K. P., Shishkin L. S. Block representation of rock mass for modeling boundary of cleavage under blasting. Geotechnology and mineral beneficiation : Proceedings of VI School of Young Scientists. Apatity : Izdatelstvo KNTs RAN, 2015. pp. 32–36.