

УДК 622:004.9:519.67

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ



С. В. ЛУКИЧЁВ,
директор, д-р техн. наук, s.lukichev@ksc.ru



О. В. НАГОВИЦЫН,
зам. директора, д-р техн. наук

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

Сегодня уже не вызывает сомнения тот факт, что цифровые технологии из элемента автоматизации труда отдельных специалистов превращаются в базис нового технологического уклада – цифровую экономику. Применительно к промышленности цифровая трансформация проходит под флагом перехода к «Индустрии 4.0», где основными элементами, обеспечивающими качественное изменение технологий и организации производства, являются:

- большие данные, искусственный интеллект и продвинутая аналитика [1];
- виртуальная и дополненная реальность, выводящие цифровое моделирование, проектирование и планирование на качественно новый уровень;
- Интернет вещей, обеспечивающий системную интеграцию оборудования в технологическую цепочку [2];
- роботизация, заменяющая человека при выполнении рутинных и опасных операций;
- облачные и интернет-сервисы, предоставляющие услуги хранения и обработки данных с использованием программных средств без приобретения их носителей.

Переход на цифровые технологии способен в какой-то мере компенсировать рост операционных затрат на добычу полезных ископаемых, которые, по оценке консалтинговой компании McKinsey, для горнодобывающих компаний за 10 лет с 2004 по 2014 г. в среднем выросли на 90 % [3]. В подтверждение этого можно привести данные [2], по которым усредненные эффекты от цифровизации оцениваются следующими значениями: прирост прибыли за счет роста производительности труда и снижения издержек – 10–15 %; повышение объема выпуска продукции

Приведены основные особенности применения цифровых технологий в горнодобывающем производстве при переходе к «Индустрии 4.0» и технологические и экономические последствия такого перехода. Сделан вывод о необходимости интеграции решений в области цифрового моделирования объектов и процессов горного производства с созданием отечественной цифровой платформы горно-геологической информационной системы.

Ключевые слова: «Индустрия 4.0», цифровой двойник, горные работы, горно-геологическая информационная система, MINEFRAME, цифровая трансформация.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.01

за счет снижения простоя оборудования – 10–15 %; ускорение процесса проектирования, производства и доставки – 100–150 %; снижение затрат на проведение натурных испытаний за счет использования цифрового моделирования – 50–70 %; снижение затрат по всему циклу управления цепочками поставок – 20–30 %; снижение затрат за счет совершенствования технологических операций ~30%. В качестве конкретного примера можно привести компанию Rio Tinto Group, которая в Австралии на четырех своих рудниках использует 73 роботизированных грузовика для перевозки железной руды [4]. Автономные устройства работают 24 часа 7 дней в неделю. Роботизация самосвалов позволяет экономить до 15 % транспортных затрат – крупнейшей статье эксплуатационных расходов рудника.

История цифровизации горного дела

Процесс проникновения цифровых технологий (практически до конца первого десятилетия XXI века в основном использовался термин – «информационные технологии») в горное производство начался с конца 1960-х годов и шел в направлении автоматизации работы отдельных категорий специалистов (геологов, маркшейдеров, технологов, экономистов и др.) с постепенным формированием общего цифрового пространства горнодобывающего предприятия. Характерной особенностью того периода являлось замыкание программных решений и информационных систем на конкретные задачи предприятий и их вычислительные ресурсы. Для такого рода информационных систем, по сути, самодостаточных, используется термин In-System. В решении проблемы внедрения цифровых технологий участвовали как сами предприятия, создавая группы программистов, так и профильные министерства, привлекая к этой работе вузы, научно-исследовательские и проектные организации. С начала и до конца 1980-х годов в СССР было реализовано несколько отраслевых программ по созданию систем автоматизированного проектирования горных работ. В реализации этих программ участвовали такие организации, как Южгипрошахт,

Гипроруда, ИПКОН АН СССР, ВИОГЕМ, Гипроникель, Унипромедь, СГИ, ВНИИцветмет, Казгипроцветмет, КазПТИ, Институт кибернетики АН УзССР, ИГД УрО АН СССР, ИГД АН КазССР, Криворожский горнорудный институт, Кузбасгипрошахт, Сибгипрошахт [5]. В то время на горнодобывающих предприятиях было разработано и внедрено несколько информационных систем, которые скорее показывали потенциал цифровых технологий, чем реально влияли на повышение эффективности производства.

Распад СССР привел к ликвидации подавляющего большинства коллективов, занимавшихся созданием программных средств для решения задач горной технологии. На территории постсоветского пространства выжили единичные группы, в основном благодаря наличию конкретного предприятия-заказчика, заинтересованного в поддержании и развитии ранее внедренных информационных систем. В это же время на Западе разработка геоинформационных систем, получивших применительно к горному делу название «Горно-геологические информационные системы» (ГИС), активно продолжалась. Этому в значительной степени способствовало появление персональных компьютеров, развитие средств разработки программного обеспечения и систем управления базами данных. Первые западные ГИС появились в России в начале 1990-х годов [6], часть из которых в настоящее время широко используется горнодобывающими предприятиями, геологоразведочными и проектными организациями страны. Именно в то время у значительной части руководителей предприятий и пользователей ГИС сформировалось стойкое убеждение, что западные технологии, включая и информационные, на голову выше отечественных, и что российским разработкам программного обеспечения в области горного дела никогда не догнать западных конкурентов.

Справедливости ради надо отметить, что в то же время стали формироваться и новые единичные команды разработчиков отечественных информационных систем. Среди них можно отметить компанию «ВИСТ Групп», которая в начале 1990-х годов разработала и начала активно внедрять на горнодобывающих предприятиях автоматизированную систему управления горнотранспортными комплексами открытых горных работ «КАРЬЕР». Сейчас компания, вошедшая в группу компаний «Цифра», успешно работает в области роботизированной горной техники и малолюдных технологий добычи полезных ископаемых [7].

Состав и функциональные возможности ГИС MINEFRAME

Несмотря на скептическое отношение части горняков-производственников и ученых к идее разработки новой российской ГИС, обладающей функционалом для комплексного решения задач горной технологии и способной составить конкуренцию импортным системам, в 1997 г. Горный институт КНЦ РАН начал работы по созданию ГИС под названием MINEFRAME. Следует отметить, что разработка ГИС началась не на пустом месте. Исследования в области информатизации горной отрасли проводили в институте с конца 1970-х годов и концентрировали их на следующих направлениях: горно-геометрический анализ карьерных полей, планирование подземных горных работ, автоматизированное проектирование схемы проветривания подземного рудника,

численное моделирование и автоматизированное проектирование скважинной отбойки. В целом это соответствовало направлениям, развиваемым в стране и мире [8–17]. Следует отметить, что уже к началу 1980-х годов выявились основные направления применения компьютерных технологий в области горного дела, проявилась тенденция к интеграции на единой информационной основе решения таких задач, как геологическое моделирование и подсчет запасов полезных ископаемых, маркшейдерское обеспечение, проектирование и планирование горных работ. Для разработки программных средств появились и стали широко применяться методы объектно-ориентированного программирования, появились низкобюджетные варианты использования системы управления базой данных (СУБД). Все это позволило сформулировать основные требования к функционалу, архитектуре и интерфейсу MINEFRAME, которые заключались в следующем:

- функционал ГИС должен обеспечивать комплексное решение геологических, маркшейдерских и технологических задач на основе работы с унифицированными моделями объектов горной технологии (**рис. 1**), представляющих собой единый комплекс графической, числовой и атрибутивной информации, визуализируемой в форме векторных, каркасных и блочных моделей;
- архитектура ГИС должна обеспечивать многопользовательскую работу с базой данных (БД) коллективного контролируемого доступа; при этом реляционный принцип организации БД должен обеспечивать целостность данных, их сохранность и быструю реакцию на запросы;
- интерфейс ГИС должен обеспечивать простой способ управления БД, многооконный режим работы с моделями, экспорт и импорт моделей в форматы других графических приложений, настройку инструментов ГИС для формирования рабочих мест специалистов различного профиля.

Реализация этих требований вылилась в создание четырех программ, формирующих ГИС MINEFRAME:

1. *Графический редактор GEOTECH-3D*. Предназначен для моделирования объектов горной технологии и автоматизации решения на их основе геологических, маркшейдерских и технологических задач. Для реализации этого функционала GEOTECH-3D имеет стандартные (системные) инструменты, обеспечивающие формирование моделей объектов и управление ими, а также рабочие инструменты, предназначенные для автоматизации решения конкретных задач предметной области. Управление загрузкой из БД данных моделей и доступ к их свойствам осуществляется с помощью *Инспектора объектов*, используя который можно осуществлять корректировку координат, параметров и характеристик моделей. Особенностью многооконного режима работы GEOTECH-3D является возможность работы с разрезами различной ориентации, включая ломаные, что позволяет в интерактивном режиме осуществлять редактирование геометрии объекта сразу в нескольких проекциях. Общий вид GEOTECH-3D с элементами интерфейса представлен на **рис. 2**.

2. *Редактор БД геологического опробования GEOTOOLS*. Предназначен для формирования БД геологического (скважинного, бороздowego и шламового) опробования, их первичной обработки и графического представления. Имеет средства ввода

и редактирования данных, их импорта и экспорта, а также поиска по запросу. Инструментальные средства редактора позволяют автоматизировать работу, связанную с формированием рудных интервалов по заданным кондициям, а также осуществлять автоматический переход по заданному пользователем алгоритму от элементного состава к технологическим характеристикам проб. Данные опробования могут быть отнесены к определенным профилям (например, разведочным), блокам (например, взрывным) и типам (например, детальной и эксплуатационной разведки). Работа с БД геологического опробования в режиме геометрического моделирования, оценки запасов полезных ископаемых и решения технологических задач осуществляется в среде GEOTECH-3D.

3. Редактор БД технологического оборудования MINEGEAR – предназначен для ведения БД по технологическому оборудованию и расходным материалам. На основе этих данных формируются технологические комплексы, технико-экономические характеристики которых используются для планирования горных работ и оценки затрат на их ведение.

4. Программа обслуживания БД GEOUSERS. Предназначена для администрирования БД, их архивирования, резервного копирования, восстановления и изменения структуры. Программа обслуживает три типа БД: объектов горной технологии; геологического опробования; технологического оборудования. Важной функцией GEOUSERS является назначение прав пользователей на доступ к различным типам моделей объектов и контроль-журналирование их действий над объектами, что является необходимым условием для реализации многопользовательского режима функционирования ГГИС. Наличие журнала изменения объектов позволяет установить, кто их сделал, и при необходимости восстановить измененный объект.

Состав и функционал ГГИС MINEFRAME позволяет формировать компьютерную технологию инженерного обеспечения открытых и подземных горных работ применительно к условиям конкретного горнодобывающего предприятия, что, по сути, означает создание единого цифрового технологического пространства предприятия с перспективой реализации на этой основе роботизированных технологий горного производства.

Опыт внедрения MINEFRAME на десятках горнодобывающих предприятиях России позволяет говорить о хороших адаптивных возможностях ГГИС применительно к различным горно-геологическим условиям и масштабам производства. На сегодня в числе предприятий, использующих MINEFRAME, можно назвать ПАО «ППГХО», АО «СЗФК», ОАО «Оренбургские минералы», ОАО «Боксит Тимана», ОАО «Ураласбест», рудники холдингов «АЛРОСА», «РУСАЛ и многие другие. Общее число лицензированных рабочих мест превышает 500.

Одним из путей оптимизации технологических решений и сокращения времени на их получение является использование системного подхода, реализованного на основе моделирования объектов и процессов горной технологии, где сложная система (технология) представлена совокупностью связанных между собой элементов (степень дефрагментации зависит от решаемой задачи), моделирующих свойства и «поведения» реальных объектов [18]. Проиллюстрировать это можно на примере проектирования подземных

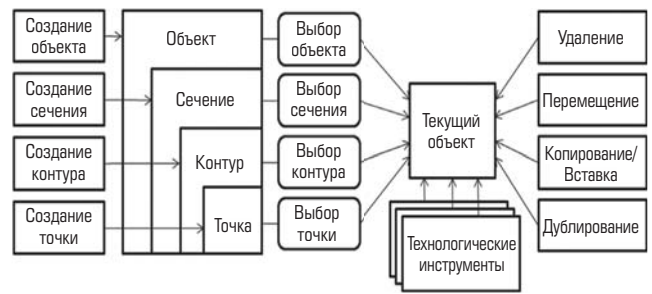


Рис. 1. Схема унификации операций с моделями объектов, имеющими применительно к MINEFRAME иерархическую структуру

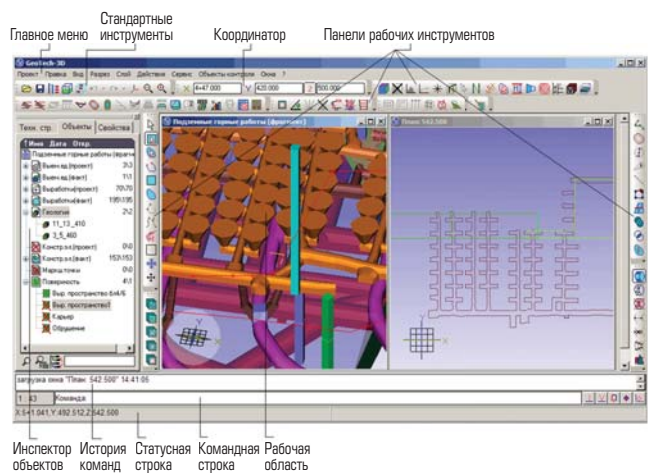


Рис. 2. Элементы интерфейса GEOTECH-3D

горных работ для месторождений с высоким уровнем напряжений, где технологические решения, связанные с формированием горных выработок и развитием фронта горных работ, должны оцениваться с позиции геомеханической безопасности. Суть подхода, реализованного на основе инструментария MINEFRAME, заключается в использовании итерационного метода поиска оптимального варианта технологии при последовательной проверке конструктивных решений с расчетом напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород.

Схематично это выглядит следующим образом. На основе экспорта моделей (геологической среды, выработок, рельефа поверхности и выработанного пространства) из GEOTECH-3D в SIGMA GT [19] формируется конечно-элементная геомеханическая модель для расчета НДС. По результатам расчета НДС оценивают уровень действующих в массиве напряжений и вносят корректировку в конструкцию и параметры моделей элементов системы разработки. При необходимости результаты расчета НДС могут визуализироваться в среде GEOTECH-3D, что дает дополнительную информацию для анализа. После ряда итераций находят приемлемое с экономической точки зрения решение, обеспечивающее безопасное ведение горных работ. Использование при планировании горных работ результатов микросейсмического мониторинга массива, представляемого в GEOTECH-3D в виде локаций

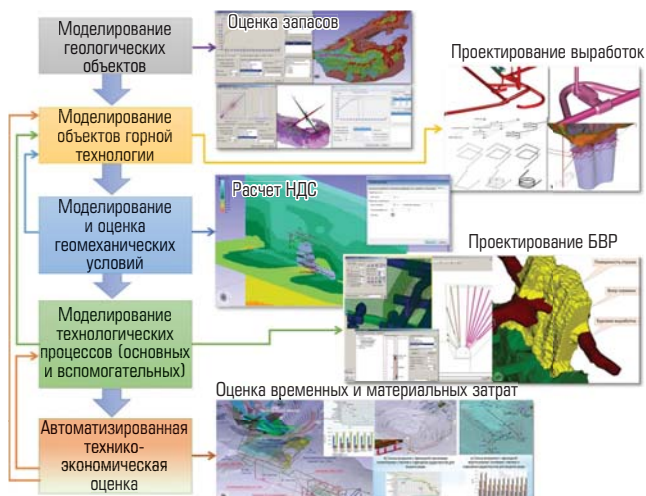


Рис. 3. Схема реализации итерационного подхода при выборе оптимального варианта подземной разработки на удароопасных месторождениях

мест микроразрушений массива [20], позволяет оценить фактическую реакцию массива на действующие в нем напряжения. На рис. 3 представлены реальные технологические и геомеханические модели, которые были получены при выполнении предпроектных исследований для ряда горнодобывающих предприятий Мурманской области.

Следует также отметить, что с применением ГГИС MINEFRAME в Горном институте КНЦ РАН выполняется большинство научно-исследовательских и хозяйственных работ, связанных с обоснованием технологических решений по ведению открытых и подземных горных работ, а также технико-экономической оценкой технологии разработки месторождений полезных ископаемых. Выполнение этих работ позволяет развивать функционал MINEFRAME (на сегодня он уже содержит более 200 рабочих инструментов, автоматизирующих решение большинства задач открытой и подземной геотехнологии) с учетом требований отечественной горной промышленности.

ГГИС MINEFRAME включена в Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных, утвержденный постановлением Правительства РФ № 1236 «Об установлении запрета на допуск программного обеспечения, происходящего из иностранных государств, для целей осуществления закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд» от 16 ноября 2015 г.

Перспективы развития ГГИС

Развитие функционала представленных на рынке России ГГИС, включая и MINEFRAME, позволяет переходить от моделирования объектов горной технологии к моделированию ее процессов, что свидетельствует о близких перспективах создания цифрового двойника горнодобывающего предприятия. Но для формирования полноценного цифрового двойника требуется онлайн-связь с технологическим оборудованием, что на сегодня в наилучшей степени реализуется через Интернет вещей, который, в свою

очередь, не может существовать без развитых сетей связи и цифрового управления оборудованием. Таким образом, происходит не только переход к цифровому проектированию и планированию горных работ, но меняются и способы управления горным оборудованием, где ручное управление во все большем масштабе замещается автоматизированным и автономным. Одновременно меняется и практика владения оборудованием, фирмы-изготовители начинают предлагать его в аренду с гарантией сервисного обслуживания на протяжении всего жизненного цикла. Для реализации этого процесса оборудование оснащается датчиками, отслеживающими параметры его работы и передающими эту информацию сервисным центрам фирм-изготовителей. Таким образом, информационная система горнодобывающего предприятия из закрытой In-System превращается в открытую Out-System, чему также способствует всевозрастающая мировая практика использования облачных и интернет-сервисов для удешевления различных бизнес-процессов. В целом масштаб изменений, обусловленных цифровой трансформацией, можно оценить по прогнозам McKinsey [21]. В соответствии с ними, не менее 30 % функций в рамках профессий могут быть автоматизированы на текущем уровне развития технологий, и около 14 % мировой рабочей силы к 2030 г. вынуждены будут сменить профессию. Применительно к условиям России 49,3 % рабочих мест могут быть ликвидированы в случае одномоментной автоматизации [22].

Масштаб и сложность цифровой трансформации как отдельных предприятий, так и в целом горнодобывающей отрасли предполагают серьезные изменения не только в технологии инженерного обеспечения и ведения горных работ, но и в методах перехода на цифровые технологии [23]. Сегодня даже очень крупные предприятия не могут себе позволить, как раньше, содержать большие группы специалистов в области IT-технологий, занимающихся самостоятельно созданием корпоративных информационных систем и их постоянным развитием.

Для создания удобной для использования техническими специалистами предприятия цифровой инфраструктуры требуется глубокая интеграция инструментов проектирования, планирования, управления горными работами и оборудованием, материально-технического обеспечения технологических процессов, обеспечения безопасности горных работ [24, 25]. А с учетом того, что, как правило, горнодобывающие предприятия имеют обогатительные производства, создание цифрового двойника предполагает объединение в единое цифровое пространство горного и обогатительного комплексов. Решение подобных задач под силу только специализированным компаниям или их объединениям, обладающим программно-техническими решениями в этой области. Процесс создания таких фирм уже идет и очень важно, чтобы на российском рынке присутствовали не только зарубежные компании, но и российские, обеспечивающие тем самым технологическую независимость страны в этом важном для формирующейся цифровой экономики направлении.

Заключение

Цифровые технологии в горной отрасли формируются на научных знаниях из области наук о Земле, математики, физики,

экономики, информатики, робототехники, где они через алгоритмы и программные средства реализуются в виде системно интегрированных инструментов решения задач горной технологии. Масштабность задач и большая доля научной составляющей предполагают высокую степень кооперации работы различных научных коллективов и предприятий-производителей современной горной техники. К сожалению, состояние и того и другого в настоящее время в стране не позволяют в полной мере решать задачи импортозамещения. Итоги проводимых в институте конференций, посвященных развитию информационных технологий (первая из них прошла в 1979 г.), других российских конференций с подобной тематикой, позволяют констатировать,

что данная работа ведется в основном группами специалистов в инициативном порядке, без должной координации, целевой направленности и, как следствие, без серьезной финансовой поддержки. Одним из способов интеграции решений в области цифрового моделирования объектов и процессов горного производства является создание цифровой платформы и открытие ее функционала для сторонних разработчиков программного обеспечения. В связи с этим одним из важных направлений развития ГГИС MINEFRAME является ее постепенное превращение в такой программный продукт.

Исследования выполнены в рамках государственного задания № 0226-2019-0062.

Библиографический список

- Huang L., Balamurali M., Silversides K. L. Machine learning classification of geochemical and geophysical data // Mining Goes Digital : Proceedings of the 39th International Symposium "Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry". Proceedings in Earth and geosciences series. — London : Taylor & Francis Group, 2019. Vol. 3. P. 101–105.
- Feng S., Ding E. Designing top layer in Internet of Things for underground mines // Mining Goes Digital : Proceedings of the 39th International Symposium "Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry". Proceedings in Earth and geosciences series. — London : Taylor & Francis Group, 2019. Vol. 3. P. 695–702.
- Canart G., Kowalik L., Moyo M., Raj Kumar Ray. Has global mining productivity reversed course? / McKinsey & Company, 2020. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/has-global-mining-productivity-reversed-course> (дата обращения: 02.06.2020).
- Iron Ore / RioTinto, 2020. URL: <https://www.riotinto.com/products/iron-ore> (дата обращения: 02.06.2020).
- Разработка и применение систем автоматизированного проектирования и АСУ горного производства : Тез. докл. Всесоюзного научно-технического совещания : в 2 ч. — Алма-Ата : КазПТИ, 1987.
- Клебанов А. Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. 2020. № 1(149). С. 8–11.
- 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.
- Хохряков В. С. Технично-экономические основы создания математической модели карьера // Известия вузов. Горный журнал. 1963. № 11. С. 59–63.
- Опыт применения современных математических методов и ЭВМ в планировании и проектировании открытых горных работ / под ред. В. В. Ржевского. — М. : ЦНИИУголь, 1967. — 71 с.
- Виницкий К. Е., Реентович Э. И. Применение математических методов при проектировании карьеров. — М. : ЦНИИУголь, 1968. — 113 с.
- Matheron G. Traité de géostatistique appliquée. — Paris, 1962. Tome. 1. — 334 p.
- Шехмейстер Ш. Я., Арсеньев С. Я., Прудовский А. Д. и др. Использование математических методов и электронно-вычислительных машин при проектировании горно-рудных предприятий // Горный журнал. 1969. № 8. С. 12–16.
- Насонов И. Д. Моделирование горных процессов. — М. : Недра, 1969. — 206 с.
- Васильев М. В., Аленичев В. М., Сивков М. Н. К вопросу представления горно-геологической информации в ЭВМ // ФТПРПИ. 1974. № 4. С. 81–87.
- Хохряков В. С., Яшкин А. З. Математическое моделирование сложноструктурных многокомпонентных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 1976. № 9. С. 3–6.
- Симкин Б. А., Шкута Ю. К. Аналитическое моделирование месторождений и их открытой разработки. — М. : Наука, 1976. — 152 с.
- Григоренко А. Г. Статистические методы при разведке недр. — Киев : Техника, 1974. — 208 с.
- Лукичев С. В., Наговицын О. В. Моделирование объектов и процессов горной технологии как основа системного подхода к решению задач горного производства // ФТПРПИ. 2018. № 6. С. 180–189.
- Kozyrev A. A., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Semenova I. E. Technological and geomechanical modelling for mining safety improvement // Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry : Proceedings of the 37th International Symposium APCOM 2015. — Fairbanks, 2015. P. 411–419.
- Лукичев С. В., Наговицын О. В., Ильин Е. А., Рудин Р. С. Цифровые технологии инженерного обеспечения горных работ — первый шаг к созданию «умного» добычного производства // Горный журнал. 2018. № 7. С. 86–90. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.17
- Manyika J., Lund S., Chui M., Bughin J., Woetzel J. et al. Jobs lost, jobs gained: What the future of work will mean for jobs, skills, and wages / McKinsey & Company, 2017. URL: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/jobs-lost-jobs-gained-what-the-future-of-work-will-mean-for-jobs-skills-and-wages> (дата обращения: 06.05.2020).
- Земцов С. П. Потенциальная роботизация и «экономика незнания» в регионах России // XIX Апрельская междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества. — М. : НИУ ВШЭ, 2018.
- Открытые горные работы — XXI век : справочник / под ред. К. Ю. Анистратова. — М. : ООО «Система максимум», 2019. Т. 2. — 872 с.
- Клебанов А. Ф. Развитие принципов формирования интегрированной информационной системы и ее взаимодействие с управляющей системой диспетчеризации «Карьер» // ГИАБ. 2014. № 10. С. 314–320.
- Dimitrakopoulos R. Advances in Applied Strategic Mine Planning. — Cham : Springer, 2018. — 800 p. [ГЖ](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 13–18
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.01

Digital transformation of mining industry: Past, Present and Future

Information about authors

S. V. Lukichev¹, Director, Doctor of Engineering Sciences, s.lukichev@ksc.ru

O. V. Nagovitsin¹, Deputy Director, Doctor of Engineering Sciences

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

Abstract

The paper describes the principal features of applying digital technologies in mining when switching to Industry 4.0 and presents the technological and economic consequences. The authors show evolution of information technologies in mining from the mid-1960s up to the present day. The Mining and Geological Information System (MGIS) MINEFRAME is used as an example to demonstrate potential of modern geoinformation systems in solving various tasks such as geological modeling and reserve estimation, survey support, as well as design and planning of mining operations. MINEFRAME's structure and functionality allows creating a computer technology of engineering support of open and underground mining for certain mine conditions. This makes it possible to come to generation of united

digital technological space of a mine and, based on it, to create robotized mining technologies. One of the ways of optimizing technological decisions is application of a system approach through modeling of geotechnical objects and processes in mines. The wide range of tasks of mining digitalization and a big share of the scientific component suppose high degree of cooperation to be carried out by different scientific teams and manufacturers of modern mining equipment.

The authors make a conclusion on necessary integration of decisions in digital modeling of mining objects and processes with creation of a domestic digital MGIS platform.

The studies were carried out under state assignment No. 0226-2019-0062.

Keywords: Industry 4.0, digital twins, mining operations, mining and geological information system, MINEFRAME, digital transformation.

References

1. Huang L., Balamurali M., Silversides K. L. Machine learning classification of geochemical and geophysical data. *Mining Goes Digital : Proceedings of the 39th International Symposium "Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry": Proceedings in Earth and geosciences series*. London : Taylor & Francis Group, 2019. Vol. 3. pp. 101–105.
2. Feng S., Ding E. Designing top layer in Internet of Things for underground mines. *Mining Goes Digital : Proceedings of the 39th International Symposium "Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry": Proceedings in Earth and geosciences series*. London : Taylor & Francis Group, 2019. Vol. 3. pp. 695–702.
3. Canart G., Kowalik L., Moyo M., Raj Kumar Ray. Has global mining productivity reversed course? McKinsey & Company, 2020. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/has-global-mining-productivity-reversed-course> (accessed: 02.06.2020).
4. Iron Ore. RioTinto, 2020. Available at: <https://www.riotinto.com/products/iron-ore> (accessed: 02.06.2020).
5. Computer-aided engineering and management information systems for mines: Design and application. *Head-notes of All-Russian Conference Proceedings*. In two volumes. Alma-Ata : KazPTI, 1987.
6. Klebanov A. F. Automation and robotization in opencast mining: experience in digital transformation. *Gornaya promyshlennost*. 2020. No. 1(149). pp. 8–11.
7. 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.
8. Khokhryakov V. S. Technical and economic framework for mathematical modeling of open pit mine. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1963. No. 11. pp. 59–63.
9. Rzhevsky V. V. (Ed.). Experience of application of modern mathematical modeling methods and computers in open pit mine planning and design. Moscow : TsNIElугol, 1967. 71 p.
10. Vinnitsky K. E., Reentovich E. I. Application of mathematical methods in open pit mine planning. Moscow : TSNIElугol, 1968. 113 p.
11. Matheron G. *Traité de géostatistique appliquée*. Paris, 1962. Tome. 1. 334 p.
12. Shakhmeister Sh. Ya., Arseniev S. Ya., Prudovsky A. D. et al. Application of mathematical methods and computer machines in mine design. *Gornyy Zhurnal*. 1969. No. 8. pp. 12–16.
13. Nasonov I. D. Modeling of mining processes. Moscow : Nedra, 1969. 206 p.
14. Vasiliev M. V., Alenichev V. M., Sivkov M. N. Computer storage of mining-geological information. *Journal of Mining Science*. 1974. Vol. 10, No. 4. pp. 461–466.
15. Khokhryakov V. S., Yashkin A. Z. Mathematical modeling of structurally complex multi-component deposits. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 1976. No. 9. pp. 3–6.
16. Simkin B. A., Shkuta Yu. K. Analytical modeling of mineral deposits and open pit mining operations. Moscow : Nauka 1976. 152 p.
17. Grigorenko A. G. Statistical methods in mineral exploration. Kiev : Tekhnika, 1974. 208 p.
18. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V. Modeling objects and processes within a mining technology as a framework for a system approach to solve mining problems. *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54, Iss. 6. pp. 1041–1049.
19. Kozirev A. A., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Semenova I. E. Technological and geomechanical modelling for mining safety improvement. *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry : Proceedings of the 37th International Symposium APCOM 2015*. Fairbanks, 2015. pp. 411–419.
20. 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". *Gornyy Zhurnal*. 2018. No. 7. pp. 86–90. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.17
21. Manyika J., Lund S., Chui M., Bughin J., Woetzel J. et al. Jobs lost, jobs gained: What the future of work will mean for jobs, skills, and wages. McKinsey & Company, 2017. Available at: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/jobs-lost-jobs-gained-what-the-future-of-work-will-mean-for-jobs-skills-and-wages> (accessed: 06.05.2020).
22. Zemtsov S. P. Robotization potential and nescience economy in regions in Russia. *XX April International Conference on Economy and Society Development Problems*. Moscow : NIUVShE, 2018.
23. Anistratov K. Yu. (Ed.). Open pit mining – The 21st century. Reference book. Moscow : Sistema maksimum. 2019. Vol. 2. 872 p.
24. Klebanov A. F. Development of principles of integrated information system and its interaction with the Karier dispatch control system. *GIAB*. 2014. No. 10. pp. 314–320.
25. Dimitrakopoulos R. *Advances in Applied Strategic Mine Planning*. Cham : Springer, 2018. 800 p.

