

ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 622.012:681.3.01:519.67

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ КАК ОСНОВА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С. В. Лукичев¹, О. В. Наговицын²

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: ¹lu24@goi.kolasc.net.ru,
²Nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru, ул. Ферсмана, 24, г. Анатимы, Россия*

Современные тенденции развития средств информационной поддержки горного производства диктуют необходимость комплексного решения технологических задач на базе единой программной платформы, обеспечивающей возможность быстрой разработки нового функционала и адаптации существующего к условиям горного предприятия. При этом ключевое значение приобретает идеология построения и развития информационной системы, реализующей функции платформы. Опираясь на более чем двадцатилетний опыт развития горно-геологической информационной системы (ГГИС) MINEFRAME, можно констатировать, что наиболее оптимальный путь — создание объектно-ориентированной платформы, реализующей функции моделирования и управления горно-геологическими объектами с предоставлением разработчикам прикладных программ доступа к базовому функционалу ГГИС. Реализация такого подхода позволяет решать такие важные задачи, как повышение устойчивости работы программного обеспечения за счет ограничения доступа к программным средствам базового уровня, а также ускорение процесса развития функционала ГГИС благодаря возможности создания прикладных программ с использованием библиотеки процедур и функций платформы.

Горно-геологическая информационная система, проектирование, планирование, горные работы, системный подход, базы данных, компьютерное моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20180618

Горнодобывающее предприятие — сложная природно-техническая система, постоянно меняющаяся под воздействием технологических процессов, связанных с добычей полезного ископаемого. Это приводит к появлению выработанного пространства и последующему изменению его геометрии, что влияет на геомеханическое состояние массива горных пород и вызывает потерю его устойчивости. Горные работы ведутся в условиях ограниченного пространства с постоянной тенденцией понижения их высотной отметки, что увеличивает затраты на проветривание горных выработок и транспортирование горной массы. Сами горные работы связаны с перемещением больших объемов руды и вскрыши, что изменяет рельеф местности и отрицательно влияет на окружающую среду. Горнодобывающее предприятие работает в условиях рынка; это требует минимизации затрат при необходимости сохранения безопасности горных работ и снижения отрицательного воздействия на окружающую среду.

Любое изменение конструктивных параметров, например переход на более крутые борта карьера, обуславливает необходимость применения более сложной технологии ведения горных работ и увеличения затрат на обеспечение геомеханической безопасности. Практически любое изменение в цепочке технологических процессов приводит к снижению затрат в одном элементе и их увеличению в другом. Все перечисленное свидетельствует о необходимости использования системного подхода при решении задач проектирования и планирования горных работ. В настоящее время единственным методом, обеспечивающим такой подход, является компьютерное моделирование объектов и процессов горной технологии. Этому способствует стремительное развитие компьютерной техники и информационных технологий. Все большее применение в технической сфере получают:

- облачные технологии вычислений, хранения и интеллектуальной обработки данных;
- методы работы с большими данными (big data), позволяющие анализировать потоки данных, генерируемые техническими средствами и производствами, определять корреляционные зависимости между процессами;
- технологии искусственного интеллекта (нейронные сети) для повышения эффективности использования оборудования и минимизации влияния неопределенности исходных данных, связанных с недостаточным знанием природных условий (геологических, климатических, экологических) разработки полезных ископаемых.

Разработчики программного обеспечения для визуализации проектных решений и скрытых деталей геологической среды берут на вооружение такие технологии, как виртуальная и дополненная реальность. Эти решения помогают в обучении персонала и повышении безопасности труда, так как позволяют наглядно представлять и буквально вводить горнорабочих и операторов горного оборудования в реальную горнотехническую обстановку рабочих участков, не выходя из учебных классов.

Цифровая трансформация горной промышленности стала насущной необходимостью, пришло понимание того, что цифровые технологии приносят реальные преимущества. Появляется видение того, как цифровые технологии увеличивают ценность горного бизнеса за счет более полного использования данных и знаний о ресурсах (минеральных, оборудования, трудовых), применения средств оптимизации проектных и плановых решений, анализа и автоматизации технологических процессов. Тем не менее, цифровизация еще не стала приоритетом для большинства горных компаний не только в России, но и в мире. В [1] отмечается, что многие компании сталкиваются с серьезными проблемами в превращении своих долгосрочных перспектив в цифровую реальность. Наблюдается явный диссонанс между потенциалом компьютерных технологий и неудовлетворительным послужным списком их успешных реализаций на горных предприятиях. Внедрение цифровых технологий остается актуальной задачей для повышения эффективности горного производства и безопасности горных работ.

Состояние исследований в области информационных технологий горного дела достаточно полно представлено в [2–6], где затронуты как традиционные темы (планирование и проектирование горных работ, оценка минеральных ресурсов, учет факторов неопределенности и количественной оценки рисков новых проектов), так и новые, связанные с применением интернета вещей, больших данных, нейронных сетей и автономного горнотранспортного оборудования.

Таким образом, можно говорить о том, что созданы все предпосылки для перехода к решению задач горной технологии на основе системного подхода с учетом природных, технических, экономических факторов и их взаимного влияния друг на друга [7].

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В основе системного подхода лежит представление сложного объекта, каким является горнодобывающее предприятие, в виде отдельных связанных между собой элементов, в совокупности формирующих модель реального горного предприятия или, другими словами, — его цифровой двойник. Взаимодействие и изменение моделей элементов в пространстве и времени позволяет описать процессы трансформации массива горных пород под воздействием технологических процессов. При этом реализация технологических процессов связана с использованием материальных, трудовых и финансовых ресурсов, что формирует себестоимость горных работ. Объединение в рамках одного программного комплекса инструментальных средств моделирования объектов горной технологии, проектирования и планирования горных работ, визуализации результатов расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород и мониторинга его геомеханического состояния, имитационного моделирования технологических процессов и их автоматизированной технико-экономической оценки позволяет системно подойти к решению задач горной технологии.

Современные программные и аппаратные средства позволяют:

- моделировать процесс разработки месторождений полезных ископаемых, используя цифровые трехмерные модели геологической среды и объектов горной технологии. Для описания геометрии объектов используются триангуляционные поверхности, а для моделирования изменчивости свойств объектов — блочные конструкции. Современные методы лазерного сканирования и обработки фотоснимков позволяют быстро получать цифровые модели объектов с возможностью наложения на них текстуры поверхности, что повышает информативность и реалистичность моделей;
- обеспечивать хранение и режим коллективного использования моделей объектов и другой связанной с функционированием предприятия информации. С учетом того, что количество моделей объектов, формирующих общую модель рудника, может составлять десятки и сотни тысяч, их структурирование и возможность визуализации повышает оперативность работы специалистов и обеспечивает адекватное представление проектируемых и фактических объектов горной технологии;
- прогнозировать изменчивость или поведение природно-технических систем, используя специализированные алгоритмы и программы. Например, интерполяция данных геохимического опробования месторождения позволяет на основе точечных данных создать пространственную модель распределения содержания полезных ископаемых, расчет напряженно-деформированного состояния массива горных пород дает возможность оценить уровень напряжений в окрестностях выработок, а расчет распределения воздуха в сети выработок — оценить эффективность системы проветривания;
- осуществлять сбор и обработку данных мониторинга состояния массива, местоположения оборудования и персонала, рабочих характеристик горных машин и оборудования.

Используя различные компьютерные программы, можно решать большинство задач горной технологии. Но в силу того что эти программы используют различные форматы данных, работают с различными базами данных и имеют отличающиеся интерфейсы, построить на их основе доступную для использования специалистами-горняками компьютерную технологию инженерного обеспечения горных работ, тем более в системной постановке, практически невозможно. Поэтому основное условие реализации системного подхода — создание программной платформы, обеспечивающей решение задач горной технологии на основе:

— общей структуры моделей объектов горной технологии, обладающей возможностями: хранения информации о местоположении, геометрии и свойствах объекта; отображения объекта в векторной, каркасной и блочной форме; доступа к данным и методам моделей объектов для создания инструментов автоматизации решения различного рода задач;

— единой базы данных, обеспечивающей в режиме многопользовательского контролируемого доступа сохранение, выборку и загрузку моделей объектов в среду графического редактора, на платформе которого реализованы инструменты решения прикладных задач;

— набора системных и прикладных инструментов, позволяющих на основе унифицированных моделей объектов горной технологии и единообразного интерфейса автоматизировать решение задач горной технологии, увязав их методически в программные комплексы (автоматизированного проектирования открытых и подземных горных работ; оптимизации планирования горных работ и оперативного управления горными машинами и оборудованием; обеспечения геомеханической безопасности горных работ).

Таких комплексов может быть очень много и они должны отражать специфику конкретных горнодобывающих предприятий, проектных и научных организаций. В любом случае платформа должна обладать “гибкостью” и давать возможность внешним разработчикам интегрировать свои программы, используя соответствующие правила.

В области строительства и машиностроения подобные системы, получившие название “тяжелые САПР” [8], уже существуют, стоят дорого и позволяют, используя единую программную платформу, решать задачи проектирования, подготовки производства, комплектации изделий и отслеживания их жизненного цикла. Для этого применяются BIM-технологии (Building Information Modeling), которые обеспечивают сбор, хранение и комплексную обработку всей конструкторской, технологической, экономической и иной информации об объекте со всеми ее взаимосвязями и зависимостями [9].

Эта концепция частично реализована во всех развитых горно-геологических информационных системах [10] в виде геологических моделей и определяемых на их основе моделей карьеров и подземных рудников с преобладанием 3D-моделей над чертежами, но она не оформлена как методический подход для информационного обеспечения жизненного цикла горного предприятия. Основная проблема в том, что горное производство имеет дело с уникальными по своей природе месторождениями и в силу этого более тяжело поддается стандартизации в отличие от машиностроения и строительства. Тем не менее, такая работа ведется и ее цель заключается в том, чтобы объект горных работ (карьер, рудник) рассматривался как единое целое, а изменение одних элементов объекта приводило к автоматическому изменению других, с ним связанных.

В Горном институте КНЦ РАН работы по созданию ГГИС MINEFRAME ведутся более 20 лет. Это самый “молодой” программный продукт класса ГГИС. Возраст большинства других известных ГГИС (программные продукты иностранного производства) превышает 30 лет.

ГГИС MINEFRAME. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

ГГИС построена на работе с унифицированными моделями объектов горной технологии. Унификация заключается в том, что все классы объектов имеют общего “предка”, а их разнообразие формируется по образу дерева, путем добавления полей для хранения данных и методов для их обработки. С учетом того, что все базовые методы (создание и удаление, отображение, сохранение и загрузка из баз данных, копирование, перемещение, вращение и т. п.) наследуются от “предков”, это упрощает создание новых классов объектов. Отличительная особенность моделей MINEFRAME в том, что все их составные элементы (векторная основа, каркасные и блочные конструкции) являются составной частью модели, что упрощает работу с объектами и снижает вероятность потери их целостности. ГГИС MINEFRAME состоит из четырех программ, взаимодействующих друг с другом через три базы данных (рис. 1).

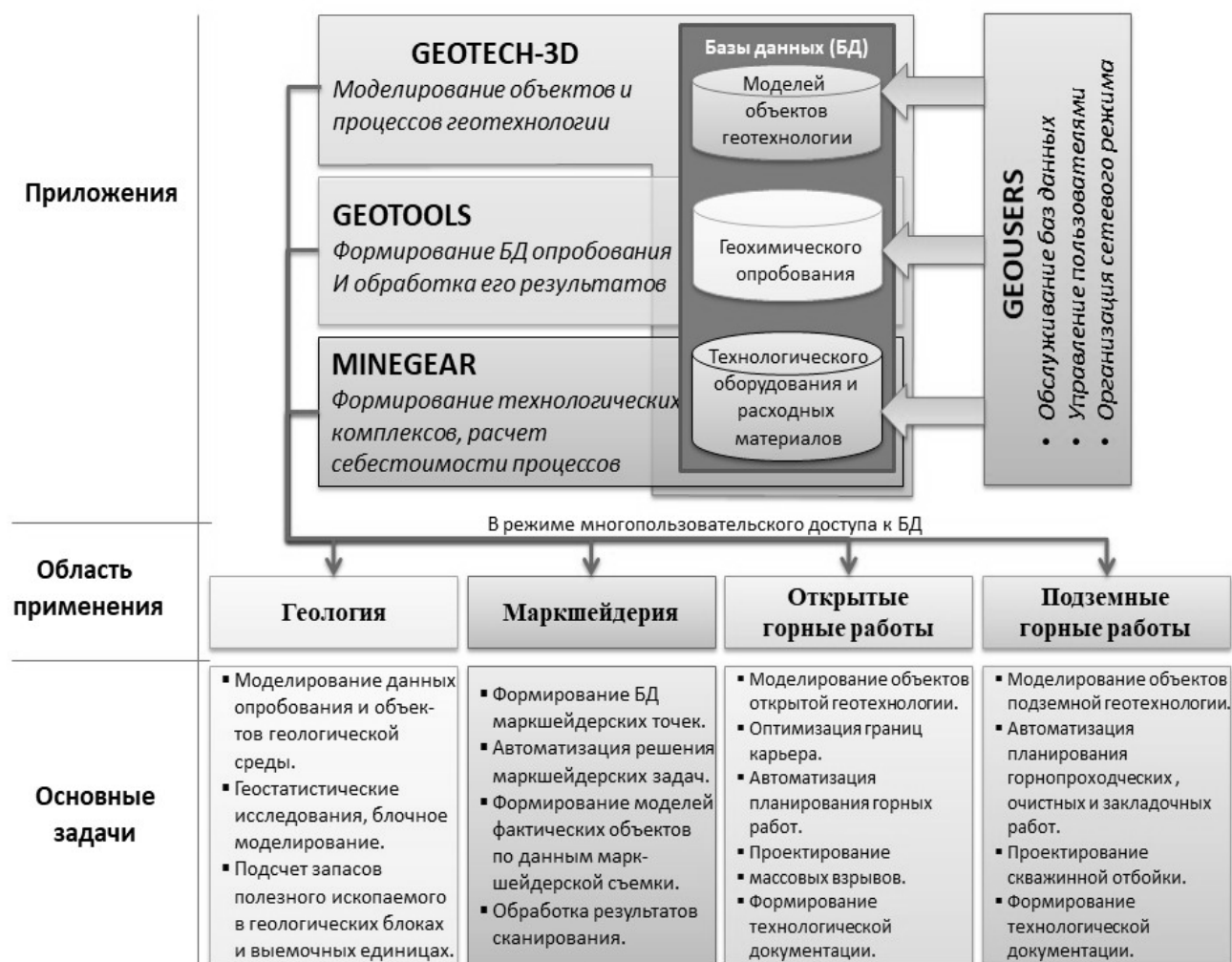


Рис. 1. Состав ГГИС MINEFRAME

Для работы с моделями используется многооконный графический редактор GEOTECH-3D, содержащий системные инструменты, обеспечивающие общие функции управления моделями объектов и моделируемым пространством, а также прикладные инструменты, которые, используя модели, автоматизируют решение конкретных геологических, маркшейдерских и технологических задач. Для представления результатов проектирования и планирования горных работ в виде технологической документации реализованы инструменты формирования чертежей, текстовой и табличной информации, их экспорта через обменные форматы и вывода на печать.

Для формирования базы данных геологического опробования разработан специализированный редактор GEOTOOLS, который кроме задачи ввода данных решает задачи их первичной обработки, визуализации колонки скважин и формирования рудных интервалов.

Важной частью при решении задач обоснования оптимальной технологии отработки месторождения является выбор технологического оборудования и определение технико-экономических характеристик технологических комплексов, которые в значительной мере формируют себестоимость добычи руды. Для решения этих задач создана программа MINEGEAR, в настоящее время работающая в режиме справочника горнотранспортного оборудования. Развитие этой программы планируется осуществлять в направлении моделирования работы технологических комплексов с оценкой временных, материальных и финансовых затрат.

Перечисленные программы работают с тремя базами данных: моделей объектов горной технологии, геохимического опробования, технологического оборудования и расходных материалов. Для управления режимом доступа к базам данных, резервного копирования и их восстановления в случае потери данных используется программа GEOUSERS.

Программы и базы данных, входящие в состав ГГИС MINEFRAME, являются прообразом платформы для комплексного решения задач горной технологии [11, 12]. Для того чтобы стать полноценной платформой, необходимо осуществить:

- выделение ядра с базовыми системными функциями как самостоятельной, защищенной от воздействия прикладных модулей части ГГИС;
- разработку интерфейса доступа к процедурам и функциям ядра ГГИС для внешних разработчиков, использующих платформу для наращивания ее функционала.

В этом направлении работа ведется, но уже в нынешнем виде ГГИС представляет собой программный продукт с достаточно развитым функционалом, конкурирующим на рынке России с таким ГГИС как MICROMINE, GEOVIA, DATAMINE [13].

Функциональные возможности MINEFRAME позволяют использовать ее для комплексного решения геологических, маркшейдерских и технологических задач открытой и подземной горной технологии, а наличие режимов и методов многопользовательского доступа к базе данных — создавать на ее основе информационные системы горнодобывающих предприятий и проектных организаций.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Преимущества системного подхода при решении задач горной технологии на основе моделирования ее объектов можно проиллюстрировать на примере нескольких работ института, выполненных для горнодобывающих предприятий России.

В связи с общемировой тенденцией увеличения глубины ведения горных работ все острее встает вопрос обеспечения их геомеханической безопасности при минимизации себестоимости добычи полезных ископаемых, что обеспечивается выбором оптимальной технологии разработки месторождения. Для ее выбора используется метод сравнения различных вариантов разработки, где в качестве исходной информации выступают данные о запасах полезных ископаемых, геомеханическом состоянии массива, технико-экономических показателей работы горно-транспортного оборудования. Процесс поиска рационального технологического решения предполагает применение ряда итераций, позволяющих найти оптимум (рис. 2). Использование средств компьютерного моделирования технологических схем и их автоматизированной технико-экономической оценки позволяет многократно ускорить процесс поиска и анализа технологических решений, а их трехмерная визуализация наглядно представить будущий объект.

Известно, что особенностью Хибинского горного массива является высокий уровень тектонических напряжений, который отрицательно влияет на устойчивость горных выработок, что усугубляется возрастанием гравитационной составляющей напряжений по мере углубления горных работ [14]. Снижение затрат на добычу руды диктует необходимость перехода на системы разработки с меньшим количеством выработок и более крупными выемочными единицами, что зачастую входит в противоречие с требованиями геомеханической безопасности. Поэтому выбор безопасной по геомеханическому фактору технологии ведения горных работ, обеспечивающей снижение себестоимости добычи руды, является крайне актуальной задачей. Благоприятным фактором, дающим высокую надежность оценки напряженно-деформированного состояния, является хорошая изученность Хибинских месторождений, где на протяжении нескольких десятков лет силами Горного института КНЦ РАН и специалистов АО «Апатит» проводятся работы по уточнению свойств горных пород и напряжений, действующих в массиве.

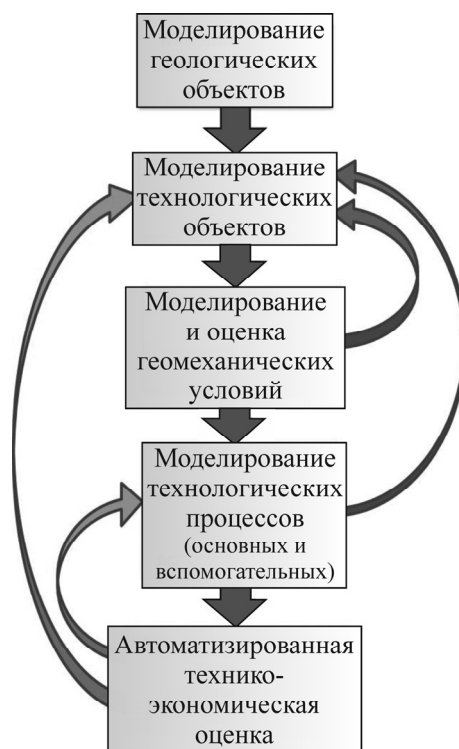


Рис. 2. Схема поиска рационального технологического решения с помощью средств ГИС MINEFRAME

Для нахождения рациональной технологии добычи руды на нижних горизонтах Кировского рудника на примере одного из блоков смоделировано несколько вариантов ее реализации (рис. 3). Моделирование включало создание всего комплекса выработок и конструктивных элементов проектируемого блока с учетом их развития в пространстве и времени.

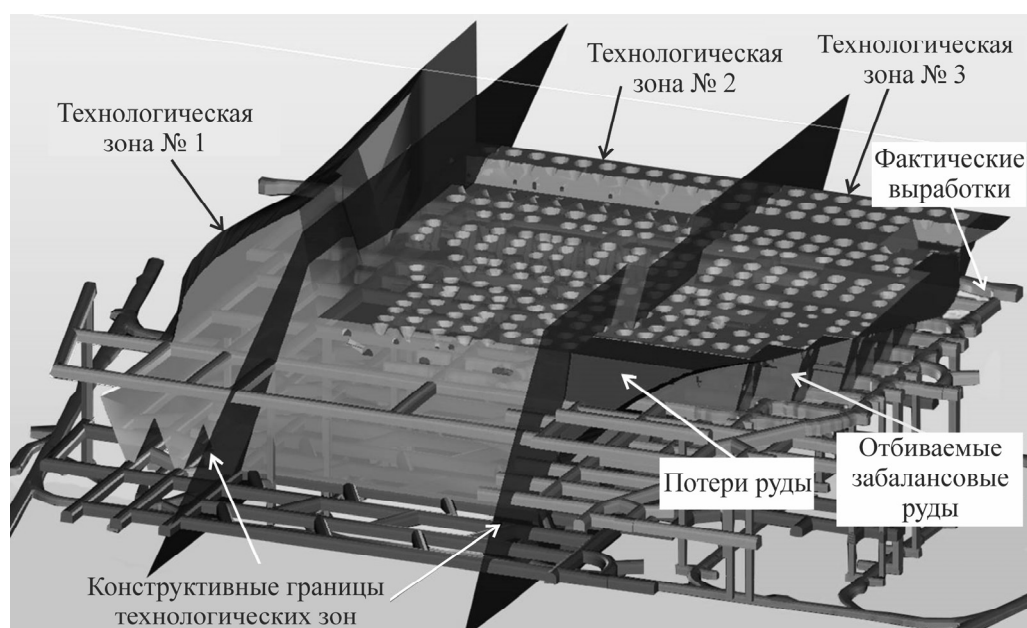


Рис. 3. Модель блока с тремя технологическими зонами вкостр простирания рудного тела (Кировский рудник АО «Апатит», Кукисвумчоррское месторождение)

В результате численного моделирования напряженно-деформированного состояния с использованием созданной в институте программы SIGMA GT [15] и автоматизированной технико-экономической оценки наиболее перспективным оказался вариант, при котором рудное тело вкрест простирания разбивается на три технологические зоны со следующими вариантами системы разработки с принудительным обрушением руды и вмещающих пород:

- в районе висячего бока — подэтажной отбойки с торцевым выпуском руды, что обеспечивает возможность формирования оптимальных границ фронта горных работ при минимизации потерь и разубоживания руды;
- в средней части блока — этажной отбойки и донного выпуска руды, что позволяет снизить себестоимость добычи руды;
- в районе лежачего бока — подэтажной отбойки с торцевым выпуском руды, что обеспечивает минимизацию потерь и разубоживания руды на контакте рудного тела.

Разбиение на три технологические зоны планируемых к отработке нижних горизонтов Кукисвумчоррского месторождения позволит при сохранении приемлемого уровня геомеханической безопасности минимизировать себестоимость добычи руды. Достигается это за счет применения более эффективной технологии (вариант системы разработки “с этажным обрушением и донным выпуском руды”), ее доля на горизонте может составить около 60 %.

Другим примером, показывающим важность геомеханической оценки при решении технологических задач, является работа, связанная с изучением возможности отработки подкарьерных запасов Ньюркпахского месторождения до момента окончания открытых горных работ. Особенностью данной ситуации является то, что рудные тела двумя ярусами залегают в границах охранного целика под карьером. Таким образом, “замораживаются” значительные запасы руды, что препятствует нормальному развитию подземных горных работ. Результаты технологического и геомеханического моделирования показали, что применение камерной системы разработки позволит вести одновременно открытые и подземные горные работы, сведя до минимума замороженные запасы руды в предохранительных целиках. При этом переход на камерную систему разработки при существенном снижении разубоживания руды незначительно увеличивает ее потери в целиках по сравнению с широко используемой на Хибинских подземных рудниках системы принудительного обрушения руды и вмещающих пород.

Расчетные методы определения напряженно-деформированного состояния позволяют оценить уровень действующих в массиве напряжений. Но любая модель, тем более такой сложной природно-технической системы, как карьер и подземный рудник, обладает определенной степенью достоверности. Для получения более точной информации о состоянии массива используются мониторинговые системы. В качестве примера работы с данными сейсмического мониторинга можно привести горную информационную систему ПАО “ППГХО”, построенную на базе ГГИС MINEFRAME [16]. Представленные в трехмерном моделируемом пространстве данные сейсмического мониторинга, результаты расчета напряженно-деформированного состояния, модели геологической среды и объектов горной технологии создают информационную основу для принятия обоснованных технологических и организационных решений. С другой стороны, наполнение системы инструментами для решения различных задач горной технологии создает информационную среду для глубокой автоматизации производства и перехода на малолюдные, а в перспективе и безлюдные технологии горного производства. В подтверждение этому можно привести оценку консалтинговой компании McKinsey, согласно которой к 2025 г. эффект от применения цифровых технологий в мировой горнодобывающей отрасли может привести к снижению затрат на 17 % [17].

Инструментальные средства MINEFRAME можно адаптировать для работы с данными, получаемыми методами разгрузки, дискования керна, а также данными, получаемыми различными геофизическими, радарными и оптическими методами. Наличие моделей выработок позволяет использовать ГГИС для автоматизированного формирования схемы воздухораспределения подземного рудника, а результаты расчета вентиляционной сети визуализировать в среде MINEFRAME.

Важным результатом использования ГГИС является возможность концентрации и визуализации в едином моделируемом пространстве данных, несущих информацию о состоянии природно-технической системы и технологических процессов, что создает условия не только для оптимизации технологических решений, но и для выявления закономерностей, а также построения на этой основе различного рода прогнозов и систем обеспечения безопасности горных работ.

ВЫВОДЫ

Информатизация горного производства — наиболее быстроразвивающееся направление горной технологии, обеспечивающее повышение производительности труда и безопасность горных работ, снижение издержек производства и более рациональное использование природных ресурсов. Геоинформационные технологии выполняют интегрирующую роль, позволяя путем использования средств компьютерного моделирования собрать воедино всю актуальную информацию, связанную с отработкой месторождения. Важной задачей горных информационных технологий становится минимизация экономических и экологических рисков разработки месторождений полезных ископаемых за счет принятия оптимальных проектных и плановых решений, основанных на прочном математическом фундаменте. Опыт применения информационных технологий в других отраслях промышленности, удачные примеры внедрения ГГИС на горном производстве, первые примеры использования автономной и роботизированной горной техники ясно показывают, что другой альтернативы повышения эффективности и безопасности работы таких сложных индустриальных комплексов не существует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **The digital disconnect: problem or pathway.** [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-the-digital-disconnect-problem-or-pathway/\\$FILE/EY-digital-disconnect-in-mining-and-metals.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-the-digital-disconnect-problem-or-pathway/$FILE/EY-digital-disconnect-in-mining-and-metals.pdf).
2. **Proceedings of the 37th Int. Symp. on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, APCOM-2015, Fairbanks, Alaska, 2015.**
3. **Proceedings of the 38th Int. Symp. on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, APCOM-2017, Golden, Colorado, 2017.**
4. **Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ:** сб. тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 23–26 сентября 2008 г. — Апатиты, СПб.: Реноме, 2009. — 328 с.
5. **Информационные технологии в горном деле:** докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием 12–14 октября 2011 г. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. — 211 с.
6. **Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях:** материалы XII междунар. симп. — Белгород: ВИОГЕМ, 2013. — 321 с.
7. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Системный подход к решению задач горной технологии на основе моделирования ее объектов и процессов // Проблемы недропользования. — 2016. — № 4. — С. 141–151.
8. **Роль и место информационных технологий в машиностроении, типы различных САПР, их идеология.** http://mishka-stan.narod.ru/www/Hobby/SAPR/inf_tehn/inf_tehn.html.

9. **Building Information Modeling** — технологии XXI века / УЦСС, 2014. Дата обновления 13.08.2014. <https://www.uscc.ua/ru/infocentr/stati-i-intervyu/building-information-modeling-tehnologii-xxi-veka.html>.
10. **Наговицын О. В., Лукичев С. В.** Горно-геологические информационные системы — история развития и современное состояние. — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. — 196 с.
11. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Автоматизированное решение задач горного производства в системе MINEFRAME // Горн. техника. — 2014. — № 2. — С. 38–42.
12. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Горно-геологические информационные системы, область применения и особенности построения // ГИАБ. — 2016. — № 7. — С. 71–83.
13. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Современные информационные технологии в горном деле // Мировая горная промышленность: история, достижения, перспективы. — М.: Горное дело, 2013. — Т. 2. — С. 274–315.
14. **Марков Г. А.** Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. — Л.: Наука, 1977. — 213 с.
15. **Козырев А. А., Семенова И. Э., Шестов А. А.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на разных этапах освоения месторождений // Компьютерные технологии при проектировании и планировании горных работ: сб. тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. — Апатиты; СПб., 2009. — С. 251–256.
16. **Козырев А. А., Лукичев С. В., Наговицын О. В., Семенова И. Э., Ильин Е. А.** Повышение безопасности горных работ на основе горнотехнологического и геомеханического моделирования условий разработки и контроля состояния массива Стрельцовского рудного поля // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: сб. статей V, VI Междунар. конф. (2014–2015 гг.). — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2017. — С. 106–114.
17. **Жолмагамбетов Т.** Оцифровать шахту. <http://kidi.gov.kz/novosti/korporativnye/850>.

Поступила в редакцию 10/IX 2018

После доработки 27/XI 2018

Принята к публикации 28/XI 2018