

УДК 622:658.5.001.57]004.94

Лукичев Сергей Вячеславович

доктор технических наук, врио директора,
Горный институт КИЦ РАН,
184209, Мурманская обл., г. Апатиты,
ул. Ферсмана 24
e-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru

Наговицын Олег Владимирович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией,
Горный институт КИЦ РАН
e-mail: nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ
ЗАДАЧ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЕЕ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ***Аннотация:*

Структура и состав цифровых моделей и баз данных, программные средства создания и управление ими, методы решения прикладных задач, способы визуализации моделей и подготовки на их основе технологической документации реализуют системный подход к решению задач современной геотехнологии. Среди функциональных блоков, реализующих такой подход, – моделирование геологических и технологических объектов, технологических процессов и автоматизированная технико-экономическая оценка горных работ.

Ключевые слова: проектирование, планирование, горно-геологическая информационная система, моделирование, программное обеспечение

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.141

Lukichev Sergey V.

Doctor of technical sciences,
deputy acting director of the institute,
The Mining Institute KSC RAS,
184209, Murmansk, Apatite, 24 Fersman st.
e-mail: lu24@goi.kolasc.net.ru

Nagovitzin Oleg V.

candidate of technical sciences,
the head of the laboratory,
The Mining Institute KSC RAS
e-mail: nagovitsyn@goi.kolasc.net.ru

**SYSTEMIC APPROACH TO SOLVE MINING
TECHNOLOGICAL TASKS BASED
ON OBJECTS AND PROCESSES MODELING***Abstract:*

A systematic approach to solve modern geo-technological tasks is implemented through the structure and composition of digital models and data bases, software tools and management, the methods for solving applied problems, visualization of models and preparation of technical documentation on their basis. Modeling geological and technological objects, designing technological processes and automated technical and economic evaluation of mining operations are functional blocks implementing such approach.

Key words: designing, planning, mining and geological information system, modeling, software

Горнодобывающее предприятие как технический объект является достаточно сложной системой, представляющей собой совокупность связанных между собой элементов, развивающихся в пространстве и времени. Особенностью горнодобывающего предприятия является то, что его функционирование связано с массивом горных пород (ГП), являющимся, с одной стороны, источником полезного ископаемого (ПИ), а с другой стороны, конструкционным материалом, обеспечивающим устойчивость выработок, проводимых для обеспечения добычи ПИ. В силу же того, что не существует одинаковых месторождений ПИ и условий ведения горных работ, каждое горнодобывающее предприятие является уникальным техногенным объектом, обладающим своим набором характеристик.

Для эффективной, безопасной для окружающей среды и персонала разработки месторождения требуется знание его геологии, геомеханических и технологических свойств массива ГП, природно-климатических условий разработки. При этом затраты на освоение месторождения сильно зависят от наличия необходимой инфраструктуры и трудовых ресурсов, а доход – от стоимости выпускаемой продукции на рынке. Учет перечисленных факторов, а их на самом деле больше, требует системного подхода при решении задач, связанных с функционированием горнодобывающего предприятия.

Одним из требований системного подхода является представление объекта (системы) в виде отдельных, связанных между собой элементов, которые могут, в свою очередь, объединяться в подсистемы. При традиционном подходе, основанном на бумажной технологии формирования баз данных (БД) и знаний, не представлялось возможным дать описание сложного объекта (например, подземного рудника, карьера) в виде, удобном для решения разноплановых задач, возникающих при проектировании и функционировании предприятия. Такая возможность появляется при использовании средств компьютерного моделирования объектов горной технологии, где в идеальном случае модель объекта должна соответствовать свойствам реального объекта. Речь идет о свойствах, требуемых для решения конкретных задач. Отнесение как реальных объектов, так и их моделей к иерархически связанным элементам структуры облегчает работу со сложной природно-технической системой.

Реализация системного геоинформационного подхода к решению этих задач заключается в создании программных средств и инструментов позволяющих решать задачи моделирования объектов горной технологии (ОГТ), а на основе их использования проектировать и планировать горные работы, управлять качеством добываемого ПИ, формировать горную графическую документацию. В структуру программных средств, развиваемую в Горном институте КНЦ РАН, горно-геологической информационной системы (ГГИС) MINEFRAME входят средства для решения прикладных, вспомогательных и служебных задач [1, 2]. Инструменты и программные модули ГГИС базируются на едином моделирующем ядре, унифицированном доступе к объектам, хранящимся в БД, и единообразном пользовательском интерфейсе. За все время развития системы разработано множество инструментов и модулей, входящих в автоматизированные рабочие места маркшейдеров, геологов, горных технологов.

Следует отметить, что системный геоинформационный подход воплощен в основных принципах создания трехмерных моделей и структурах, определяющих их содержание [3]. Основой трехмерных моделей в ГГИС MINEFRAME является набор сечений (несущих плоскостей), на которых располагаются контуры с точками и отрезками, формирующие тем самым векторное представление модели. Сечения (фактически это геологические разрезы или разведочные линии, горизонты карьера, поперечные сечения подземных выработок) могут быть как параллельными, так и непараллельными. Важной функциональной частью моделей являются так называемые «элементы», которые необходимы для выделения естественных или технологических разновидностей внутри объекта моделирования (табл. 1).

Таблица 1

Геометрическая структура векторных моделей различных типовых ОГТ

Объект	Уровень 1 (плоскости)	Уровень 2 (списки элементарных объектов)	Уровень 3 (элементарные объекты)
Карьер	Горизонты	Бровки, съезды, валы, гипсометрия площадок, бергштрихи	Точки, узлы, отрезки
Рудное тело	Разрез, профиль, разведочная линия	Контакты литологических или кондиционных разностей	Точки, узлы
Прирезка, блок БВР	Подошва, площадка, границы на разрезах	Линии, описывающие геометрию блока, скважины БВР	Точки, узлы, отрезки
Выработка	Сечения	Линии, описывающие подошву, борта и свод выработки	Точки, узлы

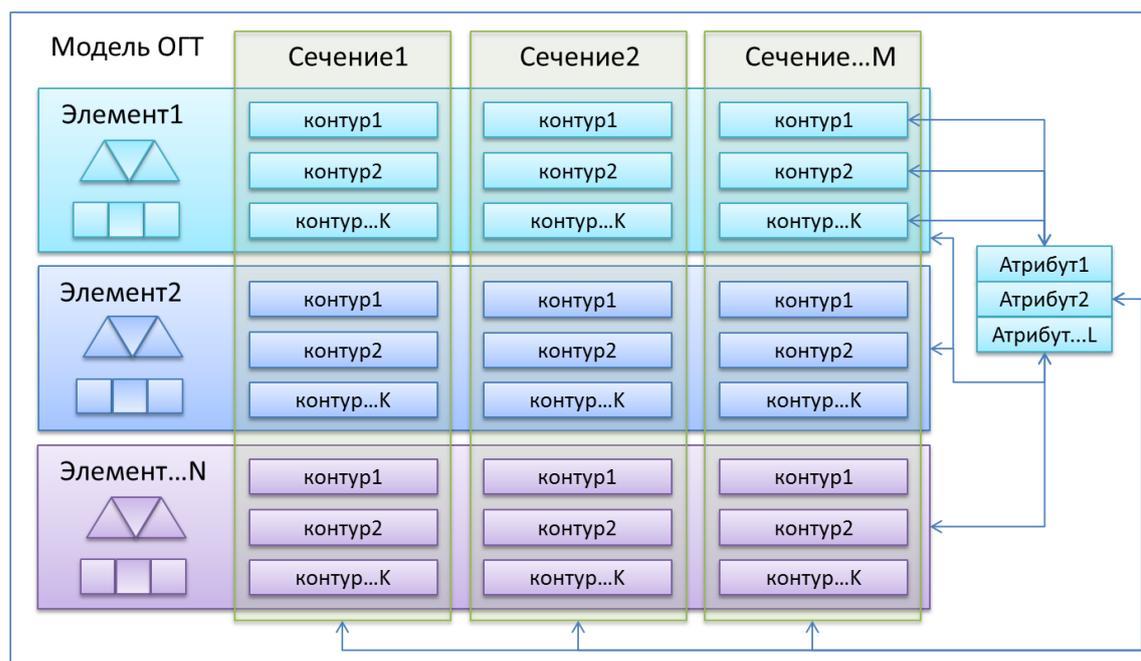


Рис. 1 – Структура модели ОГТ

Схематично структура модели ОГТ представлена на рис. 1. В его основе лежит список свойств и набор сечений, на плоскостях которых располагаются контуры с точками, отрезками или контурами. Параллельные (или квазипараллельные) сечения используются, как правило, для создания объектов, имеющих прямолинейную ось (рудные тела, поверхность карьера и т.д.). Непараллельные сечения в основном используются для создания объектов, имеющих ломаную ось, например, подземных выработок. К сечениям принадлежат точки и контуры. Они формируют векторную модель и могут относиться к различным элементам, каждый из которых может иметь свою каркасную и блочную модель.

Каждый элемент содержит свой список свойств-характеристик, который может динамически пополняться. Триангуляционная сеть построена на точках контуров и определяет поверхность элемента, а следовательно, его форму и размеры. Так как контуры формируются на одном наборе сечений, существует возможность создания каркасных моделей с использованием точек, принадлежащих разным элементам. Это обеспечивает необходимую гибкость как в случае формирования каркасных конструкций с общей границей, так и в случае построения каркасных моделей, опирающихся на векторные модели нескольких элементов (например, верхняя и нижняя бровка уступов карьера). Для управления процессом триангуляции используются «сцепки» и направляющие контуры, которые локализуют области триангуляции. Каждый элемент модели может иметь свою каркасную и блочную модели, что, наряду с возможностью группировки моделей в один объект, позволяет создавать модели любой степени сложности.

В ГГИС MINEFRAME для формирования БД и графического представления моделей объектов горной технологии как основы системного подхода используются программы:

1. GEOTECH-3D – многооконный графический редактор, предназначенный для формирования БД моделей горно-геологических объектов и их графического представления в моделируемом пространстве.

2. GEOTOOLS – редактор для формирования и работы с БД геохимического опробования (ГХО) скважин и выработок.

3. MINEGEAR – редактор для формирования БД горно-транспортного оборудования (ГТО).

Рассмотрим подробнее их функционал и возможности, обеспечивающие системный подход к решению задач горной технологии. Структура и связи между составными частями ГГИС MINEFRAME: рабочими местами, модулями, основными решаемыми задачами – представлены на рис. 2.

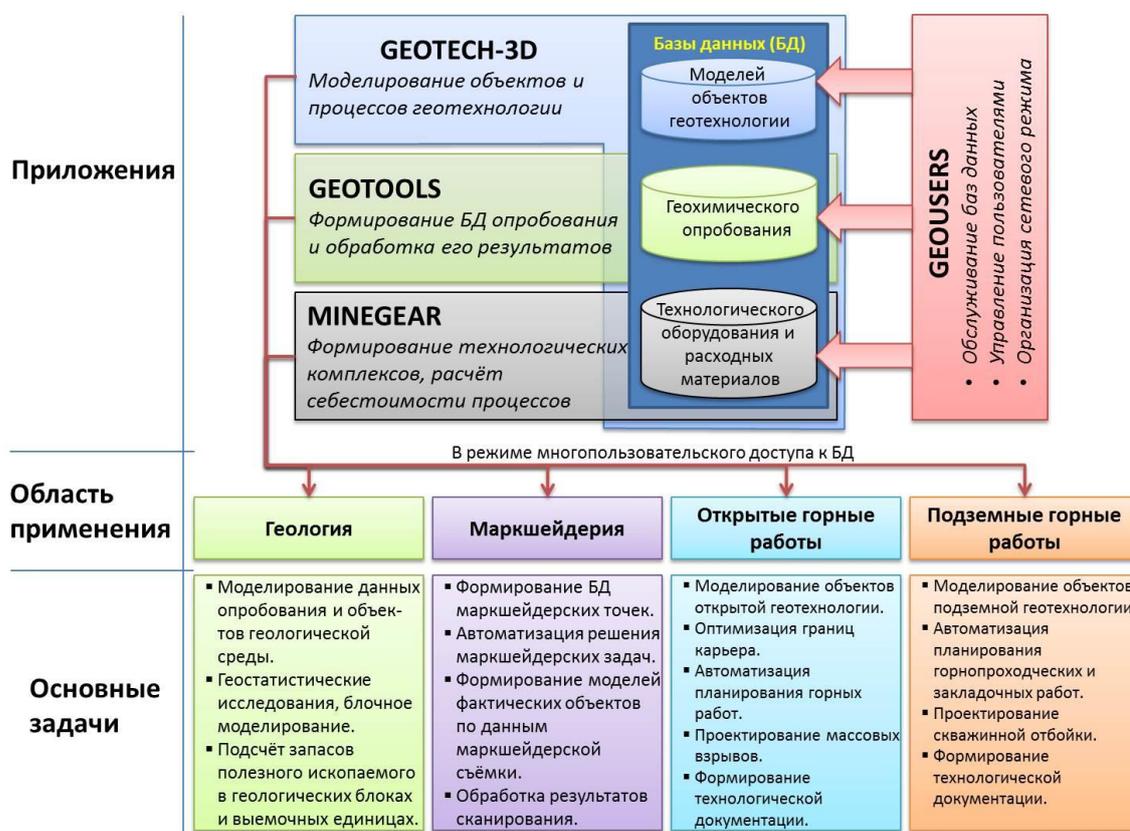


Рис. 2 – Структура ГГИС MINEFRAME

Редактор БД ГХО GEOTOOLS предназначен для работы с многокомпонентными пробами из скважин и выработок (борозд, траншей, профилей). В своем составе редактор имеет средства экспорта, импорта данных, их сортировки и выборки, группировки проб для выделения кондиционных и сортовых интервалов, составления отчетов.

Программа представляет собой многооконный специализированный редактор, предназначенный для работы с данными скважинного, бороздового и шламового опробования. Данные опробования могут быть отнесены к определенным профилям (например, разведочным), блокам (например, взрывным) и типам (например, детальной и эксплуатационной разведки).

Редактор позволяет работать со следующей информацией: координатами устьев скважин, замерах искривления ствола скважины (инклинометрия), опробованием скважин и выработок (траншей, борозд) с указанием содержаний по полезным компонентам и описанием проб, литологией, кондиционными интервалами, геологической колонкой.

Структура БД ГХО реализована таким образом, что в процессе настройки БД на конкретное месторождение нет необходимости ее изменять. Таким образом, геолог-пользователь ГГИС, задавая необходимые компоненты опробования, литологические типы, условия выделения кондиций, действует в рамках единой структуры БД, не изменяя ее. Следствием этого является то, что вся реализация бизнес-логики БД, направленная на оптимизацию скорости работы, обеспечение целостности данных, работает со

всеми объектами БД: таблицами, индексами, хранимыми процедурами, триггерами и генераторами. Это обеспечивает автоматический непрерывный контроль ссылочной целостности и связности данных.

GEOTECH-3D является основным компонентом ГГИС MINEFRAME, он используется при формировании рабочих мест геологов, маркшейдеров, горных технологов и других технических специалистов. Программа предназначена для визуализации моделей объектов горной технологии и предоставления необходимого графического интерфейса при решении задач геологического моделирования, планирования, проектирования и сопровождения горных работ. Для реализации этих возможностей имеются программные средства создания цифровых моделей: геологических проб, маркшейдерских точек, рудных тел, горных выработок, выемочных единиц, конструктивных элементов и узлов системы разработки, природных и техногенных поверхностей (топоповерхности, карьеры, отвалы). Имеется возможность подключения БД ГХО с целью использования построенных на ее основе моделей геологических проб при геологическом моделировании, и БД ГТО для обеспечения процессов планирования горных работ информацией о характеристиках применяемого горного оборудования и технологических комплексов.

В основе архитектуры GEOTECH-3D лежат несколько функциональных блоков, решающих специализированный набор задач. Ключевым элементом системы являются классы объектов, с помощью которых осуществляется моделирование объектов горной технологии. Именно они содержат данные и реализацию функционала, необходимые для моделирования предметной области (например, модели таких объектов, как выработки, карьеры, рудные тела, пласты, блоки БВР, маркшейдерские точки, геологоразведочные скважины). Остальные части системы либо используют эти классы, либо предоставляют им свой функционал.

Помимо создания моделей с помощью инструментальных средств, для ввода информации в систему из других источников предусмотрен модуль импорта данных, с помощью которого модели объектов горной технологии создаются на основе информации из других программных систем. Для обмена данными с ними, соответственно, имеется модуль экспорта данных, с помощью которого информация в виде моделей объектов или чертежей может быть передана в другие программы.

На основе информации, сформированной в виде моделей объектов горной технологии, необходимо получать графическую документацию в стандарте горной графики. С этой целью в системе MINEFRAME разработан классификатор, с помощью которого в систему вносятся правила о способах отображения на разрезах и планах линейных, точечных и площадных объектов в различных масштабах. Классификатор взаимодействует с редакторами легенд, условных знаков, типов линий и штриховок, штампов и рамок, что обеспечивает вывод чертежей в стандартах горной графики и взаимодействие как с базой данных для сохранения информации о правилах отображения объектов, так и с менеджером объектов для назначения правил отображения отдельных элементов моделей. Подготовка типовых чертежей выполняется с применением шаблонов чертежей, видовых экранов, штампов и элементов зарамочного оформления.

Редактор БД ГТО – MINEGEAR. Реализует функции пополнения и редактирования данных о горном оборудовании, расходных материалах и ГСМ, подбора оборудования и расходных материалов по технологическим параметрам. Имеется функционал формирования технологических комплексов используемых в процессе планирования горных работ. Так, при планировании проходки подземных выработок выбор оборудования для каждого вида работ проходческого цикла осуществляется заданием необходимых исходных горно-геологических, горно-технических параметров и стоимостных показателей, по которым автоматически производится подбор альтернативной техники из БД ГТО. При составлении месячного графика работы горного оборудования БД ГТО служит источником информации о типах, списочном составе и производительности ГТО, графике планово-предупредительных ремонтов. БД ГТО содержит сведения о производителях

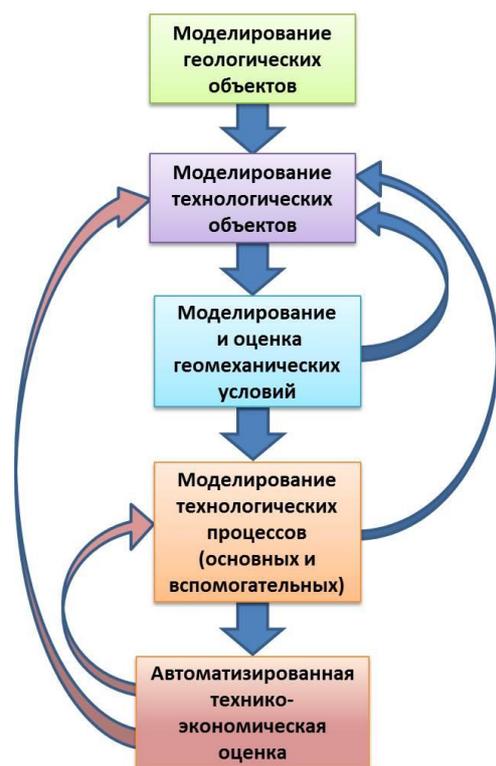


Рис. 3 – Функциональные блоки ГИС MINEFRAME, реализующие компьютерную технологию проектирования и планирования горных работ

техники и расходных материалов, типах и моделях оборудования, его основные технологические характеристики и параметры, единицы их измерения.

На сегодня БД ГТО содержит более 600 единиц отечественного и зарубежного оборудования и может пополняться пользователями. Использование MINEGEAR совместно с другими модулями ГИС MINEFRAME позволяет более достоверно оценить возможности создаваемых технологических комплексов, определить время и стоимость выполнения технологических операций. При этом появляется возможность сравнения вариантов планов горных работ, оценки технологических возможностей горного оборудования в конкретных горно-геологических условиях и принятых параметрах системы разработки.

Использование технологий трехмерного моделирования объектов горной технологии в совокупности с разработанными программными средствами, обеспечивающими решение технологических задач, позволило реализовать системный подход к воплощению компьютерной технологии проектирования и планирования горных работ. Можно выделить несколько функциональных блоков, реализующих данный подход (рис. 3).

1. Моделирование геологических объектов

Геологическая информация лежит в основе принятия всех основных технологических решений. Для обеспечения задач, связанных с моделированием пространственного распределения полезного ископаемого, в MINEFRAME существует набор инструментов, обеспечивающий векторное, триангуляционное и блочное моделирование геологических тел, включая пласты и тектонические нарушения. Наличие развитых методов интерполяции позволяет создавать поверхности любой степени сложности. Приемы блочного моделирования реализует набор инструментов геостатистического исследования данных опробования и их интерполяции с использованием метода обратных расстояний и кригинга. Применительно к задачам среднесрочного планирования разработаны инструменты оценки запасов выемочных единиц с выделением объемов руды и пустой породы с учетом горизонтов системы и разработки целиков.

2. Моделирование технологических объектов

В отличие от инструментов геометрического моделирования геологических объектов, предназначенных для создания сложных сечений и поверхностей, инструменты моделирования технологических объектов специализированы на создании горных выработок и конструктивных элементов, состоящих из типовых сечений, повторяющихся во множестве объектов. Для ускорения работы с такого типа объектами используются библиотеки типовых сечений; инструменты формирования моделей выработок с заданными параметрами сечений, уклонами на продольных профилях, радиусами закруглений и параметрами сопряжения с другими выработками; методы построения сложных конструктивных элементов на основе группировки из более простых; инструменты дублирования

и параметрического задания размеров. Существенным отличием подземных горных работ от открытых является большое количество выработок, в совокупности формирующих транспортную и вентиляционную систему рудника (шахты). Выработки могут закрепляться, в них монтируются системы инженерных коммуникаций, сечения выработок на отдельных участках могут меняться в случаях обрушения кровли и бортов, вспучивания почвы. Таким образом, подземная горная выработка – это многослойный объект, меняющий свою геометрию и характеристики во времени. Так как носителем информации об объекте является модель, то ее структура должна позволять хранить такого рода информацию. В отличие от большинства ГГИС, хранящих информацию об объекте (векторные, каркасные и блочные модели, а также текстовая информация) в разных файлах, структура объектов MINEFRAME обеспечивает ее хранение в виде элементов одной модели, что существенно ускоряет и упрощает работу пользователей. Многократное сокращение элементов, хранящихся в БД, и наличие развитой системы выборки моделей из БД позволяет работать с десятками тысяч моделей объектов в режиме многопользовательского доступа, не нарушая целостности моделей.

3. Моделирование и оценка геомеханических условий

Увеличение глубины ведения открытых и подземных горных работ предъявляет все более серьезные требования к обеспечению их геомеханической безопасности. При проектировании основными источниками информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) горнотехнической системы и связанной с этим опасностью динамических проявлений НДС являются численные расчеты (в двухмерной и трехмерной постановке), а при среднесрочном и краткосрочном планировании – сочетание методов расчета НДС и инструментов мониторинга микросейсмических событий в массиве, связанных с его разрушением. При решении задач проектирования и особенно планирования горных работ важны:

- возможность представления результатов оценки НДС и его проявлений в среде моделирования объектов горной технологии;
- оперативность и простота получения результатов оценки НДС.

В ГГИС MINEFRAME это достигается тесной интеграцией среды моделирования и решения задач горной технологии с программой расчета НДС – SIGMAGT, разработанной в Горном институте КНЦ РАН [4]. Суть реализованного решения заключается в возможности автоматизированного формирования сечений нужного участка рудника, передачи этой информации в программу SIGMAGT, расчета НДС, передачи результатов расчета в ГГИС MINEFRAME, где они представляются или в виде векторов главных

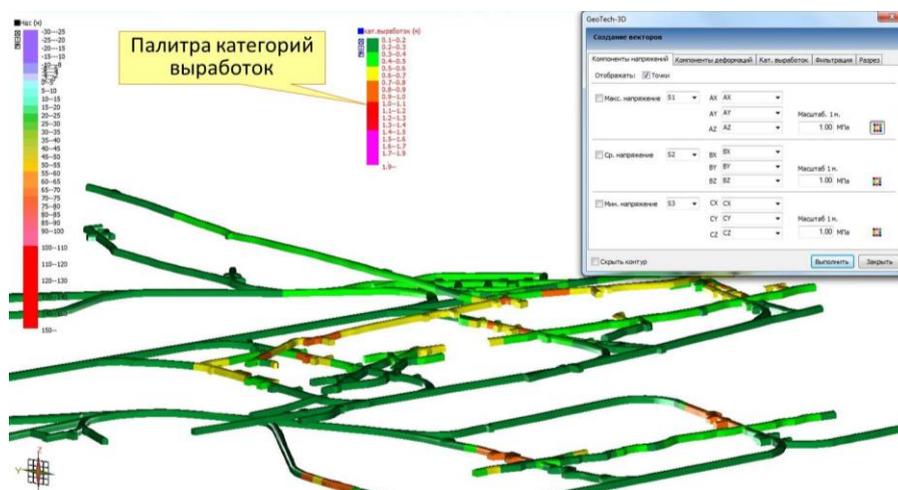


Рис. 4 – Отображения категорий опасности горных выработок по горным ударам

напряжений, или в виде изолиний на произвольном количестве сечений нужной ориентации. Для реализации этой процедуры предварительно формируется геомеханическая мелкомасштабная модель месторождения, используемая затем для задания граничных условий при формировании крупномасштабной модели выделенного участка. Расчетное поле напряжений позволяет в автоматическом режиме оценить категоричность выработок по критерию удароопасности и предусмотреть мероприятия по разгрузке массива или закреплению опасного участка (рис. 4).

Результаты мониторинга микросейсмических событий представляются в среде моделирования MINEFRAME как в форме сфер, размер и местоположение которых несут информацию о масштабе разрушения, так и в виде поля опасности проявления НДС – интегральной характеристики микроразрушений массива за определенный период наблюдений [5].

4. Моделирование основных и вспомогательных технологических процессов

Наличие моделей горных выработок и выемочных единиц позволяет оценить общий объем горнопроходческих и очистных работ, но не позволяет оптимальным образом увязать в пространстве и времени последовательность реализации заданных в моделях проектных решений. Открытым остается также вопрос, связанный с выбором наиболее подходящих для данных условий технологических комплексов, предназначенных для реализации проектов. На сегодня проектировщики при выборе оборудования для повышения надежности проектных решений вынуждены использовать существующий опыт применения технологических комплексов на действующих горнодобывающих предприятиях, что не способствует эффективному внедрению новой техники и технологий. Решением данной проблемы является создание программных средств, моделирующих технологические процессы. Ниже приведены примеры того, как это реализуется в MINEFRAME.

Формирование комплексов технологического оборудования

Для решения вопросов, связанных с формированием технологических комплексов, используется БД ГТО. Поиск горного оборудования в БД производится по различным критериям, например, функциональному назначению, типу привода ходовой части, преодолеваемому уклону и т. д. Использование MINEGEAR совместно с другими модулями ГГИС MINEFRAME позволяет более достоверно оценить возможности создаваемых технологических комплексов, определить время и стоимость выполнения технологических операций. Одновременно это дает возможность сравнения между собой не только вариантов планов горных работ, но и оценки технологических возможностей горного оборудования в конкретных горно-геологических условиях и принятых параметрах системы разработки (рис. 5).

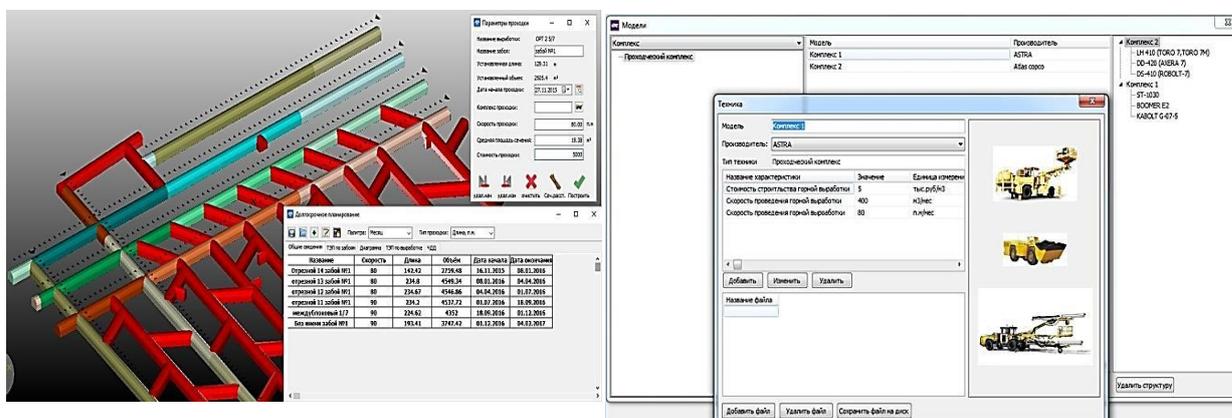


Рис. 5 – Программные средства формирования комплексов технологического оборудования

Проектирование взрывных и закладочных работ на основе моделирования их рабочих процессов

Проектирование БВР является одним из самых трудоемких и ответственных процессов инженерного обеспечения горных работ. Связано это как со значительным объемом информации, необходимой для выполнения проектных работ, так и со сложностью прогнозной оценки результатов взрыва. Для автоматизации работы по проектированию скважинной отбойки разработан комплекс программных средств (рис. 6), обеспечивающий расчет параметров скважинной отбойки с учетом упруго-прочностных характеристик массива, геометрических и энергетических характеристик зарядов [6]; интерактивное формирование моделей вееров и групп скважин с учетом характеристик и кинематики буровых машин, параметров скважинной отбойки, ограничений на выход в выработанное пространство и за границы заданных областей; задание скважинных зарядов с использованием их типовых конструкций и схем расчета недозаряда; определение границ отрыва горной массы от массива ГП, где на основе моделирования механизма формирования воронок выброса от взрыва зарядов формируется трехмерная поверхность отбойки; формирование технологической (графической, текстовой и табличной) документации с оценкой величины разубоживания и расчетом параметров на бурение скважин для заданных типов буровых машин.

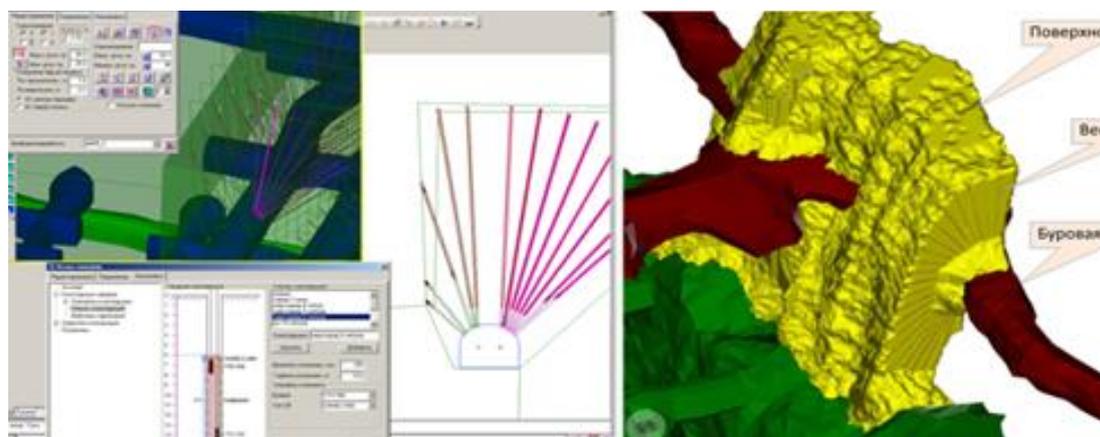


Рис. 6 – Программные средства автоматизированного проектирования подземных массовых взрывов

Закладка выработанного пространства является важной частью технологии ведения горных работ на многих подземных рудниках. Автоматизированные инструменты инженерного обеспечения работ по закладке выработанного пространства подземного рудника решают следующие задачи: работа с перемычками, ограничивающими закладочные секции; создание моделей закладочных секций; формирование актов передачи/возврата секций под закладку; формирование графических материалов; формирование паспорта искусственной кровли; трассировка трубопроводов закладочной смеси; фильтрация (выборка) секций: по дате; по слоям; по горизонтам/по блокам.

5. Автоматизированная технико-экономическая оценка горных работ

Проектирование схем вскрытия и подготовки месторождения предусматривает моделирование соответствующих горных выработок с учетом размещения в них транспортных коммуникаций и технологического оборудования. Учитывая специфику процессов горного производства, достаточно сложно учесть все факторы, влияющие на выбор оптимального варианта ведения горных работ. Для такой оценки используются экономические расчеты, где важным фактором наряду с финансовыми и материальными затратами является время реализации мероприятий (проходка выработок, приобретение

оборудования и т. д.). В силу многовариантности такие расчеты, особенно при детальной оценке, отнимают много времени. Для решения таких задач реализован комплекс программных средств автоматизации процессов текущего и перспективного планирования горнопроходческих работ, обеспечивающий автоматическую разбивку выработок на участки проходки в определенный период времени с оценкой объема извлекаемой горной массы, количества и качества руды [7]. 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 запроектированного выработанного пространства. Варианты планов так же, как и проектных решений, сохраняются в БД, что облегчает процедуры анализа и выбора наиболее эффективных сценариев развития горных работ.

Наряду с инструментами технико-экономической оценки горнопроходческих работ осуществляется развитие средств оценки очистных работ. В качестве критериев оценки технологических решений по разработке месторождений или их участков используются экономические показатели: чистый дисконтированный доход, внутренняя норма доходности, индекс доходности, срок окупаемости инвестиций.

Заключение

В основе современных автоматизированных методов инженерного обеспечения горных работ при решении геологических, маркшейдерских и технологических задач лежит использование трехмерных цифровых моделей как носителей информации о геометрических размерах, пространственном положении, физико-механических, технологических и технико-экономических свойствах объектов горной технологии. Алгоритмы, интерактивные и автоматические программные инструменты позволяют использовать модели различных типов для получения точного и обоснованного решения задач проектирования и планирования горных работ. Таким образом, структура и состав цифровых моделей и баз данных, программные средства создания и управления ими, методы решения прикладных задач, способы визуализации моделей и подготовки на их основе технологической документации формируют системный подход к решению задач современной геотехнологии.

Литература

1. Лукичев С.В. Современные информационные технологии в горном деле / С.В. Лукичев, О.В. Наговицын // Мировая горная промышленность: история, достижения, перспективы: сборник аналитических статей под ред. К.Ю. Анистратова. – Т. 2. – М.: НПК «Горное дело», 2013. – С. 274 - 315.
2. Лукичев С.В. Автоматизированное решение задач горного производства в системе MINEFRAME / С.В. Лукичев, О.В. Наговицын // Горная техника: каталог-справочник. – 2014. – № 2 (14) – С. 38 - 42.
3. Наговицын О.В. Развитие методов моделирования горно-геологических объектов в системе MINEFRAME / О.В. Наговицын, С.В. Лукичев // Информационные технологии в горном деле: доклады Всероссийской научной конференции. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. – С. 142 - 147.
4. Козырев А.А. Опыт применения экспертных систем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород для выбора безопасных способов отработки рудных месторождений / А.А. Козырев, В.И. Панин, И.Э. Семенова // Записки Горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 16 - 23.
5. Подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ в системе MINEFRAME / С.В. Лукичев, О.В. Наговицын, И.Э. Семёнова, О.В. Белгородцев // Горный журнал. - 2015. - № 8. - С. 53 - 57.



6. Реализация алгоритма моделирования границы отрыва при проектировании скважинной отбойки / С.В. Лукичев, А.С. Шишкин, К.П. Гурин // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2015. - Т. 18. - № 2. - С. 192 - 197.

7. Модуль планирования горнопроходческих работ в программном комплексе MINEFRAME / С.В. Лукичев, О.В. Наговицын, О.В. Белгородцев, Е.М. Савин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 7. - С. 268 - 272.