

УДК 622

## ЭВОЛЮЦИЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ГРАФИКИ: ОТ ТРАДИЦИОННЫХ КАРТ К 3D-МОДЕЛИРОВАНИЮ

Скворцов М.С., студент гр. ГПс-241, 1 курс  
Макковеев Н.В., студент гр. ГПс-241, 1 курс  
Овсянникова Е.А., к.т.н., доцент кафедры СКВиВ  
Челнакова И.Г., ст. преподаватель кафедры СКВиВ  
Кузбасский государственный технический университет имени  
Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Современная инженерная деятельность, особенно в горнодобывающей и строительной отраслях, неразрывно связана с эффективным использованием визуализации данных. Горно-геологическая графика прошла долгий путь от простых чертежей и карт до сложных трехмерных моделей, создаваемых с помощью мощного программного обеспечения. Эта эволюция значительно повлияла на все этапы инженерных проектов, от разведки до эксплуатации, повысив точность, эффективность и безопасность работ. В данной статье будет рассмотрен вклад современной горно-геологической графики в развитие инженерной деятельности, с акцентом на ее применение в разных областях.

Традиционные методы геологического картирования были ограничены в своей точности и возможностях представления сложных пространственных структур. Бумажные карты и разрезы не могли полностью отразить трёхмерную геометрию рудных тел, тектонических нарушений и других геологических особенностей. Современное 3D-моделирование позволяет создавать реалистичные виртуальные копии месторождений, значительно повышая качество и точность анализа геологических данных. Эти модели строятся на основе разнообразных данных, полученных в ходе геофизических исследований, бурения, геохимического анализа и дистанционного зондирования. Традиционные методы геологического картирования, основанные на двумерных изображениях и ручном интерпретировании данных, несли в себе значительные ограничения. Невозможность адекватно отобразить пространственное расположение геологических объектов, их взаимосвязи и сложное строение приводила к ошибкам в оценке запасов [1] полезных ископаемых, планировании горных работ и прогнозировании геологических процессов.

Бумажные карты, хоть и служили незаменимым инструментом на протяжении многих лет, оставались статичными и не позволяли интерактивного исследования геологической модели. Разрезы, созданные на основе ограниченного числа скважин, часто давали лишь фрагментарное представление о реальной геологической ситуации.

Современные технологии трехмерного проектирования кардинально изменило подход к геологическому картированию. Благодаря использованию мощных компьютерных программ и алгоритмов, стало возможным создание

высокоточных виртуальных моделей месторождений, полностью отображающих трехмерную геометрию рудных тел, тектонических нарушений, стратиграфических границ и других геологических объектов. Процесс создания такой модели начинается со сбора и обработки разнообразных данных. Геофизические исследования, такие как сейсмическая съемка, гравиметрическая и магнитометрическая разведка, предоставляют информацию о глубинном строении земной коры, определяя положение и форму геологических тел на значительной глубине. Данные бурения, включая керн, каротажные диаграммы и результаты лабораторных анализов, дают детальную информацию о составе и свойствах горных пород в точках бурения. Геохимический анализ проб почв, поверхностных и подземных вод позволяет определить зоны концентрации полезных ископаемых и оценить их масштабы. Дистанционное зондирование, включая аэрофотосъемку и спутниковые данные, обеспечивает обзорную информацию о геологическом строении территории, выявляя линейamenty, структуры и другие геологические особенности, недоступные для наземных наблюдений.

Все эти данные, представленные в различных форматах, интегрируются в специализированные программные комплексы, которые позволяют строить трехмерные геологические модели. Процесс моделирования включает в себя этапы интерпретации данных, построения геологических поверхностей, создания трехмерной геометрии тел и присвоения им литологических и геохимических свойств. Современные программные продукты позволяют визуализировать модели в различных проекциях, анализировать их свойства, выполнять геостатистические расчеты, оценивать объемы и качество рудных тел, а также проводить симуляцию различных геологических процессов. Это значительно повышает точность оценок запасов, оптимизирует планирование горных работ, снижает риски и повышает эффективность геологоразведочных работ.

Более того, 3D-моделирование позволяет проводить чувствительный анализ данных, изучать влияние различных параметров на итоговые результаты, и тестировать различные сценарии разработки месторождения (рис. 1). Это позволяет геологам и горнякам принимать более обоснованные решения, учитывая все возможные риски и неопределенности. Возможность интерактивного исследования модели, изменение параметров и непосредственное наблюдение за результатами делает 3D-моделирование незаменимым инструментом для современной геологии и горной промышленности. В будущем, с развитием технологий и накоплением данных, 3D-моделирование будет играть все более важную роль в решении сложных геологических задач, способствуя эффективному и безопасному освоению минеральных ресурсов.

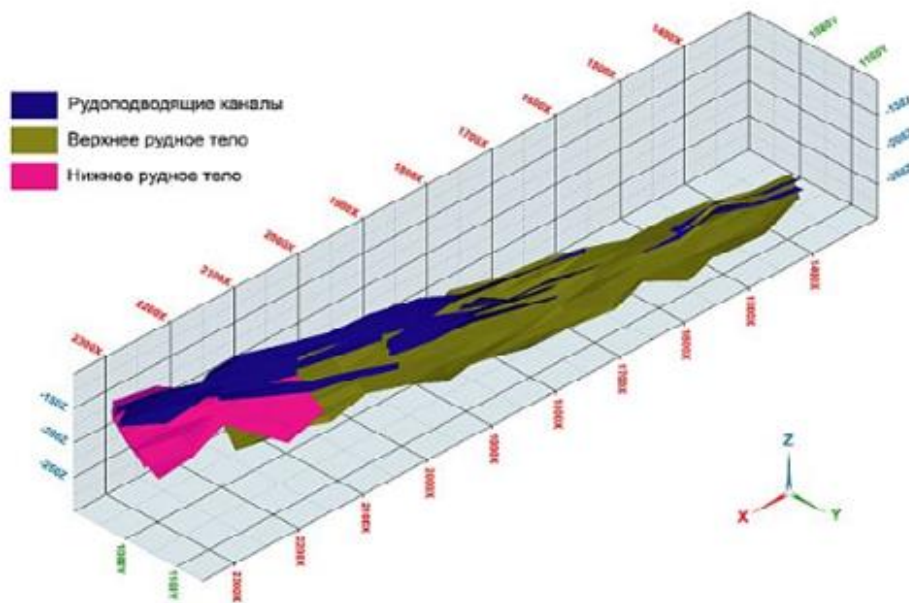


Рис. 1. Трехмерная модель геологического разреза, созданная на основе данных бурения и геофизических исследований

На этапе разведки 3D-моделирование позволяет оптимизировать программу буровых работ, минимизируют затраты и максимизируют объем информации. Визуализация геологических данных помогает точнее определить границы рудных тел, оценить их форму и размеры, а также прогнозировать распространение полезных ископаемых. Это приводит к более точной оценке запасов и ресурсной базы, что напрямую влияет на экономическую эффективность проекта. Кроме того, моделирование помогает в планировании геофизических исследований, оптимизируя выбор методик и размещение профилей. На этапе разведки, 3D-моделирование выходит далеко за рамки простой визуализации. В основе лежит построение цифрового двойника месторождения, интегрирующего разнообразные данные: геологическую информацию из скважин (литология, керн, геохимия), результаты геофизических исследований (гравиметрия, магниторазведка, электроразведка, сейсморазведка), данные дистанционного зондирования (аэро- и космосъемка) и топографические данные. Каждый источник информации проходит этап обработки и валидации, прежде чем интегрироваться в общую модель. Несоответствия и неточности выявляются и анализируются, что позволяет повысить достоверность модели и снизить риски, связанные с принятием решений на основе неполной или неточной информации.

Например, данные керна, пройденные через процедуру петрофизического анализа, дают информацию о пористости, проницаемости и насыщенности горных пород полезными ископаемыми. Эта информация, в сочетании с геохимическими данными, позволяет более точно определить зону оруденения и ее характеристики. Геофизические данные, в свою очередь, предоставляют информацию о структуре подземного пространства, позволяя идентифицировать скрытые рудные тела или тектонические нарушения, которые мо-

гут влиять на размещение и форму рудных залежей. Высокоточное 3D-моделирование позволяет объединить эти разнородные данные в единую когерентную картину, визуализируя сложные геологические структуры и пространственное распределение полезных ископаемых.

Кроме того, 3D-моделирование позволяет проводить различные сценарии бурения, оптимизируя расположение и глубину скважин. Виртуальное бурение позволяет выявить оптимальные точки для отбора керна, минимизировав количество пробуренных скважин и, следовательно, снизив затраты на бурение. Это особенно актуально в условиях сложной геологии или труднодоступных местностей. Моделирование также помогает оценить риски, связанные с бурением [1], такие как встреча с водоносными горизонтами или тектоническими нарушениями.

На основе 3D-модели можно проводить различные геостатистические симуляции, которые позволяют оценить неопределенности в оценке запасов. Это позволяет получить диапазон возможных значений запасов с указанием вероятности каждого значения, что позволяет принимать более взвешенные решения относительно экономической целесообразности проекта.

В целом, использование 3D-моделирования на этапе разведки позволяет значительно улучшить качество геологической информации, повысить точность оценки запасов и ресурсной базы, оптимизировать программу буровых работ и горных работ, а также снизить риски и затраты, связанные с разработкой месторождения (рис. 2). Это делает 3D-моделирование неотъемлемым инструментом современной геологоразведки, способствующим принятию более обоснованных и экономически эффективных решений.

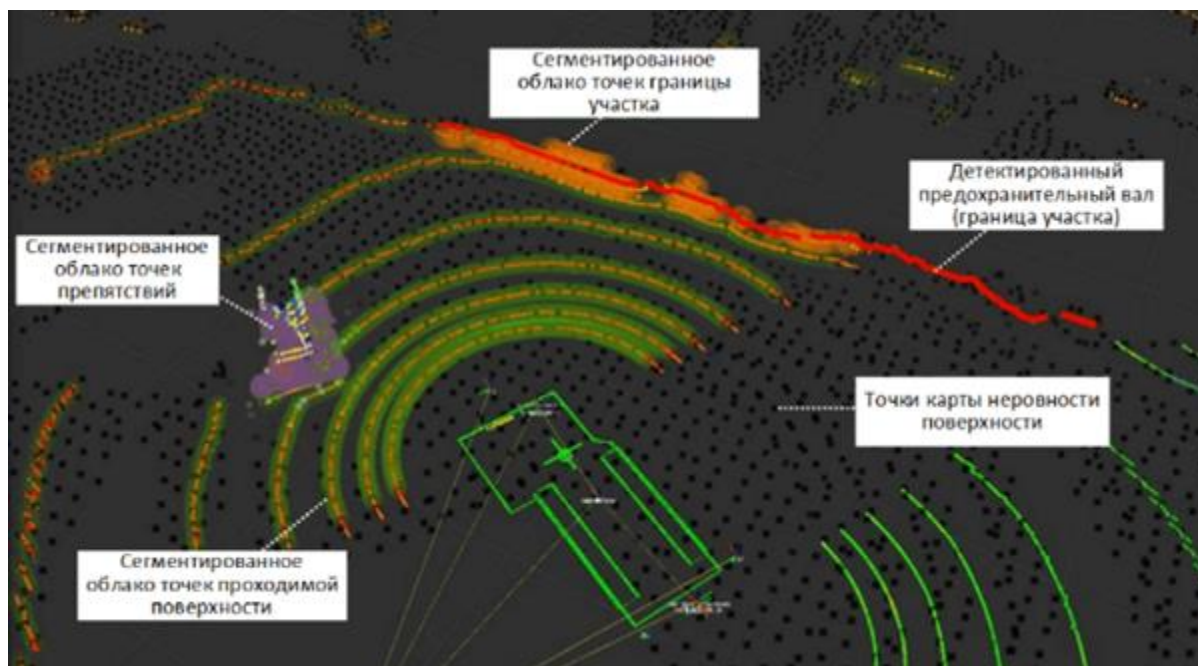


Рис. 2. Оптимизация программы буровых работ на основе 3D-моделирования

На стадии проектирования, трехмерные модели становятся не просто визуальными представлениями, а мощным инструментом, позволяющим инженерам-проектировщикам глубоко проникать в суть геологической структуры месторождения. После построения базовой геологической модели, включающей в себя данные бурения, геофизических исследований и геохимического анализа, начинается детальная разработка трехмерной модели выработок. Здесь учитывается не только геометрия залежей полезного ископаемого, но и все инженерно-геологические параметры: прочность горных пород, трещиноватость, водоносность, наличие тектонических нарушений. Каждый слой породы моделируется с учетом своих физико-механических свойств, что позволяет проводить точные расчеты устойчивости выработок на разных этапах разработки [2].

В процессе проектирования широко применяются специализированные программные комплексы, позволяющие симулировать различные сценарии разработки месторождения. Например, можно смоделировать работу различных видов горных машин, оценить производительность и оптимизировать траектории движения техники, учитывая ограничения, накладываемые геологическими условиями и безопасностью работ. Система позволяет прогнозировать напряженное состояние горного массива вокруг выработок, что является критическим фактором для предотвращения обрушений и других аварийных ситуаций.

Особое внимание уделяется моделированию систем вентиляции и водоотлива. С помощью 3D-моделирования можно определить оптимальную конфигурацию вентиляционных сетей [2], обеспечивающую необходимый уровень безопасности и комфорта для рабочих. Аналогичным образом моделируется система водоотлива, с учетом прогнозируемых притоков подземных вод и геологических особенностей месторождения. Это позволяет избежать затопления выработок и гарантировать бесперебойную работу шахты или карьера.

Экономическая эффективность проекта также является ключевым параметром моделирования. Программное обеспечение позволяет оценить затраты на различные этапы разработки, учитывая стоимость оборудования, энергопотребление, зарплату персонала и другие факторы. Моделирование позволяет выбрать наиболее выгодный вариант разработки с точки зрения минимизации затрат и максимизации прибыли.

Наконец, экологическая безопасность является неотъемлемой частью проектирования. Современные технологии трёхмерного моделирования дают возможность предсказывать, как разработка месторождений повлияет на окружающую среду. Мы можем увидеть, как изменится ландшафт, каким будет уровень загрязнения почвы и воды, и сколько парниковых газов будет выброшено в атмосферу. Полученные с помощью 3D-моделирования данные позволяют заранее разработать и внедрить меры, снижающие негативное воздействие горных работ на природу и обеспечивающие экологическую безопасность. Благодаря этому методу, ещё на этапе проектирования шахт и ка-



рьеров, мы можем оптимизировать горнодобывающие процессы, сделав их более эффективными и безопасными, снизив финансовые затраты и минимизировав вред, наносимый окружающей среде. Проще говоря, 3D-моделирование помогает строить экологически ответственные и экономически выгодные горнодобывающие предприятия.

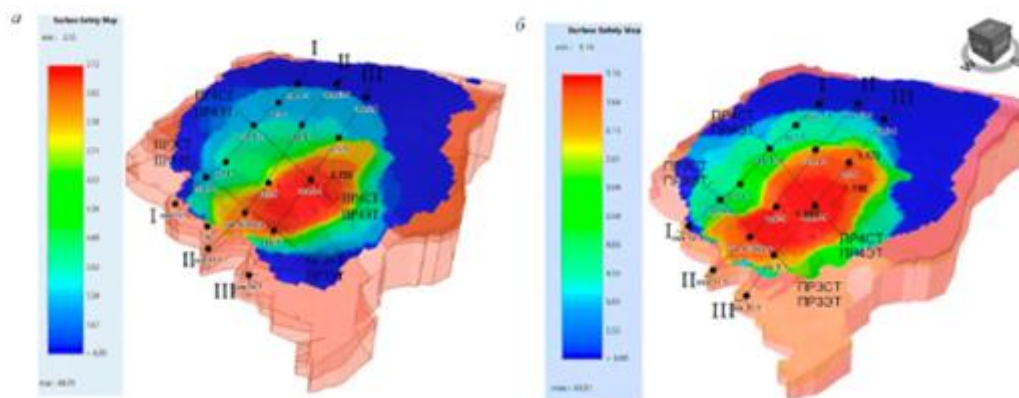


Рис. 3. Планирование горных работ на основе 3-D моделирования

Современная горно-геологическая графика играет важную роль в мониторинге состояния горных выработок и управлении рисками. 3D-модели позволяют отслеживать изменения геологической ситуации, прогнозировать возможные аварии и разрабатывать меры по предотвращению нештатных ситуаций. Визуализация зон повышенного риска (например, зон тектонических нарушений или оползней) помогает принимать профилактические меры и обеспечивать безопасность горных работ [3]. Современная горно-геологическая графика, выходящая далеко за рамки простых чертежей и карт, представляет собой мощный инструмент, интегрирующий данные различных источников для создания комплексных 3D-моделей горных массивов. Эти модели, основанные на данных геофизических исследований (сейсмической томографии, электроразведки), геологического картирования, бурения и других методов, позволяют специалистам не только визуализировать геологическую структуру, но и проводить детальный анализ напряженно-деформированного состояния горных пород. Например, используя метод конечных элементов (МКЭ), можно смоделировать распространение горного давления, выявить зоны концентрации напряжений и предсказать вероятность развития трещин, обрушений и других опасных геологических явлений.

Визуализация данных играет ключевую роль в повышении эффективности принятия решений. Современные программные продукты позволяют отображать информацию в интерактивном режиме, позволяя "прогуливаться" по виртуальной модели горного массива, исследовать геологическую структуру с любой точки зрения и масштаба [3]. Это особенно важно при планировании горных работ, позволяя оптимизировать траектории выработок, минимизировать риски и повысить производительность.

**22-25 апреля 2025 г.**



## Список литературы:

1. Капутин Ю. Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. Л.: Недра. 2002. 424 с.
2. Шатагин Н. Н., Щеглов В. И. Моделирование месторождений и рудных полей на ЭВМ (диалоговые системы): Учеб. Пособие для вузов. — М.: Недра, 1989. — 150 с.
3. Корриган Дж. Компьютерная графика: Секреты и решения: Пер. с англ. — М.: Энтроп, 1995