

УДК 622.014.2:658.513.011.56:681.3:622.1

В.М. Шек, В.Н. Сученко

**ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Семинар № 1

Моделирование месторождения начинается на этапе его геологического обследования и разведки и включает ряд последующих этапов (проектирование, строительство и подготовка производства, добыча и ряд других).

Первичная модель создается на начальной стадии геологической разведки месторождения. Затем, по мере ведения геолого-разведочных работ, она уточняется и насыщается дополнительными данными, служит для определения ресурсов и запасов полезных ископаемых, подсчета кондиций. При проектировании горного предприятия она трансформируется для сопряжения с моделью сети горных выработок, служит основой для ее построения. В процессе строительства и эксплуатации горного предприятия модель служит для управления процессом добычи, одновременно участвуя в планировании и учете движения запасов полезных ископаемых.

Рассмотрим эти процессы подробнее для анализа требований к процессам моделирования месторождений и, соответственно, составу и содержанию цифровой горной графической документации, служащей основным источником пространственной информации для построения модели месторождения, а также ее визуальным отображением на различных стадиях моделирования.

Приведем перечень основных моделей исследуемой горнопромышленной системы. Рассмотрение будем проводить «сверху вниз» по уровням иерархии системы.

Уровень I. На этапе разведки месторождения производится его геолого-экономическая оценка, и определяются параметры кондиций. Первая должна охарактеризовать эффективность отработки данного месторождения, вторые - дать возможность определения контуров промышленных рудных тел, основных параметров отдельных блоков месторождения.

Полезное ископаемое (например, медь или никель) извлекается из месторождения (M), имеющего запасы Q_1 с некоторыми потерями, т.е. добывается руда, содержащая количество меди Q_2 ($Q_2 = k_1 Q_1$). Здесь k_1 - коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр. Добытая горная масса (D) транспортируется на обогатительную фабрику, где из нее получается концентрат (O), содержащий медь в количестве Q_3 ($Q_3 = k_1 k_2 Q_1$). Этот концентрат поступает на металлургический завод (в нашем случае медеплавильный завод), где из него получают первый продукт (P) - черновую медь в количестве Q_4 ($Q_4 = k_1 k_2 k_3 Q_1$). Далее из нее получают в электролитном цехе медьзавода рафинированную медь в количестве Q_5 . Большую часть листов рафинированной меди пакеуют и отправляют потребителям. Часть листов могут отправить, например, в цех катанки завода, где из них делают проволоку (катанку) (R). Потом часть катанки отправляют на заводы по изготовлению проводов и изделий из них, из оставшейся части могут производить троллейный провод.

На рисунке приведена возможная схема стадий извлечения меди и производства изделий из нее.

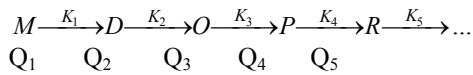


Схема извлечения полезного ископаемого и начальных стадий производства из него изделий

Для последовательных стадий извлечения и переработки конкретного полезного ископаемого объем его производства можно определить как

$$Q_m = Q_1 \prod_{j=1}^{m-1} k_j,$$

где Q₁ и Q_m - количество полезного ископаемого в недрах и после (m-1)-ой стадии извлечения (переработки), соответственно; k_j - коэффициент его извлечения на j-той стадии извлечения или переработки.

Кондиции по своему содержанию - это совокупность требований к качеству полезных ископаемых в недрах и горно-геологическим условиям их залегания, позволяющих оконтурить месторождение и выделить в нем блоки с балансовыми запасами полезных ископаемых. При этом учитывается, что стоимость товарной продукции из каждой тонны добытой руды должна покрывать все затраты по ее извлечению и переработке. Однако наличие комплексных руд усложняет расчет кондиций и запасов месторождения. Кроме того, в рудах месторождения содержатся благородные металлы и ряд редкоземельных элементов. Так как простое суммирование объемов полезных ископаемых (даже при приведении названных их видов к «условной меди») не дает должного эффекта, требуется применение стоимостных показателей.

Прибыль от реализации товарной продукции, полученной после извлечения и переработки руды из i-того блока месторождения, составляет

$$P_i = \sum_{j=1}^n C_j \cdot Q_j \cdot \prod_{l=1}^p k_{jl} - M_i \cdot \sum_{r=1}^p Z_r \cdot \prod_{l=1}^r k_{jl},$$

где C_j и Q_j - стоимость единицы массы (на r-й стадии извлечения) и количество в i-м блоке j-го полезного ископаемого (металла), соответственно; k_{jl} - коэффициент извлечения j-го полезного ископаемого на l-й стадии извлечения (переделе); n - количество полезных компонентов в руде блока; p - число рассматриваемых стадий извлечения полезных компонентов; M_i - количество (масса) руды в i-м блоке; Z_r - удельные затраты на r-й стадии (переделе).

На стадии проектирования горного предприятия рассматриваются несколько альтернативных вариантов (стратегий) вскрытия и отработки месторождения с одновременным определением минимального промышленного содержания полезных компонентов. По каждому из вариантов проводится технико-экономическая оценка с целью выбора среди них наилучшего. При этом могут использоваться несколько видов экономико-математических моделей. Ниже приводится одна из них

$$P_s = \sum_{i \in I} \left(\sum_{j=1}^n C_j \cdot Q_{ij} \cdot \prod_{l=1}^p k_{jl} - M_{is} \cdot \sum_{r=1}^p Z_r \cdot \prod_{l=1}^r k_{jl} \right) \rightarrow \max,$$

при

$$\sum_{j=1}^n C_j \cdot Q_{ij} \cdot \prod_{l=1}^p k_{jl} \geq M_i \cdot \sum_{r=1}^p Z_r \cdot \prod_{l=1}^r k_{jl}, \quad \forall i,$$

где P_s - прибыль от реализации s-той стратегии производства товарной продукции из полезных ископаемых месторождения; I - множество блоков месторождения.

Решение этой задачи методами линейного программирования позволяет в первом приближении определить запасы месторождения. Ограничения обычно учитываются при разработке кондиций для месторождения. В результате решения определяется также способ отработки месторождения или его части.

Одновременно рассчитываются бортовое и минимальное промышленное содержание

жание полезных компонентов в руде. Допустим, для Джезказганского месторождения эти критерии рассчитываются по меди, в комплексных рудах свинец и цинк пересчитываются в условную медь. По мере «удлинения» цепочки переделов в НПО «Джезказганцветмет» и изменения технологий добычи и извлечения основных полезных компонентов бортовое содержание принималось равным 0,7 % Cu, 0,6 % Cu, 0,5 % Cu, 0,3 % Cu. Соответственно изменялось и минимальное промышленное содержание. Каждое такое изменение влекло за собой полный пересчет запасов полезных компонентов по месторождению с существенным приростом последних. В системе учета движения запасов результаты моделирования постоянно проверяются, уточняются и пополняются геологической службой объединения по мере ведения детальной и эксплуатационной разведки.

Уровень II. На следующей стадии проектирования горного предприятия составляются оптимизационные модели отработки месторождения или его участка. Здесь также большое внимание уделяется оптимизации минимального промышленного содержания полезного компонента или их совокупности. Эта задача сложна тем, что оптимальные значения минимального промышленного содержания полезного компонента тесно увязаны с производственной мощностью горного предприятия. В совокупных моделях определения мощности горного предприятия и значения минимального промышленного содержания полезного компонента критерием оптимальности является экономический показатель, чаще всего максимум приведенной прибыли. Из-за большой размерности задачи (как по числу рассматриваемых элементов (блоков), так и по числу реализуемых вариантов порядка их отработки) в качестве методов поиска оптимального варианта используются динамическое или стохастическое программирование на ЭВМ.

В случае использования динамического программирования основное рекуррентное соотношение формулируется следующим образом.

$$R(d_1, C_1; d_2, C_2; \dots; d_T, C_T) = z_1(d_{1j}, C_{1j}) + z_2(d_{2j}, C_{2j}) + \dots + z_T(d_{Tj}, C_{Tj}) \rightarrow \max \quad (1)$$

$$0 \leq d_{ij} \leq M_j;$$

$$\text{при } \sum_{j=1}^n d_{ij} \leq P_i, (i = 1, 2, 3, \dots, T)$$

$$\sum_{i=1}^t d_{ij} = M_j; \quad \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N d_{ij} = D, \quad (2)$$

где $z_i(d_{ij}, C_{ij})$ - прибыль от добычи d_{ij} с содержанием полезного компонента C_{ij} из j -го блока в i -й период времени; T - общее время отработки месторождения; M_j - объем j -го блока; P_i - производительность предприятия в i -тый период времени; D - общие запасы месторождения; n - число блоков, обрабатываемых в i -й период времени; N - общее число блоков месторождения; t - период времени, за который отрабатывается j -й блок.

Основное функциональное уравнение для оптимизации будет иметь вид

$$f_t(d) = \max_{d_t, c_t} [z_j(d_t, C_t) + f_{t-1}(D - d_t, C_{t-1})], \quad (3)$$

где $f_t(d)$ - прибыль, получаемая при оптимальном решении за t периодов, с учетом ограничений (2).

В связи с тем, что отработка месторождения занимает продолжительный период времени, в течении которого цены на металл претерпевают значительные изменения, необходимо отразить это в исследуемых моделях. Заранее функции изменения цены в явном виде задать невозможно, поэтому приходится оперировать с вероятностными величинами. Предполагается, что цены в начале каждого рассматриваемого периода времени могут изменяться, переходя в соответствии с определенной степенью вероятности от одного допустимого значения к другому.

Эти вероятностные переходы задаются матрицей переходов $Q = (Q_{ij})$.

В этом случае стохастическая программа определения оптимальной стратегии отработки месторождения с учетом изменчивости цен будет иметь вид

$$f_t(d) = \max_{d_t, C_t} \left[\sum_{j=1}^n z_j(d_t, C_t) \cdot Q_j(t) + f_{t-1}(D-d_t, C_{t-1}) \right], \quad (4)$$

где $Q_j(t)$ - вероятность цены j в период времени t , определяемая как

$$Q_j(t) = \sum_{i=1}^n Q_{ij}(t-1) \cdot Q_{ij}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

где Q_{ij} - вероятность перехода от цены j к цене i . При этом $0 \leq Q_{ij} \leq 1, \forall_{ij}$ и $\sum_{j=1}^n Q_{ij} = 1, \forall_i$.

Решение этой задачи позволяет определить оптимальный план разработки месторождения с одновременным уточнением значения минимального промышленного содержания полезных компонентов и, соответственно, общих их запасов в месторождении. Исходная информация для решения задач берется из данных электронной модели месторождения, позволяющей определять функции распределения содержания полезных компонентов в телах (объемах) полезных ископаемых. При этом принимается, что содержание полезных компонентов в любом обрабатываемом блоке является величиной постоянной. Кроме того, приведенные выше модели предусматривают полную (сплошную) отработку месторождения и не пригодны для случаев селективной выемки. Задачи второго типа можно частично решать с использованием приведенных моделей за счет рассмотрения не месторождения в целом, а отдельных принимаемых к отработке его участков. Стоит отметить, что для решения задач вида (3–4) необходима такая модель месторождения, которая позволяет пересчитывать запасы полезных ископаемых при значительных изменениях задаваемых

(постулируемых) геолого-экономических параметров. Большинство применяемых в настоящее время моделей месторождений позволяют лишь однократно задавать эти параметры при их создании. В случае необходимости изменения этих параметров приходится фактически создавать новую модель и осуществлять большой объем вычислений по определению формы тел и запасов полезных ископаемых. В модели не содержится информация о ресурсах полезных ископаемых, не являющихся на момент расчета промышленными запасами.

Построение математической модели месторождения с использованием описанных выше предложенных нами способов выделения геологических блоков и подсчета в них количества полезных ископаемых позволяет оперативно перестраивать контуры рудных тел и осуществлять пересчет запасов полезных ископаемых в них. При этом имеется возможность расчета концентрации полезных компонентов в любом заданном объеме внутри блока. Размеры (площадь сечения) блоков оптимизируются с целью получения возможности отработки большинства из них за один рассматриваемый в моделях (3–4) период времени t .

Минеральные ресурсы, находящиеся в земной коре, кажутся, на первый взгляд, массивными, незыблемыми, неизменными. Это связано с тем, что формирование месторождений полезных ископаемых, наряду с другими процессами в земной коре, происходит с позиций человечества крайне медленно и отсчитывается поэтому по геологической шкале времени. *Моделирование этих процессов производится во временных периодах, масштабируемых с этой шкалой.*

Однако, попав в сферу инженерной деятельности человека, минеральные ресурсы (месторождения полезных ископаемых) «начинают жить в нашем времени», стремительно проходя этапы *открытия, изучения, подготовки к эксплуатации, до-*

бычи и переработки. Особенно подвижны при этом информационные процессы. Количество объектов, их характеристик и параметров, информационных процессов и документов и особенно общий объем обрабатываемой информации растут в геометрической прогрессии. При этом видоизменяются и усложняются информационные связи, растет число и сложность используемых моделей.

Каждое месторождение полезных ископаемых, даже самое простое с точки зрения геологического строения, является уникальным по полной совокупности его характеристик и показателей. Это подтверждается наличием большого количества и сложностью классификаций месторождений.

Отсюда и разнообразие способов и методов изучения месторождений полезных ископаемых, используемых при этом моделей и методов их реализации.

Минеральные ресурсы попадают в сферу деятельности человечества в результате проводимых геологоразведочных работ. Геологоразведочный процесс длителен и имеет, как правило, следующие стадии:

- региональное геологическое изучение территории страны;
- геологические работы масштаба 1:50000 (1:25000) с общими поисками;
- поисковые работы;
- поисково-оценочные работы;
- предварительная разведка;
- детальная разведка;
- доразведка месторождения;
- эксплуатационная разведка.

Каждая стадия разведки отличается от предыдущей большими затратами ресурсов для получения более подробных и более точных данных о разведываемых полезных ископаемых. При этом в связи с большим разнообразием видов минеральных ресурсов и условий их залегания разведка каждого месторождения, проводимая с соблюдением общих правил и использованием общепринятых методов,

имеет, как правило, много своеобразных, порой уникальных черт. Поэтому здесь нет строгих алгоритмов и правил ведения работ, большинство руководящих документов имеют вид рекомендаций. Полученная в результате этих работ информация о минеральных ресурсах позволяет перейти к построению геологической (геолого-геофизической) модели месторождения полезных ископаемых с использованием геологических, горно-технологических и экономических критериев. При этом для рудных полезных ископаемых определяются границы контура рудного тела (четкие или расплывчатые, «эвентуальные»), градиенты содержания полезных компонентов в рудоносных и смежных «малорудоносных» породах. Для твердых энергетических полезных ископаемых определяются параметры пластов, характеристики полезных ископаемых и содержащихся примесей. Изучается нарушенность массивов пород: макронарушения (сбросы, надвиги, перегибы), поздние тектонические включения, микронарушения (пережимы, утолщения и т.п.).

Построенная геологическая (как правило, трехмерная) модель месторождения имеет вероятностную природу. По мере увеличения степени изученности (разведки) месторождения его вероятностные параметры приобретают большую степень достоверности, модель насыщается детализирующими признаками и характеристиками.

На определенной стадии развития геологической модели появляется возможность перехода к построению модели ресурса (комплексной модели ресурсов). В зависимости от степени разведанности ресурсы подразделяют на: глобальные (геологические аномалии), гипотетические, выведенные, подтвержденные и разграниченные (проверенные). При введении критерия «бортовое содержание» модели ресурсов подразделяют: по каждому выделенному полезному компоненту, по ос-

новному компоненту, по комплексному (приведенному) компоненту.

Затем производится определение кондиций запасов с использованием трех групп показателей:

- горно-технологических:
 - вынимаемая мощность (рудного) тела, пласта;
 - нарушенность массива;
 - взаимное расположение рудных тел и массива вмещающих пород;
- технологических (извлечение):
 - по обогатимости:*
 - % полезных компонентов и примесей (вредных и полезных);
 - дробимость;
 - извлечение (гравитация и флотация);
 - по металлургии:*
 - выщелачивание;
 - выплавка;
 - гидрометаллургия;
 - экономических:
 - себестоимость добычи 1 м³ (т) руды;
 - себестоимость процессов обогащения, металлургии;
 - цена конечного продукта (концентрата, металла, угля и т.д.);
 - рентабельность (прибыль).

Далее идет построение модели (моделей) запасов полезных ископаемых. Основное их назначение - обеспечение пересчета запасов как для новых (резервных), так и для разрабатываемых месторождений. *Пересчет производится периодически по мере увеличения степени разведанности (изученности) месторождения, изменения кондиций, конъюнктуры рынка и др.*

На разрабатываемых месторождениях сюда добавляется подсчет различных категорий запасов: активные; подготовленные к выемке; добытые (вынутые); потери; разубоживание (из «нижних» кондиций) и т.д.

Следует отметить, что *вышеназванные модели являются основой для прогноза развития отрасли, проектирования горных предприятий, планирования и управления их функционированием.*

При моделировании процесса функционирования горного предприятия, объединения и т.д. к этим моделям добавляются модели технологических процессов, технико-экономические и организационно-экономические.

Однако этот процесс не является плавным: используется не одна универсальная, настраиваемая по мере необходимости модель, а *чередает не очень согласованных, различающихся по виду и форме представления данных моделей.* Даже целевое назначение моделей, используемых геологами, проектировщиками горных предприятий и эксплуатационниками, различно. Поэтому *сопряжены эти модели в единый комплекс даже для «простых» месторождений требует очень значительных затрат времени и сил, а также принятия дополнительных ограничений и огрублений в моделях.* При этом некоторые модели необходимо перестраивать или заменять «эквивалентными» по целям и описываемым системным функциям, отличными по интерфейсу, внутренним функциям и, соответственно, механизму реализации.

Коротко об авторах

Шек В.М. – профессор, доктор технических наук,
Сученко В.Н. – кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный горный университет.