

Лекция 7. Геолого-технологический и геостатистический контроль качества рудной массы

Цель лекции: изучить методы оперативного и стратегического контроля качества минерального сырья на всех этапах производства.

План лекции:

1. Геолого-технологическое картирование месторождения (технологические типы и сорта руд).
2. Геостатистическое моделирование (вариограммный анализ, кригинг) для управления содержаниями.
3. Системы опробования и экспресс-анализа (рентгенофлуоресцентный, нейтронно-активационный, лазерно-искровая спектрометрия).
4. Усреднение качества на рудных складах и перед обогатительной фабрикой.
5. Цифровое управление качеством (блоковые модели, планирование забоев с учётом содержаний).

Управление качеством рудной массы является одной из ключевых задач современного горного производства. От точности прогнозирования содержаний полезных компонентов, своевременного выявления отклонений и оперативной корректировки планов добычи зависят экономическая эффективность предприятия, стабильность работы обогатительной фабрики и полнота извлечения ценных компонентов. Контроль качества осуществляется на всех этапах технологической цепочки – от геологического моделирования месторождения до отгрузки готового концентрата.

1. Геолого-технологическое картирование месторождения

1.1. Понятие и цели геолого-технологического картирования

Геолого-технологическое картирование (ГТК) представляет собой комплекс работ по изучению и пространственной локализации технологических свойств полезных ископаемых с целью обоснования рациональных схем переработки и оптимизации управления качеством рудной массы. ГТК является связующим звеном между геологической разведкой и технологией переработки, обеспечивая переход от традиционного геологического описания к технологической оценке сырья.

Основные цели ГТК:

- Выделение промышленных (технологических) типов и сортов руд на основе их вещественного состава, физико-механических и технологических свойств.
- Пространственное оконтуривание достаточно крупных геологических объёмов с одинаковыми по сортности рудами.

- Составление геолого-технологических карт и разрезов, отражающих распределение технологических сортов руд в массиве.

- Обеспечение возможности селективной выемки и усреднения рудной массы.

- Планирование добычи с учётом качественных характеристик сырья.

1.2. Технологические типы и сорта руд

Технологический тип руды – это руда устойчивого минерального и химического состава, которая перерабатывается по определённой схеме обогащения. Выделение технологических типов основывается на:

- Минеральном составе руд (основные рудные минералы, их взаимосвязь);
- Химическом составе (содержание полезных и вредных компонентов);
- Структурно-текстурных особенностях;
- Технологических свойствах (обогащаемость, флотационная активность, выщелачиваемость).

Технологический сорт руды – подразделение промышленного технологического типа, выделяющееся по какому-либо параметру качества и показателям обогащения. Технологический сорт имеет общую для данного типа схему переработки, но отличается технологическими показателями переработки (выход концентрата, извлечение, качество продуктов).

Например, для медно-порфировых руд могут выделяться технологические сорта по содержанию меди (богатые, рядовые, бедные), по соотношению сульфидной и окисленной меди, по содержанию попутных компонентов (золото, молибден).

1.3. Методика проведения геолого-технологического картирования

ГТК проводится в несколько этапов:

1. Сбор и систематизация геологических данных – анализ результатов геологоразведочных работ, керна, материала, данных опробования.

2. Отбор минералого-технологических и малых технологических проб массой от 1 до 50 кг для проведения технологических исследований по сокращённой схеме.

3. Лабораторные технологические исследования – изучение вещественного состава, определение технологических свойств, выбор оптимальной схемы обогащения.

4. Типизация и сортировка руд – выделение технологических типов и сортов на основе результатов исследований.

5. Пространственное картирование – составление геолого-технологических карт и разрезов, отражающих распределение выделенных типов и сортов в пределах месторождения.

6. Разработка рекомендаций по селективной выемке, усреднению и управлению качеством рудной массы.

ГТК позволяет перейти от геологического моделирования, основанного на содержаниях полезных компонентов, к технологическому моделированию, учитывающему обогащаемость руд и экономические показатели их переработки.

Это особенно важно для комплексных руд и месторождений со сложной изменчивостью свойств.

2. Геоestatистическое моделирование для управления содержаниями

2.1. Основы геостатистики в горном деле

Геостатистика представляет собой совокупность статистических методов, учитывающих пространственную корреляцию данных и позволяющих количественно оценивать неопределённость оценок запасов и качества руды. В отличие от детерминированных методов, геостатистика оперирует вероятностными категориями и позволяет строить модели, наилучшим образом отражающие реальное пространственное распределение свойств.

Основные преимущества геостатистического подхода:

- Учёт пространственной структуры данных (близкорасположенные пробы более коррелированы);
- Количественная оценка неопределённости оценок;
- Возможность оптимизации разведочных сетей;
- Наилучшая линейная несмещённая оценка (BLUE - Best Linear Unbiased Estimator).

2.2. Вариограммный анализ

Вариограмма является основным инструментом геостатистики, характеризующим пространственную изменчивость исследуемого свойства. Она представляет собой функцию половинной дисперсии разностей значений переменной в зависимости от расстояния между точками наблюдения.

Эмпирическая вариограмма рассчитывается по формуле:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

где:

- $\gamma(h)$ - значение вариограммы для расстояния h ;
- $N(h)$ - число пар точек, разделённых расстоянием h ;
- $Z(x_i)$ - значение переменной в точке x_i ;
- $Z(x_i + h)$ - значение переменной в точке, смещённой на расстояние h .

Теоретические модели вариограмм:

- Сферическая модель: $\gamma(h) = C_0 + C \cdot \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$ для $h \leq a$;
- Экспоненциальная модель: $\gamma(h) = C_0 + C \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{3h}{a} \right) \right]$;
- Гауссова модель: $\gamma(h) = C_0 + C \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{3h^2}{a^2} \right) \right]$.

Ключевые параметры вариограммы:

- Эффект самородков (nugget effect) - дисперсия на нулевом расстоянии, отражающая ошибки измерений и микроизменчивость;
- Порог (sill) – предельное значение вариограммы, характеризующее общую дисперсию;

- Радиус корреляции (range) – расстояние, на котором пространственная корреляция перестаёт проявляться.

Вариограммный анализ позволяет:

- Оптимизировать разведочные сети;
- Выявлять тренды и анизотропию;
- Обоснованно выбирать метод интерполяции;
- Оценивать точность прогнозов.

2.3. Кригинг

Кригинг – метод пространственной интерполяции, дающий наилучшую линейную несмещённую оценку значений переменной в неопробованных точках.

Основные виды кригинга:

1. Обычный кригинг (Ordinary Kriging) – наиболее распространённый метод, основанный на допущении о постоянстве среднего значения в локальной области. Используется для большинства задач оценки содержаний.

2. Простой кригинг (Simple Kriging) – предполагает известное глобальное среднее. Применяется реже.

3. Универсальный кригинг (Universal Kriging) – учитывает наличие тренда в данных.

4. Кокригинг (Co-Kriging) – позволяет использовать корреляцию между несколькими переменными для улучшения оценок. Особенно эффективен, когда пробы анализируются на преимущественно более ценный компонент, а вспомогательная переменная измеряется с большей плотностью.

Система уравнений обычного кригинга:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x_0), \quad i = 1, \dots, n$$
$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

где:

- λ_j - весовые коэффициенты;
- $\gamma(x_i - x_j)$ - значения вариограммы между опробованными точками;
- $\gamma(x_i - x_0)$ - значения вариограммы между опробованной и оцениваемой точками;

- μ - множитель Лагранжа.

Преимущества кригинга:

- Минимальная дисперсия ошибки оценки;
- Отсутствие систематического смещения;
- Количественная оценка точности оценки (дисперсия кригинга).

Недостатки:

- Трудоёмкость вычислений для больших массивов данных;
- Чувствительность к выбору модели вариограммы;
- Необходимость стационарности данных.

3. Системы опробования и экспресс-анализа

Опробование является основой контроля качества рудной массы. От достоверности и оперативности результатов опробования зависит эффективность управления качеством на всех этапах горного производства.

3.1. Виды опробования

По назначению выделяют:

- Поисково-разведочное опробование – для выявления и оценки месторождений;
- Эксплуатационное (технологическое) опробование – для контроля качества при добыче;
- Товарное опробование – для определения качества готовой продукции.

По способу отбора проб:

- Точечное опробование – отбор отдельных проб из забоя, дучек, транспортных средств;
- Валовое опробование – отбор объединённых проб, характеризующих среднее качество партии.

3.2. Современные методы экспресс-анализа

Современные методы экспресс-анализа позволяют получать результаты в реальном времени, что критически важно для оперативного управления качеством.

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА)

Метод основан на измерении характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого в образце под действием первичного излучения. Преимущества:

- Высокая скорость анализа (1-3 минуты);
- Минимальная пробоподготовка;
- Одновременное определение до 30-40 элементов;
- Широкий диапазон определяемых концентраций.

Недостатки:

- Сложность определения лёгких элементов ($Z < 11$);
- Влияние матричных эффектов;
- Необходимость калибровки по стандартным образцам.

Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА)

Метод основан на облучении образца потоком нейтронов с последующей регистрацией наведённой радиоактивности. Преимущества:

- Высокая чувствительность для многих элементов;
- Минимальные матричные эффекты;
- Возможность неразрушающего анализа.

Недостатки:

- Сложность и стоимость оборудования;
- Необходимость соблюдения радиационной безопасности;
- Более длительное время анализа.

Лазерно-искровая спектрометрия (LIBS)

Метод основан на анализе эмиссионного спектра плазмы, образующейся при воздействии мощного лазерного импульса на поверхность образца. Преимущества:

- Минимальная пробоподготовка;
- Возможность локального анализа (микронные области);
- Быстрый анализ (секунды);
- Определение лёгких элементов (H, Li, Be, B).

Недостатки:

- Влияние матричных эффектов;
- Сложность количественного анализа;
- Ограниченная точность для некоторых элементов.

3.3. Организация опробования на горном предприятии

Эффективная система опробования включает:

1. Планирование опробования – определение точек отбора, периодичности, объёмов проб.
2. Отбор и подготовка проб – соблюдение методик отбора, обеспечивающих представительность.
3. Лабораторный контроль качества анализов – систематическая проверка достоверности результатов.
4. Внутренний и внешний контроль – оценка случайных и систематических погрешностей.
5. Геологический контроль анализов – независимая проверка независимо от лабораторного контроля в течение всего периода эксплуатации месторождения.

Текущий контроль качества отбиваемой и выдаваемой рудной массы является главной задачей опробования при ведении очистных работ.

4. Усреднение качества на рудных складах

4.1. Понятие и цели усреднения

Усреднение руды – это операция целенаправленного изменения качества руды путём смешивания различных партий с целью стабилизации её состава. Усреднение улучшает управляемость обогащательным процессом и позволяет повысить показатели работы обогащательных фабрик, в первую очередь извлечения полезных компонентов.

Усреднительные склады потенциально способны заметно сгладить неоднородности и стабилизировать качество потока на фабрику.

Основные цели усреднения:

- Стабилизация содержания полезного компонента в питании обогащательной фабрики;
- Снижение колебаний качества, обусловленных естественной неоднородностью месторождения;
- Обеспечение стабильной работы обогащательного оборудования;
- Повышение извлечения полезных компонентов;

- Снижение затрат на переработку.

4.2. Схемы и методы усреднения

Классификация схем усреднения:

1. Внутрикарьерное (внутришахтное) усреднение – смешивание руды из различных забоев непосредственно в процессе добычи. Осуществляется путём планирования последовательности отработки блоков с учётом их качественных характеристик.

2. Усреднение на рудных складах – создание штабелей усреднённой руды на поверхности. Применяется при больших объёмах добычи и значительной неоднородности руды.

3. Усреднение на обогатительной фабрике – смешивание рудных потоков непосредственно перед переработкой.

При валовом усреднении на горно-обогатительных предприятиях целесообразно применять двух- и трёхстадиальные схемы усреднения.

Методы усреднения:

1. Послойное формирование штабелей – руда укладывается горизонтальными слоями, а затем забирается вертикальными срезами, что обеспечивает усреднение по всей высоте штабеля.

2. Шихтование – смешивание рудных потоков в определённых пропорциях для получения заданного качества.

3. Динамическое усреднение – корректировка потоков в реальном времени на основе данных экспресс-анализа.

4.3. Оптимизация усреднения

Эффективность усреднения определяется:

- Однородностью исходной руды – чем выше изменчивость, тем сложнее усреднение;

- Ёмкостью усреднительных складов – должна соответствовать объёмам добычи и периодичности колебаний качества;

- Точностью прогноза качества – основана на данных геостатистического моделирования;

- Оперативностью контроля – использование систем экспресс-анализа для корректировки усреднения.

Применение математического моделирования и цифровых технологий позволяет повысить эффективность усреднения и снизить потери ценных компонентов.

5. Цифровое управление качеством

5.1. Блочные модели

Блочная модель является основой цифрового управления качеством рудной массы. Она представляет собой трёхмерное дискретное представление месторождения, в котором каждый блок (ячейка) характеризуется набором свойств: содержанием полезных компонентов, технологическим типом, физико-механическими свойствами.

Принципы построения блочных моделей:

1. Дискретизация пространства – разбиение области моделирования на блоки одинакового или переменного размера.
2. Интерполяция свойств – оценка содержаний и других характеристик для каждого блока с использованием геостатистических методов (кригинг).
3. Классификация блоков – отнесение каждого блока к определённому технологическому типу или сорту руды.
4. Обновление модели – регулярная актуализация данных по мере поступления новой информации.

Ключевым результатом является создание трёхмерной блочной модели, позволяющей в режиме реального времени определять качественные характеристики рудного материала с учётом координат разгрузки и черпания и обеспечивать прослеживаемость качественных показателей руды.

5.2. Планирование забоев с учётом содержаний

Цифровое управление качеством позволяет осуществлять планирование горных работ в режиме управления качеством сырья. Основные принципы:

1. Предварительное прогнозирование качества – до начала отработки блока определяются ожидаемые содержания на основе блоковой модели.
2. Оптимизация последовательности отработки – выбор порядка отработки блоков, обеспечивающего стабильное качество рудопотока.
3. Оперативная корректировка планов – на основе данных экспресс-анализа и фактического качества отбитой руды.
4. Прослеживаемость качества – отслеживание качественных характеристик от забоя до обогатительной фабрики.
5. Анализ расхождений – сопоставление прогнозных данных по блоковой модели с фактическими показателями, полученными в процессе добычи.

5.3. Интеграция данных и автоматизация

Современные системы управления качеством объединяют:

- Данные геологоразведки – геологические модели, результаты опробования;
- Данные эксплуатации – фактическое качество отбитой руды, результаты экспресс-анализа;
- Плановые данные – календарные планы добычи, графики отработки блоков;
- Данные обогащения – качество концентрата, извлечение, технологические показатели.

Преимущества цифрового управления качеством:

- Сокращение времени на планирование (с 2 часов до 2 минут для составления схемы взрывания);
- Повышение точности контроля содержаний;
- Снижение потерь и разубоживания;
- Оптимизация работы обогатительной фабрики;
- Максимизация извлечения ценных компонентов.

5.4. Инструменты и программное обеспечение

Для цифрового управления качеством используются:

- Горно-геологические информационные системы – Leapfrog, Surpac, Micromine;
- Специализированные модули управления качеством – модули шихтования и усреднения;
- Системы оперативного контроля – датчики, экспресс-анализаторы, системы прослеживаемости.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое геолого-технологическое картирование и какова его роль в управлении качеством рудной массы? Чем технологический тип руды отличается от технологического сорта?
2. В чём сущность вариограммного анализа и кригинга? Какие задачи решаются с помощью геостатистического моделирования в горном деле?
3. Какие современные методы экспресс-анализа применяются для контроля качества руды? В чём преимущества и ограничения каждого метода?
4. Каковы основные методы и схемы усреднения качества руды? Почему усреднение является важным этапом подготовки руды к обогащению?
5. Как цифровые технологии (блоковые модели, автоматизированное планирование) позволяют повысить эффективность управления качеством рудной массы?

Список использованной литературы

1. Геолого-технологическое картирование месторождений полезных ископаемых // Горный вестник Узбекистана
2. Технологический тип и сорт руды
3. Геостатистическое моделирование: вариограммный анализ и кригинг // Springer
4. Применение кокригинга для оценки содержаний
5. Системы опробования и контроля качества на горных предприятиях