

Лекция 3. Комплексность использования минерального сырья: извлечение попутных компонентов

Цель лекции: Ознакомить магистрантов с принципами и технологиями извлечения основных и попутных ценных компонентов из рудного и нерудного сырья, сформировать понимание экономической и экологической целесообразности комплексного использования минеральных ресурсов.

План лекции:

1. Понятие комплексности: совместная добыча, отдельное обогащение, гидрометаллургическое вскрытие.
2. Примеры месторождений с комплексными рудами (медно-порфировые – Au, Mo, Re; полиметаллические – Pb, Zn, Cu, Ag; алюминиевые – Ga, Sc; урановые – редкоземельные элементы).
3. Технологические схемы глубокой переработки: селективная флотация, спекание, выщелачивание, сорбция.
4. Экономическая эффективность комплексного использования: расчет стоимости попутных компонентов, уменьшение отходов.

1. Понятие комплексности использования минерального сырья

Комплексное использование минерального сырья представляет собой систему организационно-технических и технологических мероприятий, направленных на максимально полное извлечение из недр и переработку всех ценных компонентов, содержащихся в рудах и вмещающих породах, а также на утилизацию отходов горно-обогатительного и металлургического производств. Это составная часть системы комплексного освоения ресурсов недр, альтернативная традиционному экстенсивному подходу, при котором из руды извлекается только основной полезный компонент, а остальные ценные элементы безвозвратно теряются в отвалах и хвостохранилищах.

Полное комплексное извлечение и использование всех полезных компонентов является обязательным условием эффективного использования недр. Попутные полезные компоненты (полезные горные породы, полезные минералы и рассеянные элементы) – это составные части полезных ископаемых, которые могут быть извлечены попутно с основным полезным ископаемым. Однако они приобретают промышленное значение лишь в том случае, если степень их концентрации в продуктах обогащения, металлургического или химического передела обеспечивает экономически эффективное извлечение.

1.1. Основные подходы к комплексному использованию

Совместная добыча – это одновременная выемка из недр нескольких видов полезных ископаемых, залегающих в пределах одного месторождения или в зоне взаимного влияния горных работ. Совместная добыча позволяет:

- сократить затраты на вскрытие и подготовку новых горизонтов;
- использовать общую инфраструктуру (стволы, штреки, транспортные магистрали);

- уменьшить площадь нарушения земель на единицу добытого сырья.

Раздельное обогащение – технологический процесс, при котором рудная масса разделяется на отдельные концентраты, каждый из которых обогащается по самостоятельной схеме в зависимости от физико-химических свойств минералов. Раздельное обогащение позволяет получать товарные продукты высокой чистоты и минимизировать потери ценных компонентов в отходах. Примерами служат селективная флотация медно-свинцово-цинковых руд и гравитационное обогащение для извлечения золота и других тяжёлых металлов.

Гидрометаллургическое вскрытие – технология извлечения металлов из руд и концентратов с использованием химических реагентов в водных растворах. Включает операции выщелачивания, сорбции, экстракции и электроосаждения. Гидрометаллургические методы позволяют извлекать ценные компоненты из бедных и упорных руд, которые не поддаются эффективному обогащению традиционными физическими методами. Широко применяются при переработке урановых, золотосодержащих, медно-порфировых и полиметаллических руд.

1.2. Уровень комплексности использования сырья

Уровень комплексности использования минерального сырья характеризует способ выделения концентратов, элементов-спутников и отходов производства из перерабатываемого сырья. В мировой и отечественной практике этот показатель оценивается с помощью коэффициента комплексности – отношения числа извлекаемых ценных компонентов к общему числу компонентов, присутствующих в руде в промышленных концентрациях.

Коэффициент комплексности ($K_{\text{комп}}$):

$$K_{\text{комп}} = \frac{n_{\text{изв}}}{n_{\text{общ}}}$$

где $n_{\text{изв}}$ – число компонентов, извлекаемых в товарные продукты; $n_{\text{общ}}$ – общее число ценных компонентов в руде.

Современный уровень развития обогатительных и гидрометаллургических технологий позволяет достигать высоких степеней комплексности, что даёт дополнительный экономический эффект и уменьшает объёмы отходов.

2. Примеры месторождений с комплексными рудами

Большинство рудных месторождений мира являются многокомпонентными. Рассмотрим основные промышленные типы комплексных руд и их попутные компоненты.

2.1. Медно-порфировые месторождения

Медно-порфировые месторождения являются крупнейшим источником меди в мире и характеризуются высоким содержанием попутных компонентов: золота, молибдена, рения, серебра и других элементов.

Основные компоненты:

- Основной: медь (Cu)
- Попутные: золото (Au), молибден (Mo), рений (Re), серебро (Ag), селен (Se), теллур (Te)

Особенности:

- Молибденит из медно-порфировых месторождений часто обогащён рением (Re), содержание которого может достигать 1,4-2,7 г/т.
- Медно-порфировые Cu-Au-Mo месторождения демонстрируют положительную корреляцию между содержанием Au и Re.
- Рений (Re) является одним из наиболее ценных попутных компонентов – его мировые запасы на 80-90% связаны именно с молибденитом медно-порфировых руд.

Примеры месторождений:

- Кальмакыр (Узбекистан) – комплексные Cu-Mo-Au руды с повышенным содержанием Re.
- Мурунтау (Узбекистан) – крупнейшее золоторудное месторождение, где медь и молибден являются попутными компонентами.
- Медно-порфировые месторождения Казахстана (Актогай, Бозшаколь, Конырат) – содержат попутные Au, Mo, Ag, Re.

Несмотря на низкие средние концентрации этих элементов (сотни ppb – единицы ppm), масштабы добычи делают их извлечение экономически выгодным.

2.2. Полиметаллические месторождения

Полиметаллические руды – это комплексные руды, содержащие свинец, цинк, медь, а также широкий спектр попутных компонентов.

Основные компоненты:

- Основные: свинец (Pb), цинк (Zn)
- Попутные: медь (Cu), серебро (Ag), золото (Au), кадмий (Cd), индий (In), германий (Ge), висмут (Bi), сурьма (Sb), таллий (Ta), селен (Se), теллур (Te)

Особенности:

- В полиметаллических рудах может извлекаться до 20 элементов и получаться до 40 видов продукции.
- Свинцово-цинковые руды часто содержат попутные компоненты: Cu, Au, Ag, Cd, W, Sb, Hg, Se и др..
- Содержание основных компонентов варьируется от 2-4% (бедные руды) до свыше 7% (богатые руды).
- При металлургическом переделе, кроме основных, извлекаются остальные (попутные) компоненты.

Примеры месторождений:

- Риддер-Сокольное месторождение (Казахстан) – комплексные полиметаллические руды (Pb, Zn, Cu, Ag, Au, Cd).
- Жезказганское месторождение (Казахстан) – медно-полиметаллические руды с попутными Pb, Zn, Ag, Re.
- Текелійское месторождение (Казахстан) – полиметаллические руды с высоким содержанием Ag и Au.

2.3. Алюминиевые месторождения

Алюминиевые руды являются комплексным сырьём, из которого, помимо основного компонента – алюминия, извлекаются ценные редкие и рассеянные элементы.

Основные компоненты:

- Основной: алюминий (Al)
- Попутные: галлий (Ga), ванадий (V), скандий (Sc), рубидий (Rb), железо (Fe), титан (Ti)

Особенности:

• Многотоннажность производства алюминия делает актуальной проблему попутного извлечения рассеянных элементов.

• Галлий (Ga) и скандий (Sc) являются критическими металлами, широко применяемыми в электронике, оборонной и аэрокосмической промышленности.

• В зависимости от типа бокситов содержание скандия может составлять 70-120 ppm, а редкоземельных элементов – от 400 до 2000 ppm.

Примеры:

• Бокситовые месторождения (Австралия, Гвинея, Бразилия, Казахстан) – основное сырьё для производства алюминия с попутным извлечением Ga, V, Sc.

• Нефелиновые руды (Хибинское месторождение, Россия) – комплексное сырьё, из которого, помимо алюминия, извлекаются редкие и редкоземельные металлы.

2.4. Урановые месторождения

Урановые руды часто содержат широкий спектр попутных ценных компонентов, включая редкоземельные элементы (РЗЭ), металлы платиновой группы, золото, селен, германий, скандий.

Основные компоненты:

- Основной: уран (U)
- Попутные: редкоземельные элементы (РЗЭ), золото (Au), металлы платиновой группы (Pt, Pd), селен (Se), германий (Ge), скандий (Sc)

Особенности:

• Технология подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) урана позволяет попутно извлекать РЗЭ из технологических растворов.

• Разработаны технологические схемы сорбционного извлечения РЗЭ из растворов ПВ с получением 30% концентрата окислов РЗЭ.

• В урановых месторождениях Казахстана (Хиагдинское рудное поле, Семизбай) зафиксировано присутствие металлов платиновой группы, золота и редкоземельных металлов.

Примеры месторождений:

• Хиагдинское рудное поле (Россия) – урановые руды с попутными РЗЭ.

• Месторождения Южного Казахстана и Узбекистана – урановые руды с повышенным содержанием РЗЭ.

• Рудник «Семизбай» (Казахстан) – в технологических растворах обнаружены благородные и редкоземельные металлы.

3. Технологические схемы глубокой переработки

Для обеспечения комплексного использования минерального сырья применяются различные технологические схемы, сочетающие физические, химические и физико-химические методы обогащения и переработки.

3.1. Селективная флотация

Селективная (избирательная) флотация – метод разделения минералов, основанный на различии их поверхностных свойств (гидрофильности/гидрофобности). Позволяет последовательно выделять из руды различные ценные компоненты в виде самостоятельных концентратов.

Сущность процесса:

1. Измельчение руды до размера, обеспечивающего раскрытие зёрен минералов.
2. Обработка пульпы флотационными реагентами (собиратели, пенообразователи, регуляторы, депрессоры, активаторы).
3. Последовательное выделение концентратов различных минералов путём изменения реагентного режима и условий флотации.

Преимущества селективной флотации:

- Позволяет получать высококачественные концентраты отдельных металлов.
- Минимизирует потери ценных компонентов в хвостах.
- Обеспечивает возможность комплексной переработки полиметаллических руд.

Примеры использования:

- Селективная флотация медно-свинцово-цинковых руд с последовательным выделением медного, свинцового и цинкового концентратов.
- Флотация золотосодержащих сульфидных руд для извлечения золота, связанного с сульфидами.

3.2. Спекание

Спекание (агломерация) – термический процесс, при котором минеральное сырьё смешивается с флюсами (известь, сода, соль) и нагревается до температуры частичного плавления. Образующийся спек обладает повышенной реакционной способностью, что облегчает последующее выщелачивание.

Применение:

- Переработка бокситов (спекание с содой для последующего выщелачивания глинозёма).
- Вскрытие золы и золошлаковых отходов спеканием с бифторидом или сульфатом аммония.
- Подготовка силикатных материалов, содержащих тяжелые цветные металлы.

Преимущества:

- Обеспечивает высокую степень вскрытия трудновскрываемых минералов.
- Позволяет перерабатывать комплексное сырьё с получением нескольких видов продукции.

3.3. Выщелачивание

Выщелачивание – процесс селективного растворения ценных компонентов из твёрдого сырья с использованием химических реагентов. Различают:

- Кислотное выщелачивание – использование серной, соляной, азотной кислот. Применяется для извлечения меди, цинка, урана, редкоземельных элементов.

- Щелочное выщелачивание – использование растворов едкого натра, соды, аммиака. Применяется для переработки бокситов, нефелинов, вольфрамовых руд.

- Автоклавное выщелачивание – проводится при повышенных температуре и давлении для ускорения реакций и повышения степени извлечения.

- Бактериальное (био)выщелачивание – использование микроорганизмов для окисления сульфидных минералов и высвобождения ценных металлов.

Преимущества гидрометаллургического выщелачивания:

- Позволяет извлекать металлы из бедных и упорных руд.
- Минимизирует потери ценных компонентов.
- Позволяет комплексно извлекать несколько металлов из одного раствора.

3.4. Сорбция

Сорбция – процесс избирательного извлечения ионов металлов из растворов с использованием твёрдых сорбентов (ионообменные смолы, активированные угли, синтетические сорбенты).

Основные методы сорбции:

- Ионный обмен – обмен ионов металлов в растворе на ионы сорбента. Широко применяется для извлечения урана, РЗЭ, золота из цианистых растворов.

- Адсорбция – поглощение молекул или ионов поверхностью твёрдого тела. Используется для извлечения золота активированным углём (CIP – Carbon-in-Pulp, CIL – Carbon-in-Leach).

- Экстракция – извлечение металлов из водных растворов органическими растворителями с последующей реэкстракцией.

Преимущества сорбционных методов:

- Высокая селективность (избирательность) извлечения.
- Возможность извлечения металлов из разбавленных растворов.
- Компактность оборудования.
- Возможность попутного извлечения нескольких металлов.

4. Экономическая эффективность комплексного использования

Экономическая эффективность комплексного использования минерального сырья определяется возможностью получения дополнительной товарной продукции из попутных компонентов при относительно небольших дополнительных затратах.

4.1. Расчет стоимости попутных компонентов

Экономическая оценка попутных компонентов включает:

1. Определение извлекаемых запасов попутных компонентов в балансовых запасах месторождения.

2. Расчёт стоимости по формуле:

$$C_{\text{поп}} = Q_{\text{изв}} \times C_{\text{рын}} \times K_{\text{изв}}$$

где:

- $C_{\text{поп}}$ – стоимость попутного компонента;
- $Q_{\text{изв}}$ – количество извлекаемого компонента (т, кг, г);
- $C_{\text{рын}}$ – рыночная цена компонента;
- $K_{\text{изв}}$ – коэффициент сквозного извлечения (от руды до товарного продукта).

3. Учёт затрат на дополнительное извлечение попутных компонентов. Экономическая эффективность достигается при условии:

$$C_{\text{поп}} > Z_{\text{доп}}$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительные затраты на извлечение попутных компонентов.

4. Интегральная оценка – экономическая эффективность комплексного использования многокомпонентного сырья в целом определяется из условия окупаемости общей суммы прямых и косвенных затрат на добычу и комплексную переработку сырья.

4.2. Уменьшение отходов

Комплексное использование минерального сырья позволяет существенно сократить объёмы отходов за счёт:

1. Извлечения дополнительных ценных компонентов из хвостов и шламов.

2. Использования отходов обогащения в качестве вторичного сырья (закладочные материалы, строительные материалы).

3. Снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.

Экономический эффект от уменьшения отходов складывается из:

- Экономии на размещении отходов.
- Снижения экологических платежей.
- Получения дополнительной продукции из отходов.

4.3. Практические примеры

Медь-молибден-ренийное производство: Извлечение рения (Re) из медно-порфировых руд (месторождения Кальмакыр, Бозшаколь) при цене Re ~\$1000-2000/кг обеспечивает высокую рентабельность даже при невысоких ценах на медь.

Извлечение галлия и скандия из бокситов: При переработке бокситов попутное извлечение Ga и Sc позволяет получать до 5-10% дополнительной прибыли от переработки руды.

Переработка золошлаковых отходов: Разработаны технологические схемы флотации, спекания и выщелачивания для извлечения редких и редкоземельных металлов из углистых и золошлаковых отходов.

4.4. Эколого-экономический эффект

Обобщающим критерием экономической эффективности комплексного использования месторождений полезных ископаемых является интегральный социально-эколого-экономический эффект. Он включает:

- Ресурсосберегающий фактор – сокращение потерь ценных компонентов.
- Ресурсообеспечивающий фактор – вовлечение в переработку техногенных отходов.
- Экологический фактор – снижение негативного воздействия на окружающую среду.
- Социальный фактор – создание новых рабочих мест, развитие регионов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимается под комплексностью использования минерального сырья и каковы основные подходы к её реализации (совместная добыча, раздельное обогащение, гидрометаллургическое вскрытие)?
2. Какие попутные компоненты характерны для медно-порфировых, полиметаллических, алюминиевых и урановых месторождений? Приведите примеры конкретных месторождений.
3. Опишите технологические схемы глубокой переработки комплексных руд: селективная флотация, спекание, выщелачивание, сорбция. В чём преимущества каждой из этих технологий?
4. Как рассчитывается экономическая эффективность извлечения попутных компонентов? Какие факторы учитываются при оценке рентабельности комплексного использования?
5. Каковы экологические преимущества комплексного использования минерального сырья? Как оно способствует снижению объёмов отходов и уменьшению техногенной нагрузки?

Список использованной литературы

1. Комплексное использование минеральных ресурсов: в 2 кн. Кн. 1. Учебник.
2. Принципы комплексного использования природных ресурсов // CyberLeninka
3. К вопросу целесообразности комплексного освоения минеральных ресурсов Уральского региона // CyberLeninka
4. Попутные полезные компоненты – Большая Российская Энциклопедия
5. Оценка экономической эффективности комплексного использования минерального сырья в целях рационального природопользования // CyberLeninka
6. Алюминиевые руды // Горная энциклопедия
7. Перспективы попутного с ураном извлечения РЗЭ
8. USGS Publications – Porphyry Cu and Mo deposits