Дисциплина «Актуальные проблемы в горном деле»
для магистрантов ОП 7М07203 "Горное дело"

Лекция 8. Техногенные месторождения и глубокая переработка минерального сырья

Цель лекции: Сформировать у магистрантов комплексное представление о техногенных месторождениях как о значимом источнике вторичного минерального сырья. Изучить современные классификации техногенных отходов, проанализировать мировой и казахстанский опыт их вовлечения в переработку. Рассмотреть передовые технологии извлечения остаточных металлов из хвостов и шламов (биовыщелачивание, гидрометаллургические методы, флотацию). Оценить экономическую эффективность и эколого-экономические аспекты переработки техногенных месторождений, а также перспективные направления развития отрасли вторичного недропользования.

План лекции:

1) Классификация техногенных отходов как вторичных ресурсов. Мировая и казахстанская практика.

2) Технологии извлечения остаточных металлов из хвостов и шламов (биовыщелачивание, гидрометаллургия, флотация).

3) Экономическая эффективность переработки техногенных месторождений.

1. Классификация техногенных отходов как вторичных ресурсов. Мировая и казахстанская практика

Техногенные минеральные образования (ТМО) представляют собой результат деятельности горнодобывающей, перерабатывающей, металлургической и энергетической отраслей. К ним относят отвалы горных пород, хвосты обогатительных фабрик, шлаки металлургического производства, золу ТЭС и другие аналогичные виды отходов передела.

Техногенные месторождения – это большие скопления минеральных веществ, образовавшиеся в результате добычи полезных ископаемых (включая углеродное топливо), извлечения чёрных, цветных, благородных и редких металлов, производства строительных материалов и химической продукции. Масштабы таких скоплений часто сопоставимы с природными месторождениями, а в отдельных случаях, по образному выражению специалистов, речь идёт о настоящих «техногенных кладовых».

В современной научной литературе и горной практике применяется несколько подходов к классификации техногенных отходов. Основные классификационные критерии включают:

- По происхождению: отходы горного производства, горно-обогатительные, металлургические, химические и энергетические отходы.

- По условиям накопления ценных компонентов: выделяются техногенные месторождения, сформировавшиеся в процессе хранения отходов, где могут образовываться зоны вторичного гипергенеза, окисления и сегрегации.

- По групповым критериям, предложенным в монографии «Техногенные минерально-сырьевые ресурсы»: востребованность и дефицитность содержащихся компонентов, геологическая изученность объекта, технологическая подготовленность к переработке, значимость в сырьевом обеспечении предприятия.

В Казахстане кодексом «О недрах и недропользовании» установлено, что к ТМО горно-перерабатывающих производств относятся отходы переработки горно-обогатительных производств (хвосты и шламы обогащения) и химико-металлургических производств (шлаки, кеки, клинкеры и другие аналогичные виды отходов металлургического передела).

Мировая практика вовлечения техногенных отходов

Мировой опыт показывает устойчивый тренд на вовлечение техногенных отходов в промышленную эксплуатацию. Исследования последних лет обобщают мировой опыт и определяют основные направления промышленного использования техногенного сырья.

Эффективным примером является утилизация золошлаковых отходов в строительной индустрии развитых стран. Уровень их использования варьируется: в США около 25%, Великобритании 53%, Франции 65%, а Германии 79%. Значительный интерес представляет также технология закладки выработанных пространств шахт техногенными отходами, которая применяется примерно на 35% подземных рудников по всему миру.

Для успешной переработки техногенных месторождений за рубежом активно внедряются инновационные решения: от сортировки и предобогащения физическими методами до комбинированных схем с использованием биотехнологий. В целом уровень переработки ТМО в развитых странах достигает 70-80%.

Казахстанская практика

В отвалах, хвостохранилищах и накопителях горнопромышленного производства Казахстана накоплено более 55 млрд тонн техногенных минеральных образований. Ежегодный прирост отходов составляет 300-700 млн тонн. Наибольшие объёмы ТМО зафиксированы в Павлодарской, Карагандинской, Костанайской и Восточно-Казахстанской областях.

Наиболее ресурсоёмкими и перспективными для переработки являются:

- Хвосты флотации меди Жезказганской обогатительной фабрики: в хвостохранилищах скопилось более 1 млрд тонн при среднем содержании меди 0,18% (0,1-0,3%). Запасы меди в них оцениваются не менее чем в 3,0 млн тонн.

-Хвосты и отвалы полиметаллических месторождений Восточного Казахстана: нередко содержат остаточные концентрации свинца, цинка, меди, а также драгоценных и редкоземельных металлов.

-Шлаки металлургических предприятий и другие отходы передела.

Несмотря на значительный ресурсный потенциал, уровень переработки ТМО в Казахстане составляет лишь около 11% при общем количестве зарегистрированных объектов ТМО порядка 1747 единиц.

В стране ведётся системная работа по вовлечению техногенных отходов в переработку. Основные направления:

- Паспортизация ТМО: начата инвентаризация всех техногенных отходов для оценки их состояния и определения приоритетных направлений переработки. Задача – не только оценить объёмы, но и определить качественный состав и пригодность к извлечению ценных компонентов.

- Реализация проектов: за последние два года реализовано три проекта по переработке отходов на сумму 47,8 млрд тенге, в ближайшие два года планируется ещё четыре проекта с общими инвестициями 37 млрд тенге. Всего реализуется 25 проектов по вторичной переработке промышленных отходов на сумму 330 млрд тенге.

- Стимулирование инвестиций: ведомство внедрило западноавстралийскую модель недропользования с принципом «первый пришёл – первый получил» и освободило до пяти лет от НДПИ проекты с внутренней нормой рентабельности ниже 15%.

- Законодательное регулирование: прорабатывается вопрос введения специальной упрощённой лицензии для переработки ТМО, а также внесения изменений в законодательство для вывоза и переработки ТМО за пределами населённых пунктов.

2. Технологии извлечения остаточных металлов из хвостов и шламов

Переработка техногенных отходов требует применения специфических технологических решений, учитывающих низкие содержания целевых компонентов, тонкую вкрапленность, сложный минералогический состав и наличие токсичных соединений (сульфидов, мышьяка, тяжелых металлов). Основными технологиями являются биовыщелачивание, гидрометаллургия и флотация, которые всё чаще применяются в комбинированных схемах.

Биовыщелачивание – это метод извлечения металлов из руд и отходов с использованием микроорганизмов (обычно ацидофильных тионовых бактерий), которые окисляют сульфидные минералы, переводя металлы в растворимую форму. Для извлечения металлов из техногенных отходов целесообразно использовать железоокисляющие бактерии, такие как Acidithiobacillus ferrooxidans. Выявлена корреляционная зависимость степени вскрытия металла от фракционного состава отходов.

Пример из казахстанской практики: исследования, проведённые Satbayev University на хвостах флотации меди Жезказганской обогатительной фабрики,

показали, что технологическая схема, включающая доизмельчение и обработку, магнитную сепарацию и биовыщелачивание при температуре 20–35°С и pH 1-2,5, позволяет сохранять извлечение меди на уровне выше 80%. При этом за счёт организации процесса в контролируемых оптимальных условиях время выщелачивания сокращается до 12-24 часов**.

Редкоземельные металлы: технология прямого биохимического выщелачивания, разработанная казахстанскими учёными, адаптирована для извлечения лантана, церия и неодима из полиметаллических, фосфорсодержащих и свинцово-цинковых отходов Южного Казахстана.

Золото: биохимическое выщелачивание упорных сульфидных хвостов сорбции ТОО «Altyntau Kokshetau», содержащих 3,24 г/т золота при доле сульфидных минералов 32%, позволяет за 5-7 суток окислить сульфиды, а последующим цианированием извлечь до 78% золота.

Гидрометаллургия остаётся базовым методом извлечения цветных, благородных и редких металлов из техногенного сырья. Её преимущества – возможность переработки бедного сырья и комплексное извлечение нескольких компонентов.

Сернокислотное выщелачивание: эффективно для извлечения меди из лежалых хвостов, которые прошли первичную обработку. Применение интенсивного сернокислотного выщелачивания с предварительной механоактивацией хвостов позволяет существенно повысить извлечение целевых компонентов.

Комбинированные схемы: для извлечения ценных компонентов из норильских лежалых хвостов предложены технологии, сочетающие магнитную сепарацию и гидрометаллургическую переработку штейна для получения меди, никеля и концентратов платиновых металлов.

Новые подходы: для медно-никелевых руд перспективными признаны способы совместной переработки хвостов обогащения руд цветных металлов и шламов нейтрализации травильных растворов, шахтных вод и отходов гальванического производства.

Флотация для доизвлечения остаточных металлов из лежалых «хвостов хвостов» применяется в комбинации с механоактивацией и гравитационными методами.

Ключевые особенности флотации хвостов:

- Низкие содержания: извлечение никеля из лежалых хвостов медно-никелевых руд флотационным методом достигает 44% при содержании никеля 0,39%, извлечение меди 59% при содержании 0,20%.

- Специализированное оборудование: использование пневмофлотационных машин Pneuflot позволяет извлекать мелкие классы золота из хвостов флотации и получать кремниевый концентрат с массовой долей SiO_2 не менее 65% при выходе готового продукта более 20%. В машине Pneuflot из вольфрамсодержащих лежалых хвостов достигается извлечение меди в

сульфидный концентрат 9,5%, шеелита – в обогащённый черновой продукт – 69% с массовой долей WO_3 0,6%.

- Гравитационно-флотационные схемы: позволяют из лежалых хвостов получать золото-пиритный продукт с содержанием золота 5,37 г/т и серебра 27,53 г/т при извлечении 54,5 и 53,9% соответственно.

3. Экономическая эффективность переработки техногенных месторождений

Переработка техногенных месторождений обладает рядом экономических преимуществ по сравнению с разработкой первичных руд:

- Исключение затрат на добычу и первичное дробление: из технологической цепочки исключаются дорогостоящие операции, что при прочих равных условиях позволяет снизить себестоимость извлечения металлов.

- Дополнительный источник сырья: при сохранении действующей инфраструктуры предприятия переработка хвостов позволяет увеличить выпуск металлов без вовлечения новых рудников. Пример: компания «Коунрад» перерабатывает ТМО своего рудника, производя ежегодно до 12 тыс. тонн меди – это примерно 2,8% от всей добычи меди в стране.

- Комплексное извлечение: современные технологии позволяют извлекать попутные компоненты (редкие и редкоземельные металлы, золото, серебро), повышая общую экономическую отдачу.

Переработка техногенных отходов – это не только получение прибыли, но и предотвращение экологического ущерба. Методическое обеспечение оценки эколого-экономической эффективности освоения техногенных месторождений требует учёта предотвращённого ущерба от загрязнения окружающей среды, снижения затрат на рекультивацию и сохранения невозобновляемых природных ресурсов.

Современные подходы к итерационному моделированию технологий отработки позволяют определять эколого-экономическую целесообразность вовлечения в производство «омертвлённых» ресурсов и формировать оптимальный набор проектов для переработки отходов и реабилитации нарушенных территорий на региональном уровне.

Основные сдерживающие факторы:

- Низкие содержания полезных компонентов: полезные компоненты в ТМО присутствуют в крайне низких содержаниях, хвосты и отвалы уже прошли первичную переработку.

- Упорный характер сырья и несовершенство технологий: например, геолого-экономическая оценка техногенных полиметаллических месторождений Восточного Казахстана показала нерентабельность переработки по принятой технологии выщелачивания.

- Правовая неопределённость: техногенные образования одновременно признаются и отходами, и частью недр, что создаёт трудности при

лицензировании и налогообложении. Требуется актуализация нормативно-правовой базы и введение упрощённых лицензий на переработку ТМО.

Для стимулирования вовлечения техногенных отходов в хозяйственный оборот предлагаются меры, доказавшие свою эффективность в мировой практике:

- Введение дифференцированных ставок по налогу на добычу полезных ископаемых при переработке многокомпонентных руд;
- Создание системы кадастров и автоматизированных баз данных техногенных ресурсов;
- Развитие институциональной среды управления техногенными ресурсами, включая технологическое нормирование на основе наилучших доступных технологий (НДТ).

Как отмечают эксперты, переработка техногенных отходов – это не издержки и не разовые проекты, а основа новой формы хозяйствования и целой отрасли, формирующей долгосрочные экологические, социальные и экономические эффекты для увеличения благополучия граждан и сохранения природы.

Итак, техногенные месторождения представляют собой одновременно и экологическую опасность, требующую немедленного решения, и стратегический ресурсный резерв, способный обеспечить экономику дополнительными объёмами цветных, редких, благородных и редкоземельных металлов. Мировая практика доказывает, что комплексная переработка техногенных отходов – ключевое направление устойчивого развития горнодобывающей отрасли.

Казахстан, обладая колоссальными объёмами накопленных ТМО (более 55 млрд тонн), находится на начальном этапе системной работы по их паспортизации и вовлечению в переработку. Низкий текущий уровень переработки (11%) свидетельствует о значительном потенциале роста, а реализуемые проекты и меры государственного стимулирования создают основу для формирования новой отрасли – вторичного недропользования.

Биовыщелачивание, гидрометаллургия и флотация в комбинированных схемах с предварительной механоактивацией и сортировкой позволяют извлекать ценные компоненты из бедного и упорного техногенного сырья. Однако экономическая эффективность переработки техногенных месторождений требует не только совершенствования технологий, но и адекватного правового обеспечения, налогового стимулирования и развития институциональной среды.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определения понятиям «техногенные минеральные образования» (ТМО) и «техногенное месторождение». Перечислите основные виды техногенных отходов и приведите примеры классификационных критериев.

2. Каков масштаб накопленных техногенных отходов в Казахстане? Назовите регионы-лидеры по объёмам ТМО и приведите примеры действующих проектов по их переработке (объёмы, инвестиции, результаты).

3. Опишите принципы и механизмы биовыщелачивания. На примере хвостов Жезказганской обогатительной фабрики поясните, какие параметры контролируются в процессе и какого извлечения меди удаётся достичь.

4. В чём заключаются особенности применения флотационных методов для доизвлечения металлов из лежалых хвостов? Какое специализированное оборудование используется и каких результатов удаётся добиться на практике?

5. Назовите основные экономические выгоды переработки техногенных месторождений. Какие барьеры сдерживают их вовлечение в промышленную эксплуатацию и какие меры стимулирования предлагаются?

Список использованной литературы

1. Ларичкин Ф.Д., Кныш В.А. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий: монография. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2019. - 252 с. (Главы о классификации отходов и методиках оценки эффективности)

2. Макаров В.А., Самородский П.Н. Актуальные вопросы оценки и освоения техногенных месторождений золота // Геология и геофизика. 2022

3. Хмелев Н.Б., Мамяченков С.В. Перспективы переработки техногенных отходов и техногенных месторождений в РФ // ООО «ИМГ-Инжиниринг». 2021

4. Крупская Л.Т., Зверева В.П., Склярова Г.Ф., Орлов А.М. Техногенные поверхностные образования как источник загрязнения экосферы и обоснование возможности их освоения в Дальневосточном федеральном округе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023

5. Рыльникова М.В., Джаппуев Р.К., Цупкина М.В. Проблемы и перспективы вовлечения в промышленную эксплуатацию отходов переработки руд Тырныаузского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 4-1. С. 86-96

6. Второе дыхание недр: ТМО – шанс для экономики и экологии // Liter.kz, 26.07.2025

7. Казахстан начал паспортизацию 55 млрд тонн отходов с запасами полезных ископаемых // Kursiv.kz, 20.06.2025

8. Лишь 11% техногенно-минеральных образований перерабатывают в Казахстане // Kapital.kz,26.03.2025

9. Sydykanov M., Bektay Y., Turysbekova G., Baibatsha A., Shiderin B., Sydykanov S. Bioleaching of Stale Copper Tailings from the Zhezkazgan Concentrator // SSRN. 2024

10. Койжанова А.К., Арыстанова Г.А., Седельникова Г.В., Есимова Д.М. Исследование биогидрометаллургической технологии извлечения золота из хвостов сорбции золотоизвлекательной фабрики // Цветные металлы. 2016. № 9

11. Сатаев М.И., Исаева А.У., Успабаева А.А. и др. Разработка способа биологического выщелачивания лантана, церия и неодима из полиметаллических, фосфоросодержащих и свинцово-цинковых отходов юга Казахстана // Южно-Казахстанский государственный университет им. М.О.Ауэзова. 2017