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

Лекция 5. Экологические проблемы горного производства и пути их минимизации

Цель лекции: Систематизировать знания о видах и масштабах воздействия горного производства на биосферу, выявить ключевые накопленные экологические ущербы. Проанализировать современные подходы к управлению отходами (хвосты, вскрышные породы, шламы) и технологиям рекультивации нарушенных земель. Изучить «зелёные» технологии, направленные на создание ресурсосберегающих и экологически безопасных горнопромышленных комплексов (закладочные материалы, строительная продукция, рекуперация воды). Сформировать у магистрантов компетенции для разработки природоохранных решений в горном деле.

План лекции:

1) Влияние горных работ на атмосферу, гидросферу, литосферу. Накопленные экологические ущербы.

2) Управление отходами: хвосты, вскрышные породы, шламы. Технологии рекультивации.

3) Зелёные технологии: использование отходов в качестве закладочных материалов, производство строительных продуктов, рекуперация воды.

Введение

Горное производство является основой современной цивилизации, обеспечивая сырьём энергетику, металлургию, строительство. Однако оно же – один из самых агрессивных антропогенных факторов: на 1 тонну полезного ископаемого в среднем приходится от 2 до 10 тонн отходов (вскрышных пород, хвостов обогащения), а в угольной отрасли до 20-30 тонн пустой породы на тонну угля. Ежегодно в мире горными предприятиями перемещается более 100 млрд тонн горной массы, нарушаются миллионы гектаров земель, загрязняются воздушный и водный бассейны. Накопленный экологический ущерб от прошлой деятельности (заброшенные шахты, терриконы, кислые дренажи) требует огромных затрат на рекультивацию. В лекции рассматриваются основные каналы воздействия и системные пути минимизации.

1. Влияние горных работ на атмосферу, гидросферу и литосферу. Накопленные экологические ущербы

1.1. Атмосфера

Основные источники выбросов на горных предприятиях:

- Открытые горные работы (карьеры): пылеобразование при бурении, взрывных работах (до 500 г пыли на 1 тонну взорванной породы), экскавации и транспортировке. Взрывы также выделяют CO, NO_x, CH_4 (для угольных карьеров). Карьерный автотранспорт даёт до 70% выбросов в карьере (сажа, CO, углеводороды).
- Подземные шахты: выделение метана (особенно из угольных пластов) – мощного парникового газа (в 25 раз сильнее CO_2). За год шахты выбрасывают около 40 млн тонн метана. Также вентиляционные выбросы содержат угольную пыль, породную пыль.
- Обогатительные фабрики и отвалы: процессы дробления, классификации, сушки выделяют тонкодисперсную пыль с частицами сульфидов, оксидов металлов. Хвостохранилища и отвалы вскрыши при ветровой эрозии (сухие хвосты, песчаные фракции) распространяют пыль на десятки километров.

Накопленные эффекты: в регионах крупных горнопромышленных узлов (Кривой Рог, Норильск, Донбасс) сформировались устойчивые зоны повышенной запылённости с превышением ПДК по тяжёлым металлам в 5-50 раз. Кислотные дожди в окрестностях предприятий цветной металлургии приводят к деградации лесов и почв. Выбросы метана из шахт дают существенный вклад в парниковый эффект (до 8% антропогенного метана).

1.2. Гидросфера

Горное производство воздействует на водные ресурсы по трём направлениям:

1. Исчерпание запасов – водоотлив из карьеров и шахт (десятки тысяч кубометров в сутки) понижает уровень подземных вод на площади в сотни км², осушает родники, реки. В горных районах это ведёт к гибели уникальных гидробиоценозов.
2. Химическое загрязнение – наиболее опасными являются:
   - Кислые шахтные дренажные воды (AMD – Acid Mine Drainage). При окислении сульфидных минералов (пирит FeS_2, марказит) в присутствии воды и кислорода образуется серная кислота (pH 2-4), которая выщелачивает тяжёлые металлы (Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, As). AMD может генерироваться столетиями после закрытия шахты. Мировой накопленный объём кислых вод оценивается в миллиарды кубометров.
   - Фильтрационные воды хвостохранилищ и шламонакопителей содержат реагенты флотации (ксантогенаты, аэрофлоты, цианиды, масла) и растворённые металлы.
   - Нефтепродукты от горной техники и ГСМ.
3. Катастрофические прорывы хвостохранилищ – рукотворные цунами из смеси воды и тонкодисперсных отходов. Примеры: прорыв дамбы на золоторудном комбинате в Байа-Маре (Румыния, 2000 г.) – выделилось 100 000 м³ цианидсодержащей воды, погибла вся биота на 2000 км реки Тиса; катастрофа в Брумадинью (Бразилия, 2019 г.) – 12 млн м³ отходов железной руды, погибло более 250 человек.

Накопленный ущерб: тысячи километров рек в старых горнопромышленных районах (Урал, Донбасс, Рурский бассейн) не имеют рыбных запасов из-за кислотности и тяжёлых металлов. Подземные воды на глубинах до 300 м часто непригодны для питья без дорогой обработки.

1.3. Литосфера

Нарушение земной коры и почвенного покрова включает:

- Изъятие земель: под карьеры, отвалы, хвостохранилища, терриконы. В России общая площадь нарушенных горными работами земель превышает 1,5 млн га (из них менее 30% рекультивировано). В мире – более 10 млн га.
- Создание техногенных форм рельефа: терриконы (высотой до 150 м), плоские отвалы вскрыши, хвостовые пляжи. Они изменяют поверхностный сток, способствуют селевым процессам.
- Геомеханические нарушения: оседание земной поверхности над выработанным пространством (в угольных шахтах достигает 5-10 м), активизация оползней, наведённая сейсмичность (горные удары).
- Геохимическое загрязнение почв: пылевые ореолы тяжёлых металлов вокруг горных предприятий имеют радиус до 20-30 км. Особенно опасны свинец, кадмий, мышьяк, ртуть. В почве они мигрируют в растения, затем в организм человека.

Накопленный ущерб литосфере: огромные территории отчуждённых земель, захламлённых отвалами, самовозгорание терриконов (в Донбассе ежегодно горят десятки отвалов, выделяя SO_2 и CO). Деградация плодородного слоя: восстановление 1 см гумуса занимает 100-200 лет естественным путём.

2. Управление отходами: хвосты, вскрышные породы, шламы. Технологии рекультивации

2.1. Классификация и масштабы отходов горного производства

- Вскрышные породы – пустые породы, удаляемые из карьеров для доступа к полезному ископаемому. Коэффициент вскрыши: для железных руд 2-5 т/т, для золота до 100 т/т. Объём мировых отвалов вскрыши превышает 20 млрд т/год.
- Хвосты обогащения – тонкодисперсный материал (средний размер частиц 0,01-0,5 мм), остающийся после извлечения ценного компонента. Содержат остаточные сульфиды, реагенты, воду. Ежегодно образуется около 5 млрд т хвостов.
- Шламы – мокрые осадки из систем пылегазоочистки, нейтрализации кислых вод, а также нефтешламы (от отработки ГСМ).

2.2. Методы управления и складирования

Современные требования: переход от бесконтрольного накопления к безопасному размещению с последующей рекультивацией.

- Хвостохранилища строятся по проектам с противофильтрационными экранами (глиняные, геомембранные), системами сбора дренажных вод, дамбами намыва. Перспективны технологии сгущенных хвостов (пастообразный

сброс, влажность 50-65%) – снижается риск прорыва, уменьшается площадь зеркала воды.

• Отвалы вскрыши размещаются с соблюдением ярусности, террасирования, отсыпкой негорючих пород поверх сульфидсодержащих отвалов для предотвращения самовозгорания.

2.3. Рекультивация нарушенных земель

Рекультивация включает два этапа:

Технический этап:

• планировка (выравнивание) отвалов и терриконов;

• нанесение потенциально плодородного слоя (ППС) – если он был сохранён при снятии перед началом разработки;

• создание противоэрозионной системы (канавы, террасы);

• нейтрализация кислых почв (известкование);

• покрытие хвостов слоем нейтрального материала (суглинка, глины) мощностью 0,5-1 м для изоляции от атмосферы и растений.

Биологический этап:

• посев многолетних трав (особое внимание к растениям-гипераккумуляторам для фиторемедиации тяжёлых металлов – горчица, амарант, ива козья);

• посадка кустарников и деревьев (сосна, лох, акация, тополь), устойчивых к техногенным субстратам;

• для кислых и токсичных хвостов применяется метод фитостабилизации – создание плотного травяного покрова, предотвращающего пыление и водную эрозию, но не требующего полного очищения грунта.

Примеры эффективной рекультивации: угольные терриконы Рурской области (Германия) превращены в холмистые лесопарки; хвостохранилища урановых руд в Приморском крае изолированы буферными экранами и мониторятся на радионуклиды.

3. Зелёные технологии: использование отходов в качестве закладочных материалов, производство строительных продуктов, рекуперация воды

«Зелёные» технологии в горном деле направлены на создание циклических систем, минимизирующих выбросы, отходы и потребление ресурсов. Для магистрантов важно освоить три ключевых направления.

3.1. Использование отходов в качестве закладочных материалов при подземной добыче

Закладка выработанного пространства позволяет предотвратить оседание земной поверхности, утилизировать отходы на месте. Применяют:

• Гидравлическую закладку – смесь хвостов обогащения с водой (и иногда цементом) подаётся в шахту. Вода после осаждения возвращается.

• Твердеющую закладку – к хвостам добавляют вяжущие (цемент, золу ТЭЦ, доменный шлак). Получают литой бетон. Это позволяет сократить объём хвостов на поверхности на 30-70%.

• Закладку вскрышными породами – крупные фракции (гравий, скальная вскрыша) используются для заполнения подземных пустот.

Эффект: снижение нагрузки на хвостохранилища, предотвращение техногенных землетрясений, возможность повторной разработки целиков.

3.2. Производство строительных продуктов из горных отходов

Вскрышные породы, хвосты и шламы перерабатываются в товарную продукцию:

• Щебень и песок из скальных вскрышных пород (граниты, известняки) – заменитель природного камня.

• Стеновые блоки и кирпич – из хвостов обогащения железа, золошлаковых отходов ТЭС, углеродистых сланцев. Технология: смешивание с вяжущим (цемент, известь) и прессование.

• Геополимерные материалы – инновация: из алюмосиликатных отходов (хвосты обогащения) активацией щелочами получают композитный материал с прочностью как у бетона, но с низким углеродным следом.

• Минеральная вата из отходов металлургических шлаков.

• Дорожные основания – широко используется отсев дробления вскрышных пород.

Примеры: в Норильске из хвостов обогащения медных руд производят тротуарную плитку; на Урале – шлакоблоки из отвалов.

3.3. Рекуперация воды и замкнутые циклы водоснабжения

Водные ресурсы – критический лимит для горного производства. Направления:

• Замкнутые оборотные циклы обогатительных фабрик: вода после сгущения хвостов (90-95%) возвращается в процесс. Достижимо до 5-10% подпитки свежей водой.

• Нейтрализация кислых дренажных вод с последующим осаждением металлов и использованием очищенной воды для технических нужд (например, для орошения отвалов или технологических процессов).

• Обезвоживание хвостов – фильтр-прессы, центрифуги, установки «Outotec Larox» позволяют извлекать до 98% воды из хвостов и возвращать её в схему. Пастообразные хвосты также содержат меньше влаги.

• Системы сбора ливневых и талых вод с территории промплощадки и отвалов, их отстаивание, очистка и повторное использование.

Экономический эффект: снижение платы за водозабор и сбросы, уменьшение риска прорывов дамб, сокращение площадей хвостохранилищ.

3.4. Другие зелёные технологии (кратко)

• Дегазация угольных пластов с извлечением метана (как топлива) до начала добычи – снижение выбросов в атмосферу.

• Биоремедиация кислых дренажей – пропуск AMD через биореакторы с сульфатредуцирующими бактериями, которые восстанавливают сульфаты до H_2S и осаждают металлы в виде сульфидов.

• Использование возобновляемой энергии для горных предприятий (солнечные панели на отвалах, ветряки).

Заключение

Экологические проблемы горного производства носят системный, долгосрочный и трансграничный характер. Накопленные ущербы прошлого (кислые дренажи, деградация земель, загрязнение рек) требуют десятков миллиардов долларов на рекультивацию. Однако современные подходы – управление отходами через их переработку в строительные материалы, широкое использование закладочных смесей, создание замкнутых водных циклов – позволяют кардинально снизить нагрузку на биосферу. Для магистрантов горного дела критически важно владеть методами эколого-экономической оценки проектов и технологиями «зелёной» трансформации отрасли, так как будущее горного производства – за ресурсосбережением и минимальным воздействием.

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите механизм образования кислых шахтных дренажных вод (AMD). Почему это явление представляет собой долгосрочную угрозу для гидросферы даже после закрытия шахты?
2. В чём заключаются различия между техническим и биологическим этапами рекультивации отвалов вскрышных пород? Приведите примеры видов растений, применяемых для фиторемедиации.
3. Каким образом использование твердеющей закладки из хвостов обогащения в подземных выработках решает одновременно экологические и геомеханические проблемы?
4. Назовите не менее трёх видов строительной продукции, которую можно производить из горных отходов (хвостов, вскрышных пород, шламов). Какую роль играют геополимерные технологии?
5. Опишите принцип работы замкнутого водооборотного цикла обогатительной фабрики. Какие технические решения позволяют достичь высокой степени рекуперации воды (95% и более)?

Список использованной литературы

1. Гальперин А.М., Фёрстер В., Шеф Х.Ю. Техногенные массивы и охрана окружающей среды. – М.: МГГУ, 2015. 432 с. (Гл. 5: Отходы горного производства, рекультивация)
2. Певзнер М.Е., Костовецкий В.П. Экология горного производства. – М.: Недра, 2017. 512 с.
3. Lottermoser B.G. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. 3rd ed. Springer, 2010. 400 p. (Классический международный учебник по отходам)

4. Younger P.L., Banwart S.A., Hedin R.S. Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. Kluwer Academic, 2002. 442 p. (Подробно об AMD и методах нейтрализации)

5. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // Applied Geochemistry, 2014, V. 51, p. 229-245. (Обзор катастроф и устойчивого управления)

6. Жаркой И.С., Юдович Я.Э. Экологическая геохимия горнопромышленных регионов. – Л.: Наука, 2019. 280 с.

7. Соколов И.В., Смирнов А.А. Зелёные технологии в горном деле: учебное пособие для магистрантов. – Екатеринбург: УГГУ, 2021. 156 с.

8. ITPS (Intergovernmental Technical Panel on Soils). Сохранение почв при открытых горных работах. FAO, 2020 (русскоязычная версия).

9. Воронин Д.Ю., Макаров А.Б. Рекультивация территорий горных предприятий. – М.: Горная книга, 2018. 320 с.

10. Научные статьи из журналов «Горный журнал», «Экология и промышленность России», «Mine Water and the Environment» за 2015-2024 гг.