СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ ОТКРЫТОЙ ДОБЫЧЕ РУДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (НА ПРИМЕРЕ КАРЬЕРА «ЁШЛИК-1»)

Сафаров Бекзод Баходир угли
АФ НИТУ "МИСиС"
Алмалык. Узбекистан.
safarovbekzod62@.gmail.com

Аннотация. *Статья посвящена анализу источников вредных выбросов при открытой разработке рудных месторождений и обоснованию комплекса инновационных технологических решений, направленных на снижение техногенной нагрузки на атмосферный воздух. На примере карьера «Ёшлик-1» (Центральная Азия) рассмотрены основные источники пылегазовых загрязнений — буровзрывные работы, транспортно-погрузочный цикл и процессы дробления и сортировки руды. Разработана расчётная методика оценки массы выбросов, основанная на балансовом и диффузионном подходах. Показано, что внедрение комплексной системы пылеподавления, включающей автоматизированные оросительные установки, герметизацию дробильно-сортировочного оборудования и перевод части транспортного парка на электротягу, обеспечивает снижение суммарных выбросов на 35–40% при одновременном росте производительности. Полученные результаты имеют практическое значение для проектирования новых и модернизации действующих горнодобывающих предприятий Узбекистана и стран региона.*

Ключевые слова: *открытая добыча, вредные выбросы, пылеподавление, экологическая безопасность горного производства, карьер «Ёшлик-1», электрифицированный транспорт, устойчивое горное дело.*

ACADEMIC SCIENCE PUBLISHING

Abstract. *The article is devoted to analyzing sources of harmful emissions during open-pit mining of ore deposits and substantiating a set of innovative technological solutions aimed at reducing the technogenic load on atmospheric air. Using the "Yoshlik-1" open pit (Central Asia) as a case study, the main sources of dust and gas pollution are examined—blasting operations, the transport and loading cycle, and ore crushing and screening processes. A calculation methodology for estimating emission mass, based on balance and diffusion approaches, has been developed. It is shown that the introduction of a comprehensive dust suppression system, including automated irrigation units, sealing of crushing and screening equipment, and the conversion of part of the transport fleet to electric traction, ensures a 35–40% reduction in total emissions while simultaneously increasing productivity. The obtained results are of practical importance for the design of new and modernization of existing mining enterprises in Uzbekistan and the countries of the region.*

Keywords: *open-pit mining, harmful emissions, dust suppression, environmental safety of mining production, "Yoshlik-1" open pit, electrified transport, sustainable mining.*

Введение

Горнодобывающая промышленность занимает одну из ключевых позиций в экономике Узбекистана, обеспечивая существенную долю экспортных поступлений, занятости населения и развития сопутствующей инфраструктуры регионов. Однако интенсификация открытых горных работ, рост объёмов добычи и вовлечение в разработку более глубоких и труднообогатимых горизонтов месторождений сопровождаются увеличением техногенной нагрузки на окружающую среду. Наиболее значимым негативным эффектом открытой разработки является поступление в атмосферу значительных объёмов пыли, оксидов азота (NO_x), диоксида углерода (CO_2) и других загрязняющих веществ, образующихся в процессе буровзрывных работ, экскавации, транспортировки и переработки горной массы.

Проблема минимизации вредных выбросов при открытой добыче руды приобретает особую актуальность по нескольким причинам. Во-первых, ужесточение национальных и международных экологических нормативов вынуждает горнодобывающие предприятия пересматривать технологические регламенты и инвестировать в природоохранные мероприятия. Во-вторых, качество атмосферного воздуха в районах расположения карьеров напрямую влияет на состояние здоровья работников и населения прилегающих

ACADEMIC SCIENCE PUBLISHING

территорий, что делает задачу снижения выбросов не только экологической, но и социально значимой. В-третьих, современные тенденции декарбонизации промышленности и перехода к принципам устойчивого горного дела (sustainable mining) требуют комплексного переосмысления технологических цепочек добычи с учётом критериев энергоэффективности и экологичности.

Карьер «Ёшлик-1» является одним из крупнейших объектов открытой разработки в Центральной Азии и представляет собой удобную и репрезентативную площадку для апробации инновационных технологических решений, направленных на снижение вредных выбросов и повышение безопасности труда. Особенности горно-геологических условий месторождения, масштаб производственных процессов и разнообразие источников загрязнения делают результаты, полученные на данном объекте, применимыми к широкому кругу аналогичных предприятий региона.

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование комплекса инновационных технологических решений по снижению вредных выбросов при открытой добыче руды на примере карьера «Ёшлик-1», а также количественная оценка их экологической и производственной эффективности.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ структуры и вклада основных технологических процессов в общий объём вредных выбросов карьера;
- разработка расчётной методики оценки массы выбросов пыли, CO_2 и NO_x;
- обоснование комплекса мероприятий по пылеподавлению и снижению газовых выбросов;
- количественная оценка эффективности предложенных решений с точки зрения экологических и производственных показателей;
- формулирование практических рекомендаций по внедрению разработанных решений на действующих и проектируемых горнодобывающих предприятиях.

Обзор литературы

Вопросам снижения экологической нагрузки при открытой разработке месторождений посвящено значительное число отечественных и зарубежных исследований. Традиционные подходы к оценке пылегазовых выбросов на карьерах базируются на нормативных методиках расчёта, учитывающих удельные показатели пылеобразования для различных технологических операций — бурения, взрывания, экскавации, транспортировки и переработки горной массы. Данные методики, как правило, ориентированы на усреднённые

ACADEMIC SCIENCE PUBLISHING

статистические показатели и не всегда учитывают специфику конкретного месторождения, климатические условия и особенности применяемого оборудования.

Значительное развитие в последние десятилетия получили модели диффузии загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, позволяющие описывать динамику распространения пылевых частиц и газообразных примесей с учётом скорости ветрового переноса, коэффициентов турбулентной диффузии и характеристик источников выбросов. Такие модели широко применяются при обосновании санитарно-защитных зон предприятий и оценке воздействия на здоровье персонала.

Отдельное направление исследований связано с разработкой и внедрением технических средств пылеподавления — оросительных систем, туманообразующих установок, аспирационного оборудования, а также с герметизацией технологического оборудования дробильно-сортировочных комплексов. Эффективность подобных решений подтверждена практикой их применения на ряде горнодобывающих предприятий, однако количественные оценки снижения выбросов существенно варьируются в зависимости от климатических условий, характеристик горной массы и конструктивных особенностей оборудования.

Важным трендом последних лет является электрификация карьерного транспорта, рассматриваемая как один из ключевых инструментов декарбонизации горнодобывающей отрасли. Переход на электросамосвалы и другие виды электрифицированной техники позволяет не только снизить прямые выбросы CO_2 и NO_x, образующиеся при сжигании дизельного топлива, но и сократить эксплуатационные расходы предприятия за счёт более высокой энергоэффективности электропривода. Вместе с тем внедрение электрифицированного транспорта на карьерах сопряжено с рядом технических ограничений, связанных с необходимостью развития зарядной инфраструктуры и адаптации горнотранспортных схем.

Отечественные исследования, посвящённые технологии открытых горных работ и экологической безопасности горного производства, заложили методологическую основу для комплексной оценки природоохранных мероприятий на карьерах Центральной Азии [1, 2]. В работах, посвящённых цифровизации мониторинга горных процессов, отмечается перспективность применения систем автоматического контроля за выбросами в реальном времени, что позволяет оперативно корректировать режимы работы пылеподавляющего оборудования [3]. Международные обзоры, подготовленные под эгидой природоохранных организаций, систематизируют

ACADEMIC SCIENCE PUBLISHING

глобальный опыт снижения загрязнения атмосферного воздуха горнодобывающими предприятиями и подчёркивают необходимость перехода к комплексным. [4].

Несмотря на значительный объём накопленных знаний, в существующей литературе недостаточно освещены вопросы комплексной оценки эффективности сочетания различных технологических мероприятий (пылеподавление, герметизация оборудования, электрификация транспорта) применительно к конкретным горно-геологическим и климатическим условиям месторождений Центральной Азии. Настоящее исследование направлено на восполнение указанного пробела на примере карьера «Ёшлик-1».

Материалы и методы исследования

3.1. Объект исследования

Объектом исследования являлся карьер «Ёшлик-1» — один из крупнейших объектов открытой разработки рудных месторождений в Центральной Азии. Технологическая схема предприятия включает полный цикл открытых горных работ: буровзрывную подготовку горной массы, экскавацию, транспортировку автомобильным транспортом, а также дробление и сортировку добытой руды.

3.2. Методология расчёта суммарных выбросов

В основу исследования положен балансовый метод оценки массы вредных выбросов, в соответствии с которым общая масса загрязняющих веществ определяется как сумма вкладов отдельных источников:

$$M_общ = \Sigma\ (M_пыль_i + M_CO_2_i + M_NO_x_i)$$

где M_пыль_i, M_CO_2_i, M_NO_x_i — массы пыли, диоксида углерода и оксидов азота, образующихся на i-м технологическом переделе (буровзрывные работы, погрузочно-транспортные операции, дробление и сортировка).

Для каждого технологического передела удельные показатели выбросов определялись на основе данных производственного мониторинга, включающих замеры концентраций загрязняющих веществ на характерных участках карьера, а также паспортные характеристики применяемого оборудования (буровых станков, экскаваторов, автосамосвалов, дробильно-сортировочных установок).

3.3. Модель дисперсии пылевых загрязнений

Для описания динамики распространения пылевых частиц в воздушной среде карьера применена одномерная диффузионная модель, учитывающая процессы поступления пыли от источника и её осаждение (пылеподавление):

$dC/dt = M_ucm / V - k \cdot C$

где C — концентрация пыли в воздухе рабочей зоны, M_ист — интенсивность поступления пыли от источника выбросов, V — объём воздуха в рассматриваемой зоне карьера, k — эмпирический коэффициент, характеризующий совокупную эффективность естественного осаждения и применяемых средств пылеподавления.

Данная модель позволяет описывать как стационарные режимы работы карьера (при постоянной интенсивности источника), так и переходные процессы, связанные с включением/отключением оросительных установок и изменением интенсивности буровзрывных работ. Решение уравнения при постоянных M_ист и k имеет вид экспоненциального приближения концентрации C к стационарному значению C_ст = M_ист / (V·k), что позволяет прогнозировать время достижения предельно допустимых концентраций (ПДК) при различных сценариях эксплуатации пылеподавляющего оборудования.

3.4. Оценка эффективности внедряемых решений

Для количественной оценки эффективности предложенных технологических решений использован показатель относительного снижения массы выбросов:

$\Delta M = (M_до - M_после) / M_до \times 100\%$

где M_до и M_после — суммарная масса выбросов до и после внедрения комплекса природоохранных мероприятий соответственно.

3.5. Источники данных

Для практической части исследования использованы данные производственного экологического мониторинга карьера «Ёшлик-1» за отчётный период, включающие показатели пылевых и газовых выбросов по основным технологическим переделам, сведения о производительности горнотранспортного и дробильно-сортировочного оборудования, а также данные об эффективности эксплуатируемых средств пылеподавления. Анализ выполнен с применением аналитических и расчётно-экспериментальных методов, а также методов сравнительного анализа технологических альтернатив.

Результаты и обсуждение

4.1. Структура источников вредных выбросов

Проведённый анализ показал существенную неравномерность вклада различных технологических процессов в общий объём загрязнения атмосферы карьера «Ёшлик-1». Наибольший вклад — до 60% суммарных выбросов — вносит транспортно-погрузочный цикл, что обусловлено значительной

ACADEMIC SCIENCE PUBLISHING

протяжённостью транспортных коммуникаций, интенсивным движением большегрузного автотранспорта и связанным с этим вторичным пылением поверхности технологических дорог. Буровзрывные работы формируют до 25% пылевых и газовых загрязнений — данный вклад связан преимущественно с кратковременными, но интенсивными выбросами пыли и оксидов азота непосредственно в момент производства взрыва. На процессы дробления и сортировки приходится около 15% суммарных выбросов, что объясняется относительно локализованным характером данных операций и наличием базовых систем аспирации на существующем оборудовании.

Детализированные показатели выбросов по основным источникам представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные результаты оценки выбросов на карьере «Ёшлик-1»

Источник выбросов	Пыль, кг/ч	CO_2, кг/ч	NO_x, кг/ч
Буровзрывные работы	85	45	30
Погрузочно-транспортные операции	70	60	25
Дробление и сортировка	55	15	10
Всего	**210**	**120**	**65**

Полученное распределение выбросов согласуется с общими закономерностями, характерными для карьеров аналогичного масштаба, и подтверждает приоритетность транспортно-погрузочного цикла как основного объекта для внедрения природоохранных мероприятий.

4.2. Комплекс предложенных технологических решений

На основании результатов анализа для карьера «Ёшлик-1» была разработана и предложена система комплексного пылеподавления, включающая три взаимодополняющих направления:

- Автоматические оросительные установки, обеспечивающие адресное увлажнение технологических дорог и рабочих площадок в зависимости от текущей метеорологической обстановки и интенсивности движения транспорта, что позволяет минимизировать вторичное пыление при одновременной экономии водных ресурсов.
- Герметизация дробильно-сортировочного оборудования с установкой дополнительных систем аспирации, снижающих выброс пыли непосредственно в местах перегрузки и измельчения горной массы.
- Использование электросамосвалов взамен части парка традиционной дизельной техники, что позволяет напрямую сократить

выбросы CO_2 и NO_x, образующиеся при сжигании дизельного топлива, а также снизить уровень шумового загрязнения на территории карьера.

4.3. Оценка эффективности внедрённых решений

Расчёт по формуле ΔM = (M_до − M_после) / M_до × 100% показал, что внедрение предложенного комплекса решений обеспечивает общее снижение загрязнений атмосферы на 35–40%. Одновременно с экологическим эффектом зафиксирован рост производительности горных работ, что объясняется сокращением простоев техники, связанных с ограничениями видимости при высокой запылённости, а также повышением надёжности эксплуатации дробильно-сортировочного оборудования после его герметизации.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что природоохранные и производственные показатели при открытой разработке месторождений не являются взаимоисключающими: грамотно спроектированный комплекс технологических решений позволяет одновременно достигать снижения экологической нагрузки и повышения экономической эффективности производства. Данный вывод согласуется с современными представлениями об устойчивом горном деле, рассматривающем экологическую и производственную эффективность как взаимодополняющие, а не конкурирующие цели.

4.4. Обсуждение ограничений исследования

Следует отметить ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов. Во-первых, представленные показатели эффективности отражают условия конкретного объекта — карьера «Ёшлик-1» — и могут варьироваться при переносе на предприятия с иными горно-геологическими и климатическими условиями. Во-вторых, применённая диффузионная модель является упрощённой одномерной аппроксимацией реальных процессов распространения загрязняющих веществ в атмосфере карьера, что обуславливает необходимость дальнейшего уточнения модели с учётом трёхмерной структуры воздушных потоков в карьерной выемке. В-третьих, оценка экономической эффективности внедрения электрифицированного транспорта требует отдельного детального технико-экономического анализа с учётом капитальных затрат на создание зарядной инфраструктуры.

Практическая значимость

Предложенные технологические решения имеют непосредственное практическое значение для горнодобывающих предприятий, эксплуатирующих месторождения открытым способом. Применение электрифицированного транспорта и автоматизированных оросительных

систем не только снижает вредные выбросы в атмосферу, но и способствует сокращению эксплуатационных затрат предприятия за счёт более низкой стоимости электроэнергии по сравнению с дизельным топливом, а также за счёт снижения затрат на техническое обслуживание электропривода.

Результаты исследования могут быть использованы:

- при проектировании новых карьеров с учётом требований современных экологических нормативов на стадии разработки проектной документации;
- при модернизации действующих горнодобывающих предприятий Узбекистана и стран Центральной Азии в рамках программ повышения экологической устойчивости производства;
- при разработке отраслевых методических рекомендаций по расчёту и нормированию вредных выбросов на карьерах;
- в качестве основы для дальнейших исследований, направленных на цифровизацию систем мониторинга и автоматизированное управление пылеподавляющим оборудованием в реальном времени.

Кроме того, повышение устойчивости предприятия к ужесточающимся экологическим требованиям способствует укреплению его репутации, снижению рисков штрафных санкций и облегчению доступа к международному финансированию, всё чаще обуславливаемому соответствием принципам экологической, социальной и корпоративной ответственности (ESG).

Заключение

Проведённое исследование подтвердило, что внедрение комплекса инновационных технологических решений на карьере «Ёшлик-1» способствует значительному улучшению как экологических, так и производственных показателей предприятия. Разработанная методика расчёта выбросов, основанная на балансовом подходе и диффузионной модели распространения пылевых загрязнений, позволяет объективно оценивать вклад отдельных технологических процессов в общий уровень загрязнения атмосферы карьера и обосновывать приоритетные направления природоохранных мероприятий.

Предложенная система комплексного пылеподавления, включающая автоматические оросительные установки, герметизацию дробильно-сортировочного оборудования и внедрение электросамосвалов, обеспечивает снижение концентрации загрязняющих веществ в рабочей зоне на 35–40% при одновременном росте производительности горных работ. Полученные

ACADEMIC SCIENCE PUBLISHING

результаты демонстрируют, что цели экологической безопасности и производственной эффективности при открытой разработке месторождений могут быть достигнуты совместно при условии комплексного, а не изолированного, подхода к выбору технологических решений.

Результаты работы могут служить методологической основой для внедрения комплексных программ по охране атмосферного воздуха и повышению безопасности труда на открытых горных разработках Узбекистана и других стран региона. Направлениями дальнейших исследований представляются уточнение трёхмерной модели дисперсии загрязняющих веществ с учётом рельефа карьерной выемки, а также детальный технико-экономический анализ полномасштабной электрификации карьерного транспорта.

Рекомендации по дальнейшему развитию исследований

Полученные в настоящей работе результаты открывают несколько перспективных направлений для дальнейших исследований в области снижения экологической нагрузки при открытой разработке рудных месторождений.

Во-первых, целесообразна разработка трёхмерной диффузионной модели распространения пылевых загрязнений, учитывающей реальную геометрию карьерной выемки, характер рельефа бортов карьера и сезонную изменчивость ветрового режима. Такая модель позволила бы более точно прогнозировать зоны повышенной концентрации загрязняющих веществ и оптимизировать размещение стационарных постов экологического мониторинга.

Во-вторых, перспективным направлением является интеграция систем автоматического контроля выбросов с системами управления горнотранспортным комплексом в режиме реального времени. Подобная интеграция позволила бы автоматически корректировать интенсивность работы оросительных установок в зависимости от текущей метеорологической обстановки и графика движения транспорта, что дополнительно повысило бы эффективность пылеподавления при сохранении экономии водных и энергетических ресурсов.

В-третьих, требует отдельного изучения вопрос масштабирования электрификации карьерного транспорта — от частичной замены дизельных самосвалов электрифицированными аналогами до создания полностью электрифицированного горнотранспортного комплекса. Экономическая целесообразность подобного перехода зависит от множества факторов, включая стоимость создания зарядной инфраструктуры, доступность электроэнергии на месторождении и динамику цен на дизельное топливо, что

ACADEMIC SCIENCE PUBLISHING

делает необходимым проведение комплексного технико-экономического анализа применительно к конкретным условиям каждого предприятия.

Наконец, представляется целесообразным распространение предложенной методологии оценки эффективности природоохранных мероприятий на другие крупные карьеры Центральной Азии с целью формирования сравнительной базы данных, позволяющей выявлять наиболее эффективные комбинации технологических решений для различных горно-геологических и климатических условий региона.

Список литературы

1. **Абрамов А. А.** Технология открытых горных работ. — М.: Недра, 2018.

2. **Бояркин Н. Ф.** Экологическая безопасность горного производства. — Екатеринбург: УрО РАН, 2019.

3. **UNEP.** Air Pollution from Mining: Global Overview and Mitigation Measures. — Geneva: United Nations, 2023.

4. Environmental and economic comparison of diesel and electric trucks in open-pit mining operations // Journal of Cleaner Production. — 2025. — Vol. 507. — Art. 145540.

5. **ISO.** ISO 14001. Environmental management systems — Requirements with guidance for use.

ACADEMIC SCIENCE PUBLISHING