

Анализ технологии и оборудования предприятия по добыче и переработке щебня как источника загрязнения атмосферы

Герман Петрович ДЫЛДИН^{1*}

Николай Петрович КОСАРЕВ^{1**}

Вячеслав Владимирович МАРТЫНОВ²

Александр Германович ДЫЛДИН^{1***}

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

²ООО ДСП Шарташский карьер, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Цель работы. Подавляющее количество используемого нерудного сырья добывается открытым способом. Технологические процессы разработки месторождений открытым способом сопровождаются образованием значительного количества пылегазовых выбросов, содержащих вредные компоненты и загрязняющих атмосферу карьеров и прилегающих территорий. Целью настоящей работы является анализ этих воздействий, в том числе одного из наиболее значимых из них – производственной пыли.

Методология работы. В работе для анализа и систематизации использовались данные современных источников информации, связанных с тематикой исследования, а также материалы ООО ДСП Шарташский карьер.

Результаты работы и область их применения. Обобщая изложенный в данной работе материал, следует отметить, что при производстве открытых горных работ происходит значительное загрязнение окружающей атмосферы вредными выбросами. Так, при работе ООО ДСП Шарташский карьер в атмосферу выбрасывалось 8 загрязняющих веществ, из которых 3 вещества обладают эффектом суммирующего действия (3 суммации), а наибольший вклад в загрязнение атмосферы вносит неорганическая пыль. При работе карьера за год в атмосферу выбрасывалось почти 160 т неорганической пыли. При переработке щебня имеется ряд неорганизованных источников загрязнения атмосферы неорганической пылью, пылеподавление на которых, по мнению авторов, не полностью решено и является направлением дальнейших исследований и разработок.

Выводы. Количество нерудных строительных материалов, добываемых открытым способом, растет из года в год почти на 10 %. Открытый способ добычи полезных ископаемых оказывает наиболее негативное воздействие на экологическую обстановку в зоне ведения горных работ. В результате антропогенного воздействия на окружающую среду в зоне действия карьеров происходит заметное ухудшение экологических условий существования природы и человека. Применяемые в настоящее время методы и средства пылеподавления имеют ограниченный диапазон применения, носят, как правило, локальный характер, в большинстве своем основаны на гидропылеподавлении и применимы лишь при плюсовых температурах окружающей среды. Поэтому анализ технологии переработки нерудных строительных материалов как источника загрязнения атмосферы и разработка всесезонных средств пылеподавления являются актуальной задачей.

Ключевые слова: открытые горные работы, переработка щебня, вредные вещества, загрязнение атмосферы, неорганическая пыль.

Введение

Наиболее важными для строительства являются такие нерудные строительные материалы, как щебень, песок, гравий, известняк и др. Подавляющее количество используемого нерудного сырья добывается открытым способом. Предприятия по добыче и переработке нерудных строительных материалов открытым способом, как правило, включают следующую технологию: буровзрывные работы (для добычи полезного ископаемого); выемочно-погрузочные работы; транспортировку горной массы на дробильно-сортировоч-


ные комплексы; дробление, сортировку, складирование и отгрузку готовой продукции; отвальные работы и рекультивацию. Перечисленные этапы горного производства сопровождаются образованием значительного количества пылегазовых выбросов, содержащих вредные компоненты и загрязняющих атмосферу карьеров и прилегающих территорий.

Количество горных предприятий по добыче и переработке нерудных строительных материалов в развитых странах составляет десятки тысяч, например, в КНР –

✉ german.dyldin@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7106-4816>

** ur.intelnedra@mail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-0128-5859>

*** alexandre.dyldin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7788-0251>

около 30 000 предприятий [1]. В России объем производства щебня приближается к 285 млн т в год [2].

Процессы добычи и переработки щебня на горном предприятии сопровождаются выделением больших количеств полидисперсной пыли.

Пыль – это взвесь в воздухе твердых частиц органического или минерального происхождения размером 0,1–100 мкм. Способность пыли удерживаться в воздухе или выпадать из него определяется размерами пылевых частиц.

Постоянная работа в запыленной атмосфере вызывает различные профессиональные заболевания у трудящихся, особенно в зимний период, что отражено, в частности, в работах [3–5]. Производственная пыль пагубно влияет на работу оборудования; разносимая ветром, угнетает жизнедеятельность большинства растений и животных в районе ведения горных работ.

Поэтому вопросы пылеподавления на открытых горных работах являются весьма актуальной задачей.

Периодичность, а также интенсивность пылегазовыделения зависят от природно-климатических условий (ветра, осадков, снежного покрова и пр.). Значительное влияние на распространение запыленности и соответственно потери готовой продукции в виде сыпучих грузов, особенно в местах перегрузки и складирования, оказывает ветровая нагрузка. Уже при скорости ветра около 2 м/с сухая пыль сдувается с поверхности техногенных образований и уносится на значительные расстояния. При этом концентрация пыли в воздухе в значительной степени превышает допустимые значения.

В работе [5] авторы приводят обзор и анализ способов пылеподавления на открытых горных работах, в том числе отмечают, что процессы пылеуноса зависят от разных факторов: вида и состава материала, условий окружающей среды. В частности, показывают, что склады сыпучих материалов с плоским верхом выбрасывают на 13–60 % меньше аэрозолей минеральной пыли, чем конические склады. В основном это происходит из-за более высокого угла наклона, достигаемого плоскими складами, чем приподнятыми коническими складами. Рассматривают сухие и мокрые методы пылеподавления, отмечая, что специальные составы с реагентами препятствуют пылению значительно эффективнее, чем простая вода.

Вопросы пылеуноса и потери сыпучих грузов в местах перегрузки и с открытых складов рассмотрены в работах [6–9].

К мероприятиям, снижающим воздействие вредных факторов горнодобывающего производства, можно, в частности, отнести использование более экобезопасных взрывчатых веществ и технологии их применения, проведение взрывов в период максимальной ветровой активности, при работе ДСУ (дробильно-сортировочных установок) и ПДСУ (передвижных дробильно-сортировочных установок) укрывать источники пыле- и шумовыделения пылезащитными материалами и экранами, оснащать их пылеулавливающими аспирационными системами, устраивать зоны защитных лесонасаждений [10].

Процессы пылеобразования, запыленности атмосферы территорий горных предприятий вредными газопылевыми выбросами и защита от них рассматриваются в работах [11, 12].

Анализ пылевыделения и аэропленный способ пылеподавления на карьерах стройматериалов рассмотрены в работе [13].

Проблема запыленности селитебных территорий вокруг карьеров и снижение рисков загрязнения их после взрывных работ путем корректировки технологии отбойки руды рассмотрена в работе [14].

Для пылеподавления на карьерах в летний период применяется, в частности, гидрообеспыливание, зимой – снегогенераторы. В работе [1] показан пример комплексного подхода к пылеподавлению к карьере, включающего весь технологический процесс добычи, переработки и складирования полезного ископаемого. Авторы, показывая применение комплексно нескольких способов пылеподавления, включающих гидрообеспыливание, туманообразующие пушки, механические средства укрытия пылящих узлов технологического процесса, сообщают о 85-процентной эффективности пылеудаления.

В работе [15] исследуется средство, состоящее из 4 компонентов, позволившее повысить гидрофильность и эффективность пылеподавления, а в работе [16] исследовалось применение пылеподавительных составов, в частности, при работе горного транспорта в летний период.

В работе [17] авторы, рассматривая вопрос пылеобразования, для улучшения пылеподавления при работе буровых установок предлагают строго соблюдать регламент технического обслуживания имеющейся системы пылеподавления и повышать ответственность и квалификацию операторов бурильного оборудования.

В работах [18, 19] рассматривается, в частности, моделирование с помощью программы COMSOL пыления на хвостохранилищах и размещение области максимального загрязнения атмосферы карьера в зависимости от параметра фоновой стратификации и глубины карьера при проведении взрывных работ.

Моделирование пыления отвала на основе метеоданных, проективного покрытия растительностью и других показателей для частиц менее 0,01 мм приведено в работе [20].

Результаты и их применение

Анализ технологии и оборудования предприятия по добыче и переработке щебня как источника загрязнения атмосферы рассмотрим на примере работы ООО ДСП Шарташский карьер, расположенного на восточной окраине г. Екатеринбурга, вблизи микрорайона Комсомольский.

Основным видом деятельности ООО «Дробильно-сортировочное предприятие» являлась добыча и переработка строительного камня (гранита) Северного участка Шарташского месторождения гранитов. Минералогический состав шарташских гранитов: однородные биотитовые зернистые граниты с содержанием свободной двуокиси кремния SiO_2 20–70 % и более.

Производительность карьера по горной массе составляла 360 тыс. м³/год.

Предприятие ООО «ДСП» имело в своем составе следующие производственные объекты, являющиеся источниками пыли и газообразных, загрязняющих атмосферу веществ:

- Шарташский карьер, восточный борт карьера;
- дробильно-сортировочные комплексы № 1, № 2;
- Северный участок (рекультивация);

- вспомогательное производство;
- котельная.

При разработке месторождения возможны следующие виды воздействия на объекты окружающей среды:

- атмосферный воздух – пылегазовые выбросы в районе работ от технологических процессов и оборудования;
- поверхностные и подземные воды – сброс карьерных вод без очистки, осуществляемый по водоотводной канаве в болото Малое Шарташское;

– земельные ресурсы и почвы – размещение карьера и последующая его производственная деятельность предполагает следующие типы воздействия на почвенный покров и структуру земель:

- изменение структуры земель и землепользования;
- разрушение целостности почвенного покрова;
- животный и растительный мир – изменение среды обитания растений и животных. Охрана фауны и флоры обеспечивается восстановлением мест их обитания в результате проведения биологического этапа рекультивации.

Характеристика источников выбросов предприятия

Основными источниками загрязнения атмосферы на предприятии являются неорганизованные источники выброса при проведении добычных работ в карьере (взрывные работы, погрузочно-разгрузочные работы, работа технологического оборудования, сдувание со складов готовой продукции, сыпка фракций в конуса) и при проведении работ по рекультивации Северного участка Шарташского гранитного карьера (засыпка карьера).

К **организованным источникам** выброса загрязняющих веществ относится дымовая труба котельной, работающая на дизельном топливе (солярке).

При работах в карьере от неорганизованных источников в атмосферу выбрасываются неорганическая пыль SiO_2 и газообразные загрязняющие вещества от дизельной техники.

От организованных источников в атмосферу выбрасываются твердые и газообразные загрязняющие вещества при работе котельной.

Неорганизованные источники

Карьер:

- бурение скважин;
- производство массовых взрывов;
- дробление негабарита бутобоем;
- дробление негабарита гидромолотом;
- работа погрузчиков;
- ведение погрузочных работ в карьере экскаваторами;
- транспортировка строительного камня автосамосвалами на ДСУ Шарташского карьера.

Рекультивация Северного участка карьера:

- транспортировка грунта в карьер автосамосвалами (сдувание с поверхности кузова и с дорог);
- разгрузка автосамосвала в карьере (засыпка);
- работа бульдозера.

ДСК:

- сыпка отсева 2-й, 3-й стадии дробления: фракция 0–5 мм, с конвейеров в конусы;
- сыпка щебня 2-й, 3-й стадии дробления: фракция 5–20 мм, с конвейеров в конусы;
- сыпка щебня 3-й стадии дробления: фракция 5–10 мм, с конвейеров в конусы;

- сдувание пыли с конвейеров;
- сдувание с поверхности конусов и открытых складов;
- погрузка готовой продукции в автосамосвалы погрузчиками.

Организованные источники:

- котельная мощностью 56 кВт на дизтопливе (солярка) для обогрева административно-бытовых помещений.

Неорганизованные выбросы составляют основную долю выбросов предприятия, на организованные выбросы котельной приходится всего 0,015 %.

Загрязнение карьерного воздуха при работе предприятия

Граниты Шарташского месторождения не являются токсичными, не склонны к самовозгоранию.

При производстве горных работ в атмосферу карьера выделяются вредные примеси:

- от экскаваторно-погрузочных работ – пыль;
- от транспортных работ – пыль, газы;
- от дробления строительного камня (гранитов) на дробильной установке – пыль.

Технологические процессы разработки месторождений открытым способом сопровождаются образованием значительного количества пылегазовых выбросов, содержащих вредные компоненты и загрязняющих атмосферу прилегающей территории.

Общее загрязнение атмосферы карьера наблюдается, как правило, в период безветренной погоды и особенно при инверсиях. Оно возникает либо вследствие постепенного накопления вредных примесей при работе горнотранспортного оборудования, либо после массового взрыва, произведенного при неблагоприятных метеорологических условиях.

При слабых ветрах возможно образование труднопроветриваемых зон с повышенными концентрациями вредных примесей, т. е. местных загрязнений. Местные загрязнения атмосферы наблюдаются обычно в зонах наибольшей концентрации горнотранспортного оборудования, на нижних горизонтах карьера.

Причиной весьма сильного, но, как правило, кратковременного загрязнения атмосферы карьера и прилегающего района являются взрывные работы. При взрывах выделяются значительные объемы ядовитых газов – в основном окись углерода и окись азота. Количество газов зависит от типа ВВ и свойств взрывааемых пород. С увеличением удельного расхода ВВ в два раза удельное пылевыведение возрастает в 6 раз.

Взрывные работы не приводят к длительному загрязнению атмосферы в карьере, поскольку уровень конвекции оказывается, как правило, выше верхней отметки карьера. С увеличением глубины карьера массовые взрывы могут стать основным источником загрязнения атмосферы.

Интенсивным и постоянно действующим источником загрязнения воздуха в карьере является автотранспорт и две мобильные дробильно-сортировочные установки Metsomineral. Выхлопные газы двигателей внутреннего сгорания представляют сложную многокомпонентную смесь.

Медиико-биологические требования к составу воздуха в карьере определены предельно допустимыми концентрациями (ПДК). Учитывая одновременное присутствие

в атмосфере карьера большого числа аэрозольных и газообразных примесей, необходимо стремиться к тому, чтобы достичь концентраций значительно более низких, чем предельно допустимые.

По правилам безопасности воздух в карьере должен содержать по объему не менее 20 % кислорода. Запыленность воздуха на рабочих местах не должна превышать ПДК.

Большую часть времени удовлетворительный воздухообмен в карьерном пространстве обеспечивается естественными вентиляционными силами.

Работа практически всех машин и механизмов, составляющих технологический комплекс карьера, сопровождается выделением вредных примесей. При достаточно активном естественном воздухообмене между процессами поступления и выноса устанавливается динамическое равновесие, благодаря чему среднее содержание вредных примесей в атмосфере карьера большую часть времени не должно превышать предельно допустимых значений.

Целесообразность искусственного проветривания устанавливается в зависимости от геометрии карьера и метеорологической характеристики месторождения.

Оценка геометрии карьера с точки зрения эффективности проветривания ветром выполняется исходя из отношения глубины карьера H к среднему размеру карьера L по поверхности.

Средний размер карьера определяется по формуле:

$$L = \sqrt{L_n \times L_m},$$

где L_n, L_m – длина и ширина карьера, м.

При $H/L \geq 0,1$ карьер считается слабопроветриваемым.

Для ООО «ДСП»: $L = \sqrt{L_n \times L_m} = \sqrt{740 \times 600} = 666 \text{ м}^2$;
 $H/L = 98/666 = 0,15$.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что Шарташский гранитный карьер можно отнести к слабопроветриваемым.

Загрязнение атмосферы карьеров ядовитыми газами выше ПДК может произойти в результате полного прекращения воздухообмена (глубокой и продолжительной инверсии). Наибольшими источниками загазованности атмосферы являются автотракторная внутрикарьерная техника и щебеночное производство.

Основной причиной загрязнения атмосферы при работе автомобильного транспорта являются токсичные компоненты выхлопных газов: оксид углерода, оксиды азота, сернистый ангидрид. С увеличением глубины карьера повышается вероятность загазованности атмосферы отдельных горизонтов, участков или всего карьера выхлопными газами автомобильного транспорта, особенно в их глубинной части.

Взрывные работы являются мощным, периодически действующим источником загрязнения атмосферы карьера и прилегающей территории ядовитыми газами (оксидами углерода и азота). Одной из основных причин образования токсичных газов в продуктах детонации ВМ является избыток или недостаток кислорода в его составе, т. е. его кислородный баланс.

Количество вредных газов и пыли, образующихся при массовых взрывах в карьере, можно снизить с помощью технологических, организационных и инженерно-технических мероприятий, основными из которых являются:

- взрывание ВВ с нулевым или близким к нему кислородным балансом, применение вододисперсионных ВВ;
- гидрообеспыливание взорванной горной массы и автодорог карьера в теплый период года. Нормативный расход воды на пылеподавление составляет $0,015 \text{ м}^3/\text{м}^3$ горной массы. Общий объем воды на пылеподавление для ООО ДСП – 5,4 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$;
- проведение взрывов в период максимальной ветровой активности;
- сокращение объемов массового взрыва;
- равномерное распределение горных работ в рабочей зоне карьера, что исключает концентрацию работающего горного оборудования.

Горные работы

Добыча строительного камня осуществляется буровзрывным способом. Вскрыша в карьере отсутствует. Буровые работы осуществляются буровой машиной Atlas Copco ROC, оснащенной пылеуловителем с гидравлическим приводом со встроенными средствами автоматической очистки, состоящей из блока фильтра, вытяжного вентилятора и всасывающего шланга. По данным отчета об инвентаризации выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и их источников для ООО ДСП/ООО «Экобаланс», ООО ДСП. Екатеринбург, 2018. 214 с., процесс бурения скважин сопровождается неорганизованным выбросом в атмосферный воздух: диоксида алюминия (класс опасности – 101), диоксида железа (123), кальция оксид (128), магния оксид (138), пыли неорганической SiO_2 . Взрывные работы осуществляются с использованием нитронита (эмульсионное взрывчатое вещество), годовой расход которого составляет 180 т/год. Расход нитронита на проведение одного взрыва составляет 22,5 т. Всего за год осуществляется 8 взрывов. При взрыве в атмосферный воздух неорганизованно выделяются: диоксида алюминия (101), диоксида железа (123), кальция оксид (128), магния оксид (138), азота диоксид (0301), азота оксид (0304), углерода оксид (0337), пыль неорганическая SiO_2 . Для измельчения негабаритных кусков взорванной горной массы используются бутобой ЭО 5551 и гидромолот ЕК 270. Выемка горной массы осуществляется посредством экскаватора Komatsu PC 750 SE. Работы по измельчению и выемке горной массы сопровождаются пылением – выделением в атмосферный воздух: диоксида алюминия (101), диоксида железа (123), кальция оксид (128), магния оксид (138), азота диоксида (0301), азота оксид (0304), углерода оксид (0337), керосина (2732), пыли неорганической SiO_2 . При работе двигателя экскаватора происходит выделение веществ: азота диоксида (0301), азота оксид (0304), углерода (сажи) (0328), серы диоксида (0330), углерода оксид (0337), керосина (2732). Годовой расход дизельного топлива для экскаватора составляет 360 т.

Транспортировка сырья из карьера к дробильно-сортировочным установкам осуществляется дизельным грузовым транспортом марок VOLVO A35D и TEREX TA 300. При работе дизельных двигателей в процессе сгорания топлива происходит выброс загрязняющих веществ: азота диоксида (0301), азота оксид (0304), углерода (сажи) (0328), серы диоксида (0330), углерода оксид (0337), ке-

росина (2732). Общий годовой расход топлива грузовым транспортом составляет 100,8 м³.

Дробильно-сортировочные комплексы № 1, № 2

Исходная горная масса крупностью материала до 600 мм выгружается в приемный бункер дробильно-сортировочной установки. Годовая производительность каждой из установок 477 тыс. т. Из приемного бункера при помощи вибропитателя горная масса поступает в щековую дробилку первой стадии дробления. Производительность дробилки 250 т/ч, размер материала на выходе из дробилки 0–200 мм. Фракция 0–10 мм отсыпается на склад отсева (либо сразу погрузка в автотранспорт), фракция 0–200 мм пересыпается на конвейер № 1 для подачи в бункер № 1, из бункера № 1 материал поступает на конвейер № 2, а далее на конусную дробилку второй стадии дробления с производительностью 200 т/ч, где материал измельчается до размера 0–70 мм. После дробилки установлено два последовательных конвейера №3 и №4, транспортирующих дробленую горную массу на грохот. На грохоте происходит разделение гранитного щебня на три фракции: 0–5 мм, 5–20 мм и 20–70 мм. Фракции 0–5 мм, 5–20 мм и 20–70 мм (частично) при помощи конвейеров № 5, № 6 и № 7 (соответственно) ссыпаются в конусы (отдельные) для временного хранения. Часть фракции 20–70 мм при помощи конвейера № 7 (поворотный конвейер) подается на конвейер № 7а, а после в бункер № 2. Из бункера № 2 гранит при помощи конвейера № 8 подается на третью стадию дробления в конусную дробилку с производительностью 79,5 т/ч. Данная дробилка позволяет измельчить гранит до фракции 0–20 мм. Измельченный гранитный щебень при помощи конвейеров № 9 и № 10 пересыпается на грохот третьей стадии дробления, делящий его на фракции 0–5 мм, 5–10 мм и 5–20 мм. Фракции 0–5 мм, 5–10 мм и 5–20 мм при помощи конвейеров № 11, № 12 и № 13 (соответственно) ссыпаются в конусы (отдельные) для временного хранения. Из конусов временного хранения осуществляется погрузка готовой продукции для транспортировки на склад и заказчикам. Для погрузки используется дизельный бульдозер марки Caterpillar, транспортировка осуществляется грузовыми автомобилями VOLVO A35D.

Процессы пересыпки и хранения гранита сопровождаются выделением в атмосферный воздух следующих веществ: диАлюминия триоксида (101), диЖелеза триоксида (123), кальция оксида (128), магния оксида (138), пыли неорганической, содержащей двуокись кремния более 70 % (2907); работа двигателей автотранспорта и спецтехники (дизельные) – выделением азота диоксида (0301), азота оксида (0304), углерода (сажи) (0328), серы диоксида (0330), углерода оксида (0337), керосина (2732).

Линии ДСК № 1 и ДСК № 2 являются аналогичными и отличаются только тем, что на линии № 2 конвейер № 7 не является поворотным, а также отсутствует конвейер № 7а, и вся фракция размером 20–70 мм после второй стадии дробления поступает на третью стадию.

Северный участок (рекультивация)

Рекультивация карьера сопровождается пересыпками, сдувами с поверхности материалов и выделением загрязняющих веществ от двигателей внутреннего сгорания грузового транспорта и спецтехники. Происходит выброс в атмосферу таких загрязняющих веществ, как диАлю-

миния триоксид (101), диЖелеза триоксид (123), кальция оксид (128), магния оксид (138), пыли неорганической, содержащей двуокись кремния более 70 % (2907).

Вспомогательное производство

Для отопления административно-бытовых помещений предусмотрен бытовой котел марки Baltur, работающих на природном газе. Годовой расход газа составляет 1260 м³/год, максимальный часовой расход составляет 0,5 м³/ч. Продукты сгорания природного газа: азота диоксид (0301), азота оксид (0304), углерода оксид (0337), бензапирен (0730) – выбрасываются в воздух через трубу высотой 4 м с диаметром устья 0,25 м. На территории предусмотрена открытая стоянка автотранспорта, стоянка грузовой и спецтехники, эксплуатируемой на карьере.

Предприятие ООО ДСП имеет 1 организованный и 118 неорганизованных источников выбросов.

В результате проведения инвентаризации установлено, что в выбросах предприятия присутствуют вещества 12 наименований, из них твердых – 7 веществ, жидких и газообразных – 5 веществ. Для веществ определены ПДКм.р., ПДКс.с. и ОБУВ для вредных веществ. По степени воздействия на организм человека загрязняющие вещества, присутствующие в выбросах предприятия, классифицируются следующим образом:

1-й класс – бензапирен;

2-й класс – диАлюминия триоксид (в перерасчете на алюминий);

3-й класс – азота диоксид (азот (IV) оксид); азот (II) оксид (азота оксид); углерод (сажа); серы диоксид – ангидрид сернистый; пыль неорганическая SiO₂;

4-й класс – углерода оксид.

Для двух веществ: керосина и кальция оксида – класс опасности не установлен.

Из 12 загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу, к твердым веществам относятся: диАлюминия триоксид (в пересчете на алюминий), диЖелеза триоксид (железа оксид) (в пересчете на железо), кальция оксид (негашеная известь), магния оксид, углерод (сажа), бензапирен, пыль неорганическая SiO₂; к жидким, газообразным веществам относятся: азота диоксид (азот (IV) оксид); азот (II) оксид (азота оксид); сера диоксид – ангидрид сернистый (330); углерода оксид (337); к летучим органическим веществам – керосин (2732).

Анализ рассеивания вредных выбросов в атмосферу при работе карьера

Качественный и количественный состав выбросов при работе карьера определен в соответствии с действующими методическими материалами и согласно Проекту нормативов предельно допустимых выбросов для ООО «ДСП».

Расчет приземных концентраций для ООО «Дробильно-сортировочное предприятие» проведен в соответствии с ОНД-86, по программе УПРЗА «Эколог», версия 3,00, утвержденной ГГО им. А. И. Воейкова (Дробильно-сортировочное предприятие Шарташский и Сибирский карьеры. Проектная документация ОАО Институт «Уралгипроруда», Екатеринбург, 2010.).

Расчеты концентраций выполнены с учетом максимальной загрузки оборудования, согласно технологии разработки месторождения, при максимальных выбросах:

Таблица 1. Координаты расчетных точек
Table 1. Coordinates of the calculated points

Номер расчетной точки	Координаты точки, м		Тип точки	Комментарий
	X	Y		
1	-285	-187	На границе жилой зоны	г. Екатеринбург
2	475	1015	На границе жилой зоны	п. Пески
3	5	1110	На границе охранной зоны	оз. Шарташ
4	-285	-65	На границе СЗЗ, юго-запад	На границе СЗЗ
5	-265	610	На границе СЗЗ, северо-запад	На границе СЗЗ
6	985	-65	На границе СЗЗ, восток	На границе СЗЗ
7	305	-490	На границе СЗЗ, юг	На границе СЗЗ
8	200	930	На границе СЗЗ, север	На границе СЗЗ

Таблица 2. Перечень загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу
Table 2. List of pollutants released into the atmosphere

Код	Вещество Наименование	Используемый критерий	Значение критерия, мг/м³	Класс опасности	Суммарный выброс вещества	
					г/с	т/год
0301	Азота диоксид (азот (IV) оксид)	ПДКм.р.	0,200000	3	27,2466718	7,285246
0304	Азот (II) оксид (азота оксид)	ПДКм.р.	0,400000	3	4,4297163	1,184486
0328	Углерод (сажа)	ПДКм.р.	0,150000	3	0,0735860	1,058622
0330	Серы диоксид – ангидрид сернистый	ПДКм.р.	0,500000	3	0,1491176	1,859969
0337	Углерода оксид	ПДКм.р.	5,000000	4	40,4171588	6,391834
2732	Керосин	ОБУВ	1,200000	4	0,1712613	1,513149
2904	Мазутная зола электростанций	ПДКс.с.	0,002000	2	0,0001100	0,001923
2908, 2907	Пыль неорганическая SiO ₂	ПДКм.р.	0,300000	3	386,3818644	159,858483
Всего веществ: 8					458,8694862	179,153712
в том числе твердых: 3					386,4555604	160,919028
жидких/газообразных: 5					72,4139258	18,234684
Группы веществ, обладающих эффектом суммации:						
6006	(4) 301 304 2904 330					
6046	(2) 337 2908					
6204	(2) 301 303					

двух ДСК и технологического транспорта, а также с одновременно проводимой рекультивацией – засыпкой Северного участка Шарташского карьера и работой котельной.

Расчеты проведены для одного расчетного прямоугольника. Система координат – локальная предприятия. За начало координат принята условная точка.

Расчетный прямоугольник

Координаты середины сторон прямоугольника 1:

$$X_1 = 500; Y_1 = 300; X_2 = 1100; Y_2 = 300.$$

Ширина 1800 м, шаг 200 × 200 м.

Всего при разработке карьера определено 100 источников выброса, из них организованных источников один.

В расчетах, согласно ОНД-86, учтены коэффициенты рассеивания:

– $F = 1,0$ (для газообразных веществ);

– $F = 3,0$ (для неорганизованных источников без очистки выбросов). Расчеты выполнены с учетом фонового загрязнения атмосферы.

Фоновые концентрации вредных веществ (диоксид азота, оксид углерода, диоксид серы, взвешенные вещества) в районе размещения ООО «Дробильно-сорти-

Таблица 3. Источники, дающие наибольшие вклады в загрязнение атмосферы
Table 3. Sources that make the greatest contributions to atmospheric pollution

Код	Наименование вещества	Расчетная максимальная концентрация (доли ПДК)	Источники, дающие наибольший вклад в максимальную концентрацию				Процент вклада	Координаты точки	
			Площадка	Цех	Источник	Название цеха		X	Y
0301	Азота диоксид (азот (IV) оксид)	0,8861	1	3	6007	Рекультивация Северного участка	21,75	475	1015
0304	Азот (II) оксид (азота оксид)	0,0233	1	3	6007	Рекультивация Северного участка	87,16	200	930
0328	Углерод (сажа)	0,0317	1	5	6099	ДСК-2	82,37	200	950
0330	Серы диоксид – ангидрид сернистый	0,5832	1	6	0100	Котельная	3,42	-265	610
2908, 2907	Пыль неорганическая: SiO ₂	0,9255	1	3	6007	Рекультивация Северного участка	47,00	475	1015
6006	(4) 301 304 2904 330	0,3140	1	3	6007	Рекультивация Северного участка	86,50	200	930
6046	(2) 337 2908	0,9326	1	3	6007	Рекультивация Северного участка	47,01	475	1015
6204	(2) 301 330	1,4577	1	3	6007	Рекультивация Северного участка	17,24	200	930

Таблица 4. Параметры для определения категории предприятия по воздействию его выбросов на атмосферный воздух
Table 4. Parameters for determining the category of an enterprise by the effect of its emissions on atmospheric air

Вещество		Суммарный выброс		Расчетные параметры		
Код	Наименование	г/с	т/год	Φ_j	K_j	G_j
0301	Азота диоксид (азот (IV) оксид)	27,2466720	7,285246	222,49219	36,4262300	0,8861426
0304	Азот (II) оксид (азота оксид)	4,4297163	1,184486	18,09525	2,9612150	0,0236529
0328	Углерод (сажа)	0,0735860	1,058622	16,71815	7,0574800	0,0347756
0330	Серы диоксид – ангидрид сернистый	0,1491176	1,859969	6,80320	3,7199380	0,0153724
0337	Углерода оксид	40,4171590	6,391834	13,06202	1,2783668	0,0059590
2732	Керосин	0,1712613	1,513149	4,84816	1,2609575	0,0126058
2904	Мазутная зола электростанций	0,0001100	0,001923	0,88000	0,9615000	0
2908, 2907	Пыль неорганическая: SiO ₂	386,3818600	159,858480	2088,50120	532,8616100	0,9255469
Группы веществ, обладающие эффектом суммации:						
6006	Группа сумм (4) 301 304 330			248,27064		0,9251679
6046	Группа сумм (2) 337 2908			2101,56320		0,9315059
6204	Группа сумм (2) 301 330			143,30962		0,5634469

ровочное предприятие» с учетом вклада предприятия составляют:

- по пыли (взвешенные вещества) 0,315 мг/м³ (0,63 ПДК);
- по диоксиду азота – 0,124 мг/м³ (0,62 ПДК);
- по оксиду углерода – 4,612 мг/м³ (0,9224 ПДК);

– по диоксиду серы – 0,025 мг/м³ (0,05 ПДК).

Заданы контрольные точки на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и жилья. Выбор расчетных точек обусловлен необходимостью определения зон загрязнения, создаваемых источниками выбросов предприятия с целью обоснования нормативов выбро-

сов. Координаты данных расчетных точек приведены в табл. 1.

От объектов ООО «Дробильно-сортировочное предприятие» в атмосферу выбрасывается 8 загрязняющих веществ, из которых 3 вещества обладают эффектом суммирующего действия (3 суммы). Перечень веществ, выбрасываемых в атмосферу от объектов ООО «ДСП», приведен в табл. 2.

Согласно данным, приведенным в табл. 2, наибольший вклад в загрязнение атмосферы вносит неорганическая пыль. При работе карьера за год в атмосферу выбрасывается почти 160 т неорганической пыли.

Пылевыведение при работе технического оборудования: бурового станка – 4,3 г/с, экскаватора – 2 г/с, автосамосвала – 15 г/с, 1 м ленточного конвейера – 50 мг/с, бульдозера Т-180 – 97–200 мг/с.

Анализ приземных концентраций

Величины максимальных приземных концентраций на границах нормативных СЗЗ и на границе селитебной территории при нормальном режиме работ не превышают предельно допустимых значений и приведены в табл. 3.

Таблица 5. Компоненты пыли
Table 5. Dust components

Код	Вещество	Содержание пыли, %
2907	SiO ₂	74,39
123	Fe ₂ O ₃	3,66
101	Al ₂ O ₃	17,41
138	MgO	1,84
128	CaO	2,70

Таблица 6. Пылевыведение загрязняющих веществ при сыпке фракций щебня в складские конусы
Table 6. Dust emission of pollutants during the dumping of crushed stone fractions into storage cones

Наименование источника выделения (ИВ)	Вредное вещество, наименование	Количество ЗВ, отходящих от ИВ	
		г/с	т/год
Ссыпка в конус с конвейера № 5 (фракция 0–5 мм, гранит 15,0), сдувы при хранении. Длина 15 м, ширина ленты 0,65 м, скорость ленты 1,7 м/с, производительность 20,9 т/ч, влажность 20 %, количество переработанного материала 43 890 т/год, время работы 2100 ч/год	ДиАлюминия триоксид (в пересчете на алюминий)	0,0028301	0,017116
	ДиЖелеза триоксид (железа оксид), в пересчете на железо	0,0005950	0,003598
	Кальция оксид (негашеная известь)	0,0004389	0,002654
	Магния оксид	0,0002991	0,001809
	Пыль неорганическая	0,0120925	0,073134
Ссыпка в конус с конвейера № 6 (фракция 5–20 мм, гранит 15,0), сдувы при хранении. Длина 15 м, ширина ленты 0,65 м, скорость ленты 1,7 м/с, производительность 79,6 т/ч, влажность 20 %, количество переработанного материала 167 160 т/год, время работы 2100 ч/год	ДиАлюминия триоксид (в пересчете на алюминий)	0,0075451	0,040744
	ДиЖелеза триоксид (железа оксид), в пересчете на железо	0,0015862	0,008565
	Кальция оксид (негашеная известь)	0,0011701	0,006319
	Магния оксид	0,0007974	0,004306
	Пыль неорганическая	0,0322390	0,174093
Ссыпка в конус с конвейера № 13 (фракция 5–10 мм, гранит 15,0), сдувы при хранении. Длина 15 м, ширина ленты 0,65 м, скорость ленты 1,7 м/с (высота падения 12,5 м), производительность 47,7 т/ч, влажность 20 %, количество переработанного материала 100 170 т/год, время работы 2100 ч/год	ДиАлюминия триоксид (в пересчете на алюминий)	0,0056020	0,0363032
	ДиЖелеза триоксид (железа оксид), в пересчете на железо	0,0011777	0,0076322
	Кальция оксид (негашеная известь)	0,0008688	0,0056303
	Магния оксид	0,0005921	0,003870
	Пыль неорганическая	0,0239362	0,1551262

Категория опасности предприятия

Согласно методическому пособию по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (Библиотека «Интеграл». СПб, 2005), проведен расчет категории опасности предприятия. Предприятие относится к третьей категории опасности. Параметры для определения категории опасности предприятия приведены в табл. 4.

Вещественный состав гранитов: 20–30 % кварца, 10–30 % микроклина, 50–60 % плагиоклаза и 7–25 % биотита. Химический состав гранитов северной части Северного участка Шарташского месторождения представлен следующими показателями содержания (отчет ООО «Экобаланс», ООО ДСП. Екатеринбург, 2018):

SiO₂ – 68,60 % до 70,5 % (класс опасности 3);
 Al₂O₃ – 15,02 % до 17,41 % (класс опасности 2);
 Fe₂O₃ – 0,67 % (класс опасности 3);
 FeO – 1,99 % до 2,99 % (класс опасности 3);
 P₂O₅ – 0,29 %;
 SO₃ – 0,10 % до 0,16 %;
 MnO – 0,065 % до 0,087 %;
 CaO – 2,12 % до 2,7 % (класс опасности 0);
 MgO – 1,07 % до 1,84 % (класс опасности 3);
 CO₂ – 0,56 % до 1,76 %;
 H₂O – 0,08 % до 0,21 %;
 п.п.п. – 0,18 – 0,54.

Вывод: исходя из химического состава гранита, всю массу пыли можно нормировать как пыль неорганическую, содержащую двуокись кремния выше 70 % с кодом 2907, при этом отдельно следует учитывать следующие компоненты (табл. 5).

В табл. 6 представлено пылевыведение загрязняющих веществ при ссыпке щебня в складские конусы.

Заключение

Обобщая изложенный в данной работе материал, следует отметить, что добыча и переработка щебня являются важной народнохозяйственной задачей.

В общем объеме сооружаемых объектов промышленного и гражданского строительства доля нерудных строительных материалов занимает до 60 %, а автодорожном – до 90 %.

Добыча сырья для производства щебня повсеместно ведется открытым способом с применением буровзрывных работ, что обусловлено прочностными свойствами полезного ископаемого – крепкий известняк, доломиты, граниты, габбро, базальты и др.

Однако это производство сопряжено со значительными экологическими и антропогенными воздействиями на окружающую среду в зоне действия карьеров. Наряду со значительной механизацией, автоматизацией горных и перерабатывающих процессов остается еще много актуальных задач по совершенствованию технологии добычи и переработки горной массы, компьютеризации и роботизации производства, по борьбе с вредными факторами, пылеподавлению и рекультивации нарушенных земель.

В работе рассмотрен технологический процесс добычи и переработки щебня как источника загрязнения атмосферы на примере ООО ДСП Шарташский карьер. Так, при работе Шарташского карьера (г. Екатеринбург) за год в атмосферу выбрасывается почти 160 т неорганической пыли. Отмечено вредное воздействие пыли на организм человека. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что пылеподавление, в частности при ссыпке фракций щебня с конвейеров в конусы готовой продукции, хранении его на открытых площадках, является актуальной проблемой.

ЛИТЕРАТУРА

- Zou Ch. Analysis on Dust Control Technology in Open-pit Quarry // Journal of Energy and Natural Resources. 2021. Vol. 10. Issue 1. P. 28–32. <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20211001.13>
- Зеньков И. В., Кустикова Е. А., Ле Хунг Ч., Дмитриева М. Л., Юронен Ю. П., Черепанов Е. В., Герасимова Е. И., Кондрашов П. М., Мирнова Ж. В., Скорнякова С. Н. Результаты дистанционного мониторинга технологического потенциала и экологии открытых горных работ на месторождениях минерального сырья для производства щебня // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 1. С. 40–45. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-1-40-45>
- Чеботарев А. Г., Пфаф В. Ф., Гибадулина И. Ю. Состояние условий труда, профессиональной заболеваемости и совершенствование медико-профилактического обеспечения работников горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. 2021. № 3. С. 139–143. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-3-139-143.4>
- Тяботов И. А., Дылдин Г. П., Дылдин А. Г. Экологические проблемы при добыче и переработке кварца // Уральская горная школа – регионам: сборник докл. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2017. С. 669–670.
- Kung H. C., Lin W. C., Huang B. W., Mutuku J. K., Chang-Chien G. P. Techniques for Suppressing Mineral Dust Aerosol from Raw Material Stockpiles and Open Pit Mines: Review // Aerosol and Air Quality Research. 2023. Vol. 24. Issue 2. P. 1–18. Article number 230166. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230166>
- Кузнецов В. С. Оценка пылевого загрязнения при ведении открытых горных работ на основе экологического риска: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: СПбГГИ(ТУ), 2006. 21 с.
- Костюничев Д. Н. Обоснование параметров портовых открытых складов для сыпучих грузов с учетом их потерь от пылеуноса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новгород: ВГАВТ, 2008. 21 с.
- Сикарев С. Н. Повышение сохранности сыпучих грузов путем снижения потерь от пылеуноса при загрузке (разгрузке) судов в портах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новгород: ВГАВТ, 2008. 21 с.
- Отделкин Н. С. Теоретические основы оценки потерь сыпучих грузов и защиты окружающей среды от пылеобразования при перегрузке и хранении в портах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новгород: ВГАВТ, 2009. 36 с.
- Дылдин А. Г., Безбородова С. А. The state of vegetation in the organization of sanitary protection zone of the Shartash quarry // Уральская горная школа – регионам: материалы междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2022. С. 581–582. <https://elibrary.ru/qkfkfp>
- Муратова К. М. Исследование и разработка технических средств для очистки газопылевых мелкодисперсных выбросов предприятий горно-перерабатывающих комплексов: дис. ... канд. техн. наук. Тула: ТулГУ, 2020. 196 с.
- Шаров Н. А., Дудаев Р. Р., Кришук Д. И., Лискова М. Ю. Методы пылеподавления на угольных разрезах Крайнего Севера // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2019. Т. 19. № 2. С. 184–200. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.2.8>
- Каменский А. А. Снижение пылевыведения от динамических источников на карьерах строительных материалов аэропенным способом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: СПбГГУ, 2011. 19 с.

14. Голик В. И., Дзапаров В. Х., Лискова М. Ю., Масленников С. А. Минимизация риска загрязнения селитебных зон пылью при открытой добыче руд // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 1. С. 56–60. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-1-56-60>
15. Zhao Xi., Zhao Xu., Han F., Song Z., Wang D., Fan J., Jia Zh., Jiang G. A research on dust suppression mechanism and application technology in mining and loading process of burnt rock open pit coal mines // Journal of the Air & Waste Management Association. 2021. Vol. 71. Issue 12. P. 1568–1584. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1979123>
16. Зырянова О. В., Киреева Е. В., Абрамова А. Е. Разработка пылеподавительных составов для обеспечения экологической безопасности при ведении горных работ открытым способом // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 10. С. 22–28. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-22-28>
17. Potgieter S. A. J., Labuschagne du Plessis J. J. Dust Suppression on Open Pit Drill Rigs – Case Study from Skorpion Zinc Mine // Journal of Earth Science and Engineering. 2015. Vol. 5. P. 512–519. <https://doi.org/10.17265/2159-581X/2015.08.006>
18. Амосов П. В., Бакланов А. А. Разработка модели азротермодинамики атмосферы для исследования процессов пыления на хвостохранилищах с использованием программы COMSOL // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26. № 1. С. 25–44. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44>
19. Амосов П. В., Бакланов А. А. Численное моделирование процессов естественного проветривания карьера при вариации его глубины в условиях инверсионного состояния атмосферы // Горная промышленность. 2023. № 5S. С. 65–71. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-65-71>
20. Прудникова Е. Ю., Грубина П. Г., Савин И. Ю., Рогова О. Б., Горлов А. А., Чинилин А. А. Пространственное моделирование пыления отвала фосфогипса на примере Балаковского филиала АО «Апатит» // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 1. С. 60–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-1-60-65>

Статья поступила в редакцию 08 апреля 2024 года

Analysis of the technology and equipment of the mining and processing of crushed stone as a source of atmospheric pollution

German Petrovich DYLDIN^{1*}

Nikolay Petrovich KOSAREV^{1**}

Vyacheslav Vladimirovich MARTYNOV²

Aleksandr Germanovich DYLDIN^{1***}

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²LLC DSP Shartashsky quarry, Ekaterinburg, Russia

Abstract

The purpose of the work. The vast majority of non-metallic raw materials used are extracted in an open-pit manner. Technological processes of open-pit mining are accompanied by the formation of a significant amount of dust and gas emissions containing harmful components and polluting the atmosphere of quarries and adjacent territories. The purpose of this work is to analyze these impacts, including one of the most significant of them – industrial dust.

The methodology of the work. In the work, data from modern sources of information related to the research topic, as well as materials from DSP LLC Shartashsky quarry, were used for analysis and systematization.

The results of the work and the scope of their application. Summarizing the material presented in this work, it should be noted that during the production of open-pit mining, significant pollution of the surrounding atmosphere occurs with harmful emissions. Thus, during the operation of DSP LLC Shartashsky quarry, 8 pollutants were released into the atmosphere, of which 3 substances have a summative effect (3 summations), and inorganic dust makes the greatest contribution to atmospheric pollution. During the operation of the quarry, almost 160 tons of inorganic dust were released into the atmosphere per year. When processing crushed stone, there are a number of unorganized sources of atmospheric pollution with inorganic dust, dust suppression on which, according to the authors, has not been completely solved and is a direction for further research and development.

Conclusions. The amount of non-metallic building materials extracted by open-pit mining is growing by almost 10% from year to year. The open-pit mining method has the most negative impact on the environmental situation in the mining area. As a result of anthropogenic impact on the environment in the area of operation of the quarries, there is a noticeable deterioration in the environmental conditions of the environment and humans. Currently used methods and means of dust suppression have a limited range of applications, are, as a rule, local in nature, are mostly based on hydro-dust suppression and are applicable only at plus ambient temperatures. Therefore, the analysis of the technology of processing non-metallic building materials as a source of atmospheric pollution and the development of all-season means of dust suppression is an urgent task.

Keywords: open-pit mining, processing of crushed stone, harmful substances, atmospheric pollution, inorganic dust,


REFERENCES

1. Zou Ch. 2021, Analysis on Dust Control Technology in Open-pit Quarry. *Journal of Energy and Natural Resources*, vol. 10, issue 1, pp. 28–32. <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20211001.13>
2. Zen'kov I. V., Kustikova E. A., Le Hung Ch., Dmitrieva M. L., Yuronen Yu. P., Cherepanov E. V., Gerasimova E. I., Kondrashov P. M., Mironova Zh. V., Skornyakova S. N. 2024, Results of remote monitoring of the technological potential and ecology of open-pit mining in mineral deposits for the production of crushed stone. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], vol. 28, no. 1, pp. 40–45. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-1-40-45>
3. Chebotarev A. G., Pfaf V. F., Gibadulina I. Yu. 2021, The state of working conditions, occupational morbidity and improvement of medical and preventive care for employees of mining enterprises. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 3, pp. 139–143. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-3-139-143.4>
4. Tyabotov I. A., Dyldin G. P., Dyldin A. G. 2017, Environmental problems in the extraction and processing of quartz. Ural Mining School for regions: collection of reports of the International scientific and practical conference. Ekaterinburg, pp. 669–670.
5. Kung H. C., Lin W. C., Huang B. W., Mutuku J. K., Chang-Chien G. P. 2023, Techniques for Suppressing Mineral Dust Aerosol from Raw Material Stockpiles and Open Pit Mines: Review. *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 24, issue 2, pp. 1–18, article number 230166. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230166>
6. Kuznetsov V. S. 2006, Assessment of dust pollution in open-pit mining operations based on environmental risk: PhD thesis. Saint Petersburg, 21 p.
7. Kostyunichev D. N. 2008, Justification of the parameters of port open warehouses for bulk cargoes, taking into account their loss from dust removal: PhD thesis. Nizhny Novgorod, 21 p.

✉ german.dyldin@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-7106-4816>

**ur.intelnedra@mail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-0128-5859>

***alexandre.dyldin@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7788-0251>

8. Sikarev S. N. 2008, Improving the safety of bulk cargoes by reducing losses from dust removal during loading (unloading) of ships in ports: PhD thesis. Nizhny Novgorod, 21 p.
9. Otdelkin N. S. 2009, Theoretical foundations for assessing bulk cargo losses and environmental protection from dust pollution during transshipment and storage in ports: PhD thesis. Nizhny Novgorod 36 p.
10. Dylidin A. G., Bezborodova S. A. 2022, The state of vegetation in the organization of sanitary protection zone of the Shartash quarry. Ural Mining School – regions: Materials of the International scientific and practical conference. Ekaterinburg, pp. 581–582.
11. Muratova K. M. 2020, Research and development of technical means for cleaning gas-dust fine emissions from mining and processing complexes: PhD thesis. Tula, 196 p.
12. Sharov N. A., Dudaev R. R., Krischuk D. I., Liskova M. Yu. 2019, Methods of dust suppression in coal mines of the Far North. *Bulletin of PNR-PU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, vol. 19, no. 2, pp. 184–200. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2019.2.8>
13. Kamensky A. A. 2011, Reduction of dust emission from dynamic sources in quarries of construction materials by aeropathic method: PhD thesis. Saint Petersburg, 19 p.
14. Golik V. I., Dzaparov V. Kh., Liskova M. Yu., Maslennikov S. A. 2024, Minimizing the risk of contamination of residential areas with dust during open-pit mining. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], no. 1, pp. 56–60. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-1-56-60>
15. Zhao Xi., Zhao Xu., Han F., Song Z., Wang D., Fan J., Jia Zh., Jiang G. 2021, A research on dust suppression mechanism and application technology in mining and loading process of burnt rock open pit coal mines. *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 71, issue 12, pp. 1568–1584. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1979123>
16. Zyryanova O. V., Kireeva E. V., Abramova A. E. 2022, Development of dust suppression compounds to ensure environmental safety during open-pit mining. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], vol. 26, no. 10, pp. 22–28. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-22-28>
17. Potgieter S. A. J., Labuschagne du Plessis J. J. 2015, Dust Suppression on Open Pit Drill Rigs – Case Study from Skorpion Zinc Mine. *Journal of Earth Science and Engineering*, vol. 5, pp. 512–519. <https://doi.org/10.17265/2159-581X/2015.08.006>
18. Amosov P. V., Baklanov A. A. 2023, Development of a model of atmospheric aerothermodynamics for the study of dusting processes at tailings dumps using the COMSOL program. *Bulletin of the Moscow State Technical University*, vol. 26, no. 1. pp. 25–44. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44>
19. Amosov P. V., Baklanov A. A. 2023, Numerical modeling of the processes of natural ventilation of a quarry with variations in its depth in the conditions of the inversion state of the atmosphere. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], no. 5S, pp. 65–71. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-65-71>
20. Prudnikova E. Yu., Grubina P. G., Savin I. Yu., Rogova O. B., Gorlov A. A., Chinilin A. A. 2022, Spatial modeling of phosphogypsum dump dusting on the example of the Balakovo Branch of JSC Apatit. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], vol. 26, no. 1, pp. 60–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-1-60-65>

The article was received on April 08, 2024