На правах рукописи

АЛЕКСАНДРОВА Ангелина Юрьевна

ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ, СОЗДАВАЕМЫМИ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ КАМЕННОЙ ПЫЛИ

Специальность 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена
в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: **Тимофеева Светлана Семеновна,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», (г. Иркутск)

Официальные оппоненты: **Корчагина Татьяна Викторовна,**
доктор технических наук, ООО «Сибирский Институт Горного Дела» (г. Кемерово)

Тунакова Юлия Алексеевна,
доктор химических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательских технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», (г. Казань)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (г. Владивосток)

Защита диссертации состоится «13» марта 2025 года в 13-00 часов на заседании диссертационного совета ФГБОУ ВО ИРНИТУ 24.2.307.02 по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ИРНИТУ и на официальном сайте университета **http://www.istu.edu/static/dis/79371**.

Автореферат разослан «20» января 2025 года.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНИТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.02 Сарапуловой Г.И.

Ученый секретарь
диссертационного совета Сарапулова Г.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Горнопромышленный комплекс является базовым элементом народного хозяйства, на его долю приходится 66 % валового общественного продукта. Значение этой отрасли для российской экономики существенно возросло, так как стабильный рост экспорта минералов обеспечивает формирование валютных резервов и устойчивое развитие страны. Однако добыча и переработка полезных ископаемых сопровождается значительными геоэкологическими рисками для окружающей среды. Наблюдается устойчивая тенденция роста объемов добычи и, соответственно, увеличения аэродинамического, гидрологического, геомеханического и биоморфологического воздействия на окружающую среду. В связи с этим возрастает актуальность геоэкологических исследований, которые позволяют решать важнейшие задачи регулирования качества состояния окружающей среды, минимизации негативных воздействий и сохранения геоэкологической безопасности.

Кроме геоэкологических рисков, возникающих в процессе добычи и обработки полезных ископаемых, следует уделять особое внимание специфическим геоэкологическим рискам, обусловленным составом и состоянием извлекаемых полезных ископаемых. В контексте нашего исследования специфический геоэкологический риск связан с антропогенным фактором – образующейся пылью. Если типичный геоэкологический риск – это вероятность развития опасных для окружающей среды и населения явлений вследствие выбросов пыли в атмосферу, то причиной проявления специфического геоэкологического риска выступают состав и форма частиц пыли как факторы специфического влияния на окружающую среду.

В исследованиях, посвященных вопросам развития горнопромышленного комплекса и воздействия, оказываемого его предприятиями и продуктами производства на окружающую среду, как правило, экологическим последствиям добычи и обработки облицовочных и поделочных камней и, в особенности, причинам их возникновения уделяется мало внимания. В то время как объем добычи облицовочных и поделочных камней в общем объеме добываемых полезных ископаемых составляет 13 %, а значит, и воздействие на окружающую среду этого вида производства достаточно велико.

Изучение специфических особенностей пыли, образующейся при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней, обусловленных дисперсным, химическим составом, формой пылевых частиц, распределением основных компонентов (в том числе тяжелых металлов) в составе, должно лечь в основу подхода, научно обосновывающего важность реализации превентивных мер, направленных на снижение уровня негативного воздействия на окружающую среду до оптимального (не выше 25 мкг на кубический метр воздуха по данным Всемирной организации здравоохранения для частиц, входящих в диапазон размерности менее 2,5 мкм). Актуальность настоящей работы определяется необходимостью углубленного изучения пыли, позволяющего корректно учитывать химический, дисперсный и фракционный состав производственной пыли, адекватно оценивать ее воздействие на окружающую среду, обеспечивать

эффективное управление через систему геоэкологического нормирования на горнодобывающих предприятий на примере добычи и обработки облицовочных и поделочных камней.

Область исследований соответствует паспорту научной специальности 1.6.21 «Геоэкология» по п. 14. «Научные основы организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля состояния окружающей среды» и п. 24. «Теория и методы геоэкологической оценки существующих и создаваемых технологий добычи и переработки полезных ископаемых природного и техногенного происхождения, инженерная защита экосистем, прогнозирование, предупреждение и ликвидация загрязнений природной среды».

Степень научной разработанности. Накоплен значительный опыт исследований геоэкологических рисков, возникающих при добыче и обработке нерудных полезных ископаемых, в том числе облицовочных и поделочных камней, и разработки теории и практических методов подавления пыли на горнодобывающем производстве. Значительный вклад в решение рассматриваемой проблемы внесли как отечественные, так и зарубежные ученые: Н. А. Фукс, В. В. Сорокин, О. Д. Нейков, И. Н. Логачев, В. Н. Азаров, Ю. С. Юсорин, В. С. Горшков, Р. В. Кайгородов, О. И. Чернов, М. З. Вильямс, М. Рейнхард, Cioca I.L., Markowshi A.S. и др. Развитию положений теории пылеметрии и разработке методики инструментального исследования пылесодержания посвятили свои труды И. Г. Ищук, Б. Ф. Кирин, В. А. Коузов, Г. А. Поздняков, И. В. Петрянов и др.

Научной разработкой проблемы геоэкологических рисков также занимаются ученые других отраслей науки, в частности медицины. Так, врачи-профпатологи и ряд ученых-медиков настаивают на необходимости дифференцировать воздействие наноразмерных частиц от воздействия частиц других размеров на фоне общей картины легочной патологии (Л. А. Шпагина, Н. Н. Малютина, А. В. Хлынова, Н. А. Рослая, С. В. Гребеньков и др.). Однако вопросы оценки рисков, обусловленных действием микро- и наноразмерных частиц пыли, образующихся при технологических процессах добычи, обработки и использования каменных материалов, а также контроля за их содержанием в пылевых фракциях остаются недостаточно раскрытыми.

Однако, научные подходы по оценке воздействия наноразмерных фракций пыли в зависимости от их специфических свойств малочисленны и фрагментарны. В связи с эти, очевидна необходимость исследования и разработки методов оценки воздействия на окружающую среду наноразмерной пыли, образующейся при добыче и обработке каменных материалов, и технологий контроля специфических геоэкологических рисков.

Объектом настоящего исследования выступает производственная каменная пыль, образующаяся при добыче и обработке гранитов, мигматитов мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита и чароита.

Предмет исследования составляют влияние пылевых выбросов на геоэкологическую обстановку предприятий по добыче и обработке облицовочных

и поделочных камней на юге Восточной Сибири и рекомендации по снижению негативного влияния каменной пыли на окружающую среду.

Идея работы. Результаты изучения специфических особенностей каменной пыли, образующейся при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней, позволяют разработать методы анализа с учётом их свойств, способствующие повышению надежности оценки уровня загрязнения компонентов окружающей среды, на основе которых возможно создание эффективных технологий контроля и управления процессом снижения пылевой нагрузки и минимизации геоэкологических рисков.

Целью диссертационной работы является разработка оценки геоэкологических рисков с учетом дисперсности, фракционного и химического состава, форм частиц производственной каменной пыли и управления ими путем организации эффективного экологического контроля процесса добычи и обработки облицовочных и поделочных камней.

Для достижения поставленной цели предполагается выполнение следующих **задач**:

1. Изучение дисперсного и химического состава каменной пыли, образующейся при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней.
2. Установление корреляции между размером частиц каменной пыли и степенью её воздействия на окружающую среду на основе данных экологических исследований.
3. Разработка специфических методов экологического контроля качества объектов окружающей среды на основе систематического анализа содержания каменной пыли и ее компонентов на территории горнодобывающих и обрабатывающих предприятий.
4. Разработка природоохранных мероприятий и рекомендаций, основанных на результатах комплексных исследований и проведенного экологического контроля, по снижению техногенного воздействия каменной пыли на окружающую среду.

Результаты, полученные в ходе настоящего исследования, могут быть использованы для проектирования и реализации мероприятий, направленных на улучшение экологического состояния регионов, где ведется добыча и обработка облицовочных и поделочных камней, а также в разработке более эффективных и экологически безопасных технологий, применяемых в этой отрасли.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Установлено, что в среднем доля наноразмерных фракций в производственной пыли, образующейся в процессе добычи и обработки облицовочных и поделочных камней колеблется в диапазоне от 1,6 до 2,1 % от общей образующейся массы частиц в зависимости от природы материала и способа его обработки.

2. Выявлены аналитические зависимости между уровнем загрязнения пыли, обязующейся при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней, тяжелыми металлами и её фракционным составом. Содержание тяжелых металлов в частицах наноразмеров выше в 1,1-3,2 раза, чем в частицах микроразмеров. Установлен геохимический ряд распределения тяжелых металлов в

пыли гранитов, мигматитов Ангасольского месторождения Слюдянского района Иркутской области.

3. Разработан алгоритм и математическая модель учета содержания наночастиц пыли с применением метода нечеткой логики для создания автоматизированной системы контроля атмосферного воздуха и прогнозирования геоэкологических рисков.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в формировании новых знаний о дисперсном и компонентном составе промышленной пыли, образующейся при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней и в доказательстве необходимости учета наноразмерной пыли в организации экологического мониторинга и нормирования выбросов, а также создания автоматизированной системы контроля содержания пыли в воздухе рабочей зоны.

Материалы диссертационной работы реализованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» в преподавании дисциплин «Промышленная экология», «Промышленная санитария и гигиена труда» для направления подготовки «Техносферная безопасность» (Приложение В).

Практическая ценность диссертации состоит в том, что полученные в работе результаты позволяют использовать предложенный алгоритм для минимизации специфических геоэкологических рисков для окружающей среды в процессе недропользования. Материалы исследований реализованы в проектах проведения геологоразведочных работ недропользователей Министерства природных ресурсов и экологии Иркутской области и предприятия ООО «ИНК-СтройНефтеГаз», одним из видов деятельности которого является добыча каменного материала (Приложение Г и Д соответственно).

Методология и методы исследования. В целях настоящего исследования были использованы как теоретические методы исследования, так и эмпирические. Так, в частности, в работе нашли применение методы системного анализа, моделирования, разработки алгоритмов и систем, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику пылевой обстановки в условиях добычи каменного сырья. В основе использования метода междисциплинарного исследования в контексте настоящей работы лежат научные теории в области экологии, геоэкологии и распространения выбросов пыли. Методическая основа диссертации включает анализ работ отечественных и зарубежных авторов, а также нормативно-технической документации в области охраны окружающей среды от пылевого загрязнения, а также собственные экспериментальные исследования.

В основу работы положены следующие методы: отбор проб пыли гравиметрическим (весовым), седиментационным, воздушным (аспирационным) и комбинированным способами; изучение собранной пыли методом мембранной фильтрации для фракционирования и выделения частиц микро- и наноразмеров, методом электронной микроскопии – для получения наглядного изображения размеров и формы исследуемых частиц пыли, методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой – для определения химического состава ис-

следуемых частиц, а также рентгеноструктурный анализ для определения кристаллической структуры частиц пыли. Экспериментальные данные получены в полевых условиях на месторождениях гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита и чароита.

Научные Положения, выносимые на защиту:

1. Доля частиц размером менее 50 нм, выделенных методом многоступенчатой мембранной фильтрации для гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита, составляет от 1,6 до 2,1 % от общей пылевой нагрузки, образующейся в процессах добычи и обработки облицовочных и поделочных камней.
2. Установлен геохимический ряд распределения тяжелых металлов в пыли гранитов, мигматитов на территории Ангасольского месторождения Слюдянского района Иркутской области, обусловленный её фракционным составом в следующем порядке: Ni > Co > Zn > Cu > Cr > Pb > Sn > Tl.
3. Разработан новый подход к прогнозированию геоэкологических рисков, основанный на математической модели с применением метода нечеткой логики, учитывающей содержание наночастиц пыли.

Степень достоверности исследования подтверждена высокой сходимостью результатов экспериментальных исследований с результатами натурных наблюдений (в пределах 85–95 %), а также результатами, полученными путем актуальной статистической обработки экспериментальных данных, проверки данных экспериментов с эталонными образцами.

Апробация результатов работы. Результаты исследования и основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены научной общественностью на всероссийских и международных научно-практических конференциях: Международной научно-практической конференции «Achievements in science – 2021» (г. Кемерово, 2021), Международном конкурсе научно-исследовательских работ «Scientific ideas – 2021» (г. Ростов-на-Дону, 2021), Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием «Безопасность-2021» (г. Иркутск, 2017, 2018, 2019, 2021), VI Всероссийской научно-практической конференции «Молодые ученые России» (г. Пенза, 2021), Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon» (г. Владивосток, 2020, 2021), III Международной конференции «Агробизнес, экологический инжиниринг и биотехнологии» – «AGRITECH-III – 2020» (г. Красноярск, 2020, 2021), Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», (г. Томск, 2017, 2018, 2019), Всероссийской научно-практической конференции магистрантов, аспирантов, молодых ученых «Техносферная безопасность в XXI веке» (г. Иркутск, 2017, 2018, 2019), III Международной научно-практической конференции молодых ученых по проблемам техносферной безопасности (г. Москва, 2018), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России» (г. Якутск, 2018).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-35-90096 «Исследование наночастиц пыли и их роли в формировании профессиональных заболеваний работников горнодобывающего комплекса (на примере горнодобывающих предприятий Иркутской области РФ)».

Личный вклад автора заключается в разработке и постановке задач, участии в планировании исследований, проведении опробования и экспериментальных работ, отборе проб и проведении анализов, обработке материалов и подготовке публикаций. Результаты, представленные в работе, получены лично автором и при его непосредственном участии.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 14 работ, в том числе в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых журналов ВАК – 3, в Scopus – 3, прочих изданиях – 8.

Благодарности. Автор выражает благодарность за помощь и поддержку кандидату геолого-минералогических наук, старшему научному сотруднику ИЗК СО РАН Л. А. Ивановой, кандидату геолого-минералогических наук, научному сотруднику ИГХ СО РАН Е. В. Иванову. За методическую помощь и критические замечания автор благодарит доктора химических наук, профессора Л. И. Белых, доктора технических наук, профессора Е. В. Зелинскую, доктора химических наук, профессора Сарапулову Г.И., доктора технических наук, профессора Тимофееву С.С.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения и библиографического списка из 132 наименований. Работа изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 23 таблицы, 37 рисунков, 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены методы исследования, а также практическая ценность и изложены главные результаты, выносимые на защиту.

Глава 1. Современное состояние и проблемы обеспечения геоэкологической безопасности при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней

Первая глава (обзор литературы) посвящена геоэкологическому воздействию горных предприятий на окружающую среду и характеристике видов воздействия. Одним из направлений изучения воздействия горнодобывающих предприятий, связанных с добычей и обработкой облицовочных и поделочных камней, является загрязнение экосистем производственной каменной пылью. Производственная каменная пыль горных карьеров – это тонкий полидисперсный компонент твердых отходов, образующихся при дроблении каменной по-

роды. Она является одной из наиболее значимых и часто встречающихся неблагоприятных факторов, влияющих на окружающую среду.

Анализируя научную и техническую информацию по воздействию горнодобывающего производства на окружающую среду и человека, сделан вывод, что в этой области проведены многочисленные исследования по вопросам негативного влияния данной отрасли на экологические составляющие, много работ посвящено мерам по снижению негативной нагрузки на окружающую среду и человека, существуют работы по изучению влияния производственной пыли на организм человека в районах открытых горных работ. Однако, проведенный литературный обзор позволил сделать вывод, что глубокие исследования влияния производственной каменной пыли, образовавшейся при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней, на экосистемы окружающей среды исследовано недостаточно. Особенно это касается изучения каменной пыли с точки зрения присутствия в ней частиц наноразмеров. На основании анализа литературных данных, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, где основной акцент делается на углубленном изучении микро- и наночастиц производственной каменной пыли, образующейся при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней, оказывающих воздействие на окружающую среду.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Вторая глава рассматривает объекты и методы исследования, их основные характеристики. Для исследования выбраны 5 месторождений – Месторождение гранитов и мигматитов Ангасольское, месторождение мраморизованного известняка «Перевал», месторождение офиокальцита Алзагайское (Иркутская область, Россия), месторождение чароита «Сиреневый камень», участок «Старый» (республика Саха Якутия, Россия), месторождение нефрита Оспинское (республика Бурятия, Россия). На данных месторождениях добываются облицовочные и поделочные полезные ископаемые широко применимые в строительстве, архитектуре, декоративном искусстве, производстве ювелирных изделий и других отраслях промышленности. Вторая глава содержит в себе сведения о методах и инструментах исследования, применимых в диссертационной работе. Проведение исследований в соответствии с выбранными объектами и методами исследования позволяют решить поставленные задачи диссертационной работы.

Глава 3. Исследование пыли, образующейся при добыче облицовочных и поделочных камней

В третьей главе изучены образцы пыли гранитов, мигматитов, мраморизованного известняка, нефритов и серпентинитов, чароитов, офиокальцитов, отобранных на объектах исследования. Образцы пыли отобраны в 2019-2023 годах во время ведения активной добычи на карьерах в местах экскавации породы, ее пересыпки, транспортировки и переработки, на рабочих местах горняков и в местах отсевов и складирования неликвидного сырья. Анализ фракционного состава образующихся пылевых частиц методом мембранной фильтра-

ции, показал, что до 10 % пылевидных частиц имеют размер менее 0,13 мм (таблица 1).

Таблица 1 – Процентное содержание частиц в пробах каменной пыли, исследуемых методом мембранной фильтрации (фракционирования)

Производственная пыль породы	**Размер частиц *d*, мкм**			
	< 0,05	**> 0,05–0,45**	**> 0,45–2,50**	**> 2,5–10**
	Содержание частиц, %			
Мигматит	2,1	38,7	14,2	45,0
Гранит	1,9	39,5	14,8	43,8
Мраморизованный известняк	1,8	38,0	15,8	44,2
Офиокальцит	2,0	38,1	16,8	43,1
Нефрит	1,6	37,7	15,4	43,1
Серпентинит	1.9	38,1	16,1	45,3
Чароит	2,1	39,2	14,8	43,9

Результаты таблицы 1 показывают процентное соотношение различных размерных фракций частиц в образце производственной пыли. Частицы с размерами от >2,5 до 10 мкм составляют примерно от 43,1 % до 45,3 % от общей массы частиц. Частицы с размерами от >0,45 до 2,5 мкм занимают 14,2 % - 16,8 %, а частицы с размерами от >0,05 до 0,45 мкм составляют от 37,7 % до 39,5 %. Содержание наночастиц с размерами менее 0,05 мкм (<50 нм) колеблется в диапазоне от 1,6 до 2,1 % от общей массы производственной пыли.

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой были исследованы пробы для каждой породы и каждого месторождения на содержание тяжелых металлов. Исследование проводили отдельно для микрочастиц и наночастиц. Данные свидетельствуют о содержании в разных количествах тяжелых металлов в образцах каменной производственной пыли облицовочных и поделочных камней. Установлено, что во фракциях микрочастиц содержание тяжелых металлов колеблется в широком диапазоне от 1903 до 0,02 ppm г/т, а в нано фракции от 1581 до 0,02 ppm г/т. Наибольшую опасность для компонентов окружающей среды представляют тяжелые металлы, характеризующиеся высокой токсичностью, это прежде всего хром (Cr), кобальт (Co), никель (Ni), медь (Cu), цинк (Zn), олово (Sn), таллий (Tl) и свинец (Pb) (таблица 2).

Таблица 2 – Содержание тяжелых металлов в образцах каменной производственной пыли исследуемых образцов, Концентрация, ppm (г/т) (для микрочастиц (2.5 мкм) /наночастиц (50 нм))

Элемент	Предел обнаружения (ПО)	Пыль гранита	Пыль мигматита	Пыль офиокальцита	Пыль мраморизованного известняка	Пыль нефрита	Пыль чароита	Пыль серпентинита
Cr	*1,36*	65,1/ 202	79,3/ 230	2,4/ 4,40	0,92/ 1,95	1903/ 5331	1,88/ 2,26	4,1/ 5,2
Co	*0,20*	17,7/5 5	24,5/ 59	0,56/ 1,58	0,55/ 0,99	41,6/ 75	1,31/ 2,37	2,74/ 3,57
Ni	*0,91*	72,6/ 109	20,6/ 124	19,1/ 46	1,07/ 2,47	479,1/ 1581	1,2/ 2,28	1,93/ 3,49
Cu	*0,75*	40,85/ 94	39,1/ 121	4,43/ 10,2	1,29/ 2,84	26,1/ 47	4,54/ 15	6,05/ 10,9
Zn	*1,23*	36,6/ 80	56,1/ 101	1,99/ 4,59	1,55/ 2,93	99,6/ 319	10,1/ 52	2,45/ 5,9
Sn	*0,18*	0,73/ 1,55	0,51/ 1,84	0,04/ 0,11	0,009/ 0,020	0,21/ 0,24	3,6/ 6,6	0,14/ 0,17
Tl	*0,057*	0,075/ 0,090	0,065/ 0,13	< ПО	0,0021/ 0,0068	0,017/ 0,041	0,68/ 1,24	< ПО
Pb	*0,25*	2,2/ 6,9	4,14/ 8,7	0,405/ 0,97	0,376/ 0,45	3,35/ 4,02	64/ 84	0,89/ 1,00

Экспериментально выявлена корреляция между содержанием ряда наиболее токсичных тяжелых металлов и фракционным составом пыли. Установлено, что чем меньше фракция производственной пыли исследуемых образцов, тем выше в них содержание тяжелых металлов (для частиц размерами, входящими в диапазон от 2,5 мкм до 10 нм с прогнозом до 1 нм). В качестве примера на рисунке 1 приведена зависимость содержания хрома в нано фракции пыли исследуемых пород.

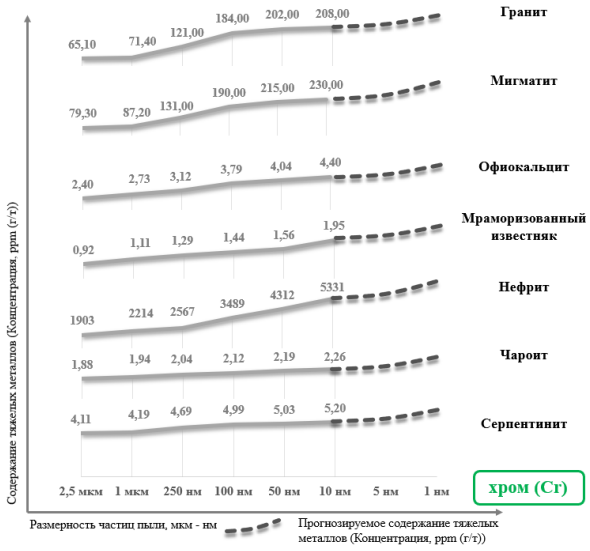

Рисунок 1 – Концентрации тяжелого металла хрома (Cr) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

Согласно полученным результатам, образцы пыли нефрита, гранита и мигматита являются наиболее загрязнёнными, например, концентрация хрома в нефритовой пыли превышает фоновое значение в 3 тысячи раз, в то время как в пыли офиокальцита концентрация хрома составляет всего 4,4 г/т. Аналогичные зависимости выявлены по другим металлам: кобальту, никелю, меди, свинцу. Эти данные позволяют предположить, что в процессе дезинтеграции образуются высокореакционные частицы, избирательно накапливающие тяжелые металлы, и они являются ранее неисследованными потенциальными источниками загрязнения почв тяжелыми металлами.

Оценка загрязнения образцов каменной производственной пыли гранита, мигматита и офиокальцита тяжелыми металлами доказана на основе индекса геоаккумуляции ($I_{гео}$). В качестве фоновых значений концентраций тяжёлых металлов были приняты концентрации в почвах Слюдянской рекреационной зоны. Рассчитанные индексы геоаккумуляции представлены на рисунке 2.

Согласно полученных данных, иллюстрируемых графиком на рисунке 2 и таблицей 2, образцы исследуемой каменной пыли в наибольшей степени загрязнены никелем, кобальтом, медью и цинком. В умеренной степени присутствует загрязнение оловом, который также аккумулируется в данном типе пыли и в исключительных случаях наблюдается загрязнение исследуемых образцов отдельными тяжелыми металлами. Так, чароитовая пыль загрязнена свинцом, гранитная и мигматитная пыль загрязнена кобальтом. Наименее загрязненной пылью является мраморная пыль и офиокальцитовая.

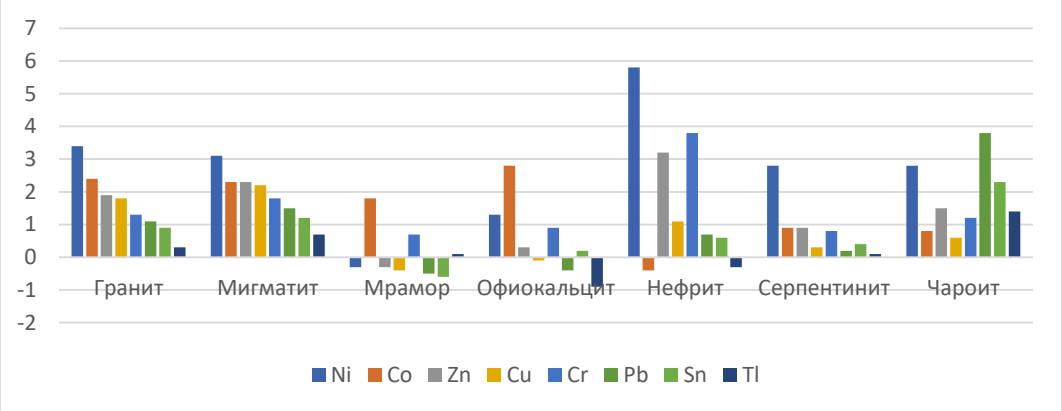

Рисунок 2 – Индексы геоаккумуляции элементов в каменной производственной пыли исследуемых пород относительно их фоновых концентраций в почвах Слюдянской рекреационной зоны

Геохимический ряд по индексу геоаккумуляции или коэффициенту контрастности для гранита распределяется следующим образом: Ni (11,2) > Co (8,1) > Zn (6,3) > Cu (5,9) > Cr (4,3) > Pb (3,8) > Sn (3) > Tl (1).

Для мигматита: Ni (10,2) > Co (7,7) > Zn (7,6) > Cu (7,3) > Cr (5,9) > Pb (5,1) > Sn (4) > Tl (2,6). По индексу геоаккумуляции для пыли гранита и мигматита Ангасольского месторождения Слюдянского района Иркутской области установлен следующий геохимический ряд распределения тяжелых металлов на

промышленной территории Ангасольского месторождения: Ni > Co > Zn > Cu > Cr >Pb > Sn > Tl.

При изучении гранулометрического состава фракций исследуемых горных пород, который представлен на рисунке 3, подтверждён экологический риск, связанный с дисперсностью пыли. Размеры частиц пыли исследуемых пород составляют от 50 до 300 нм.

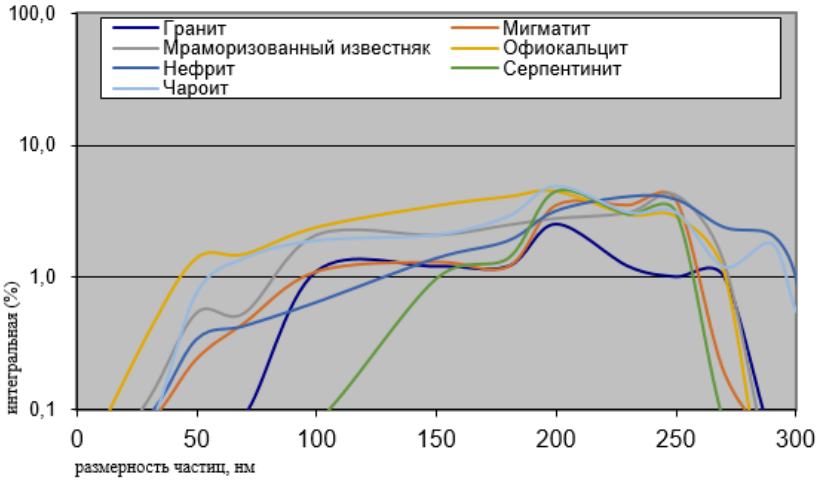

Рисунок 3 – Гранулометрический состав фракций частиц каменной пыли

В частицах каменной пыли гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита содержатся частицы размером, входящим в диапазон наноразмеров. Они обладают транслокационной способностью и тем самым представляют геоэкологический риск для компонентов окружающей среды.

Установлено, что частицы каменной пыли исследуемых пород обладают определенной морфологией, формой и структурой частиц, которые определяют характер воздействия на живые организмы и экосистемы окружающей среды. На рисунке 4 на примере гранита и чароита отображены форма и размер частиц.

Микроскопическое исследование пыли гранита показало, (рисунок 4, слева), что в ней присутствуют как микрочастицы, так и частицы наноразмеров. На частицы размером от 1 до 10 нм приходится около 70 % образца пыли, остальные 30 % являются микрочастицами. Изображенные на микрофотографии частицы по форме представляют собой прямоугольно-ориентированные тонкие пластинки и микроскопические и наноскопические кристаллы. На фотографии выделены частицы наноразмеров и микроразмеров для сравнения.

На микрофотографии частиц пыли чароита (рисунок 4 справа) наблюдаются игольчатые тонкие вытянутые по структуре пластинки с острыми краями. На частицы размером от 1 до 10 нм приходится около 60 % образца пыли, остальные 40 % представлены микрочастицами. На фотографии выделены частицы наноразмеров и микроразмеров для сравнения, а также отдельно обозначены игольчатые частицы с указанием их размеров.

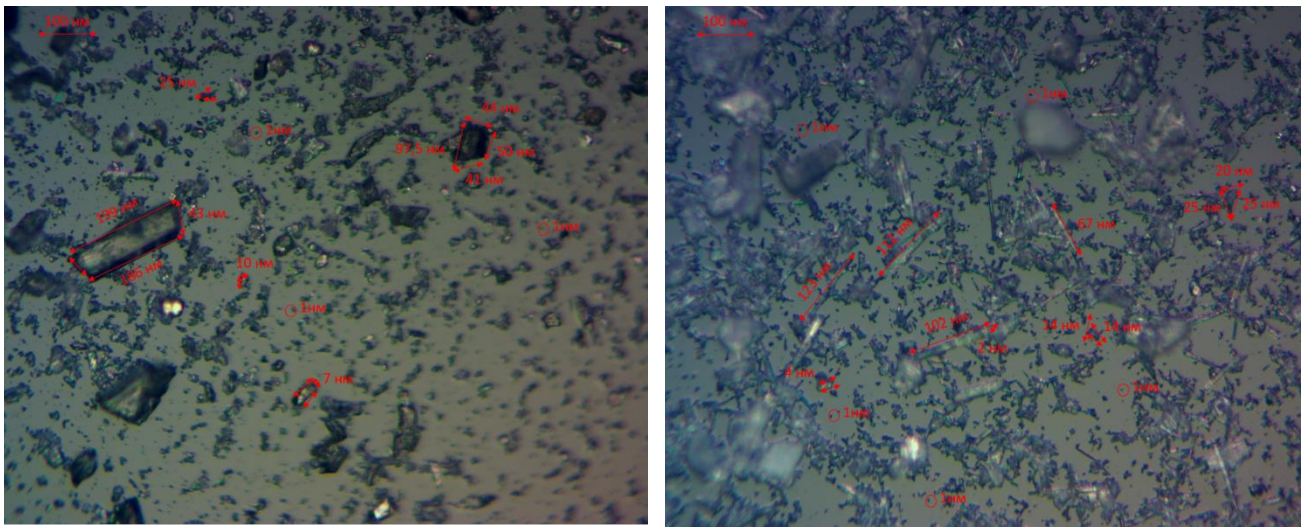

Рисунок 4 – Микрофотография фракций наночастиц и микрочастиц пыли гранита (слева), чароита (справа), отрезок – 100 нм, в проходящем свете

Сравнивая между собой морфологические особенности исследуемой каменной пыли, становится видно, что все частицы представляют потенциальную опасность для живых организмов с разной степенью влияния (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение частиц пыли исследуемых пород с формой частиц и влиянием на живые организмы

№ п/п	Вид породы	Форма частиц	Влияние на живые организмы
1	Мигматит	Прямоугольно-ориентированные	Разрушение легочной ткани и снижение сопротивляемости организма легочным заболеваниям
2	Гранит	Прямоугольно-ориентированные	Разрушение легочной ткани и снижение сопротивляемости организма легочным заболеваниям
3	Мраморизированный известняк	Прямоугольно-ориентированные	Разрушение легочной ткани и снижение сопротивляемости организма легочным заболеваниям
4	Офиокальцит	Сферические	Быстрое проникновение в легочную ткань живых организмов
5	Нефрит	Сферические	Быстрое проникновение в легочную ткань живых организмов
6	Серпентинит	Сферические	Быстрое проникновение в легочную ткань живых организмов
7	Чароит	Игольчатые вытянутые	Проникновение в легочную ткань живых организмов и ее повреждение

В заключительных разделах третьей главы проведена оценка геоэкологического риска на основе показателей индекса загрязненности атмосферы (ИЗА) с выполненными математическими расчетами для условий наличия конкретного источника загрязнения атмосферы (пыли). Последовательность расчетов включала определение расхода газовоздушной смеси с учетом климатических особенностей, расчет поверхностных концентраций загрязняющих веществ по оси эмиссионного факела на некоторых расстояниях и приземные концентрации загрязняющих веществ по производственной каменной пыли (рисунок 5).

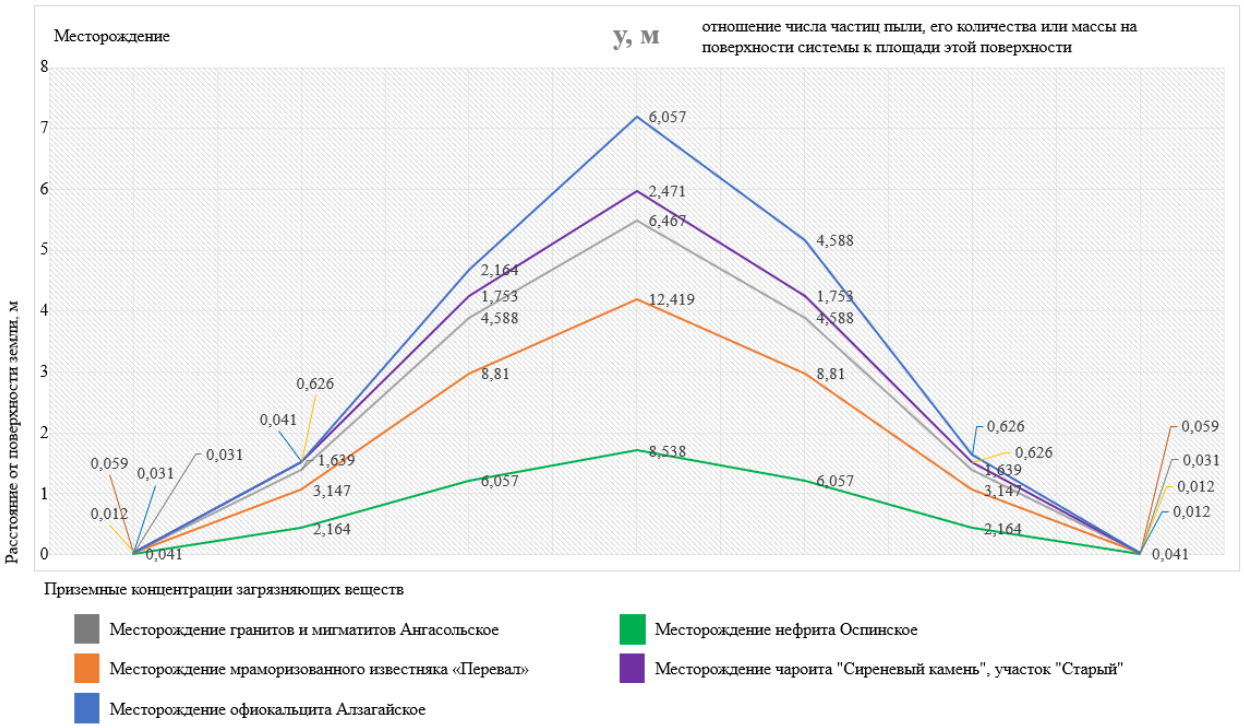

Рисунок 5 – Схема распределения поверхностных концентраций пыли в приземном слое атмосферного воздуха

Проведен расчет корреляции риска критического значения коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r},t)$и площади зон превышения ПДК для каждого типа производственной пыли (таблица 4). Оценка риска возникновения критического уровня $\rho_3(\vec{r},t)$ при разработке месторождений включает анализ суммарного ущерба, который зависит от типа пыли и размеров частиц.

Таблица 4 – Расчет корреляции риска критического значения коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r},t)$и площади зон превышения ПДК для каждого типа производственной пыли

Производственная пыль породы	**Объект исследования**	**Риск критического уровня $\rho_3(\vec{r},t)$**	**Площадь зон превышения ПДК, м^2**	**Коэффициент корреляции**
Мраморированный известняк	Карьер «Перевал»	84,02	381020,6	0,95
Граниты, мигматиты	Месторождение Ангасольское	54,05	374642	0,80
Офиокальциты	Месторождение Алзагайское	46,61	3016207	0,42
Нефриты	Месторождение Оспинское	26,91	244842	–0,15
Чароиты	Месторождение «Сиреневый камень»	21,85	121000	–0,75

Результаты оценки геоэкологического риска подтвердили обоснованность детального исследования производственной каменной пыли облицовочных и поделочных камней (гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита) и обосновали необходимость предложения нового подхода к прогнозированию геоэкологических рисков на основе обязательного учета содержания наночастиц пыли в воздухе рабочей зоны при автоматизированной системе контроля атмосферного воздуха.

Глава 4. Способы снижения негативного влияния каменной пыли на окружающую среду

Для снижения геоэкологического риска для окружающей среды, улучшения качества регулирования выбросов каменной пыли, автором предлагается техническая система автоматизации управления геоэкологическими рисками в области добычи облицовочных и поделочных камней. Она представляет собой совокупность инструментов и методов, разработанных для эффективного контроля и управления возникающими угрозами окружающей среде на горнодобывающих предприятиях.

Таким образом, установление целевых показателей качества атмосферного воздуха по нормированию каменной пыли на предприятиях по добыче облицовочных и поделочных камней будет направлено на предотвращение или сокращение вредного воздействия загрязняющих веществ на живые организмы и на окружающую среду в целом. Внедрение современных инструментов управления геоэкологическими рисками, а также применение аналитических методов прогнозирования помогают выстраивать эффективные стратегии развития и достижения долгосрочных целей отрасли. На рисунке 6 приведена схема процесса предварительного анализа данных и выбора информативных показателей для разработки модели форсайта.

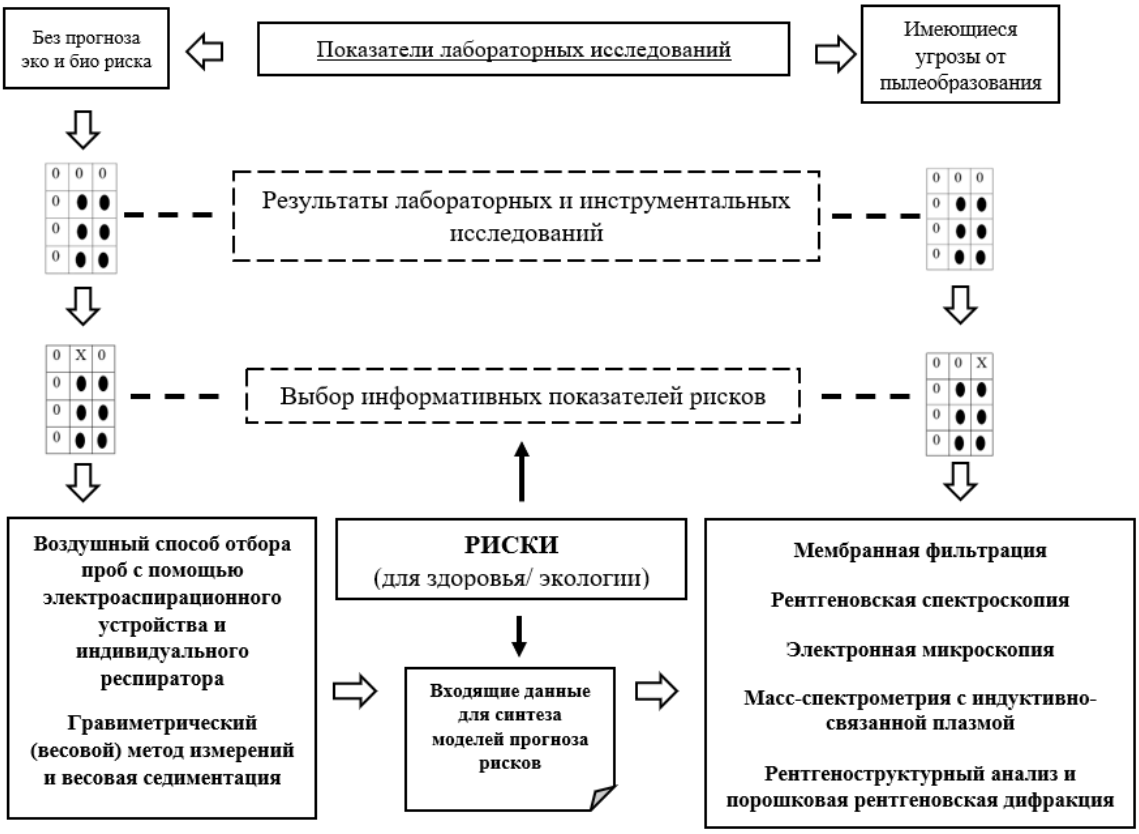

Рисунок 6 – Схема процесса предварительной обработки данных для синтеза моделей форсайта

Результаты лабораторных и инструментальных исследований и список информативных показателей рисков образуют перекрестные матрицы. Приведенный алгоритм демонстрирует возможности разработанных моделей прогноза и перспективу их программной реализации для контроля природоохранных мероприятий для горнодобывающей промышленности на примере добычи облицовочных и поделочных камней.

Важно указать, что входными данными для модели форсайта по расчету влияния размера наночастиц пыли на геоэкологический риск по объектам (месторождениям) будут являться четыре группы переменных (как показано на рисунке 6):

1. Показатели лабораторных исследований: в данном контексте это данные о составе пыли, полученные из лабораторных анализов. Например, концентрации различных минералов, химических соединений в пыли.

2. Имеющиеся угрозы от пылеобразования: эта категория включает данные о технологических процессах, которые могут привести к образованию пыли. Это данные о методах добычи и обработки материалов на месторождениях.

3. Результаты лабораторных и инструментальных исследований: здесь важными данными являются результаты измерений размеров наночастиц пыли, их формы и структуры. Также, данные о физических свойствах пыли, которые могут влиять на ее распространение и воздействие на организм.

4. Выбор информативных показателей рисков: это могут быть выбранные параметры, например, размеры частиц, их концентрации, химический состав, которые будут использоваться в модели для оценки риска.

С учетом этих данных и входной информации можно разработать модели прогноза риска, учитывая влияние размера наночастиц пыли на вероятность возникновения негативных последствий для окружающей среды на различных месторождениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены основные результаты изучения дисперсного, фракционного, химического состава, форм частиц производственной каменной пыли для организации эффективного экологического контроля процесса добычи и обработки облицовочных и поделочных камней с учетом геоэкологических рисков. На основании проведённых исследований получены следующие результаты и сделаны основные выводы:

1. Оценка геоэкологического риска на основе показателя индекса загрязнения атмосферы с построением аналитической модели пространственного распределения концентрации исследуемой пыли подтвердила необходимость детального изучения производственной каменной пыли гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита.

2. Содержание наноразмерных частиц в пылевых фракциях горных пород гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита составляет от 1,6 до 2,1 % от общего объема пыли, образующейся на исследуемых объектах. Разделение пылевидной фракции перечисленных горных пород возможно с помощью метода мембранной фильтрации. Выбросы в атмосферу в зависимости от производительности могут достигать до 120 т в год, и представляют потенциально высокий территориальный геоэкологический риск для экосистем и биоразнообразия, прежде всего на особо охраняемой Байкальской природной территории (Ангасольский щебеночный завод, Карьер «Перевал» по добыче мрамора).

3. Установлены аналитические зависимости между уровнем загрязнения пыли, образующейся на территории предприятий при ведении технологических процессов, тяжелыми металлами и её фракционным составом. Содержание высокотоксичных тяжелых металлов в наноразмерных фракциях производственной пыли исследуемых образцов в 1,1–3,2 раза выше, чем во фракциях микроразмерных частиц (для частиц размерами, входящими в диапазон от 2,5 мкм до 10 нм) и эти фракции являются источником загрязнения почв.

4. Геохимический ряд распределения тяжелых металлов в пыли гранита и мигматита на промышленной территории Ангасольского месторождения Слюдянского района Иркутской области в виде Ni > Co > Zn > Cu > Cr > Pb > Sn > Tl установлен по индексу геоаккумуляции.

5. Основным источником загрязнения компонентов окружающей среды на горнодобывающих предприятиях по добыче и обработке облицовочных и

поделочных камней является производственная каменная пыль горных пород, представляющая собой специфический геоэкологический риск для атмосферного воздуха, почвы и живых организмов.

6. Разработан алгоритм и математическая модель с применением методов нечеткой логики на основе обязательного учета содержания наночастиц пыли в атмосферном воздухе, которая дает возможность прогнозировать экологические риски и внедрять организационные управленческие решения путем модернизации нормативных требований.

7. Материалы исследований реализованы в проектах проведения геологоразведочных работ недропользователей Министерства природных ресурсов и экологии Иркутской области и предприятия ООО «ИНК-СтройНефтеГаз».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ:

1. **Александрова, А.Ю.** Пылевидная фракция гранитов, мигматитов, мраморизированных известняков, офиокальцитов как носитель наноразмерных частиц пыли / **А.Ю. Александрова,** С.С. Тимофеева // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2021. – Т. 36. – С. 3-15. DOI: 10.26516/2073-3402.2021.36.3.

2. **Александрова, А.Ю.** Микро- и наночастицы пыли облицовочных и поделочных камней как потенциальные источники аэрального загрязнения почв тяжелыми металлами / **А.Ю. Александрова,** С.С. Тимофеева // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Т 16. – № 4. – URL: https://esj.today/PDF/39NZVN424.pdf.

3. **Александрова, А.Ю.** Экологические риски при загрязнении атмосферы каменной пылью облицовочных и поделочных камней / **А.Ю. Александрова,** С.С. Тимофеева // Управление техносферой. – 2024. – Т.7. – №4. – С.609-624. DOI: 10.34828/UdSU.2024.62.49.008.

- изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus:

4. **Aleksandrova, A.Yu.** Correlation between Particle-Size Composition and Morphology of Stone Dust and Air Quality / **A.Yu. Aleksandrova**, S.S. Timofeeva // Materials Science Forum. – 2023. – Vol. 1088. – P. 53-60. – DOI 10.4028/p-610de9.

5. **Aleksandrova, A.Yu.** The Study of Dust Nanoparticles and Their Impact on the Health of Mining Workers / **A.Yu. Aleksandrova**, S.S. Timofeeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 666. – No 032030. – DOI 10.1088/1755-1315/666/3/032030.

6. **Aleksandrova, A.Yu.** Impact of mining of common minerals on the environment and public health / **A.Yu.** Aleksandrova, S. S. Timofeeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 848. – No 12136. – DOI 10.1088/1755-1315/848/1/012136.

- рецензируемых изданиях и сборниках трудов:

7. **Александрова, А.Ю.** Распределение пыли общераспространенных полезных ископаемых в атмосфере Байкальской природной территории / **А.Ю. Александрова** // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – Т. 6, № 3(23). – С. 309-318. – DOI 10.21285/2500-1582-2021-3-309-318.

8. **Александрова, А.Ю.** Мембранная фильтрация как метод выделения наночастиц каменной пыли / **А.Ю. Александрова**, С.С. Тимофеева // Безопасность – 2021 : Материалы XXVI Всерос. студ. научно-практ. конф. с междунар. участием, Иркутск, 21–23 апреля 2021 года. – Иркутск: ИРНИТУ, 2021. – С. 224-225.

9. **Александрова, А.Ю.** Оценка воздействия горнодобывающих предприятий на состояние атмосферного воздуха по результатам геохимической снеговой съемки / **А.Ю. Александрова**, С.С. Тимофеева // Безопасность-2018, Иркутск, 24–27 апреля 2018 года. – Иркутск: ИРНИТУ, 2018. – С. 10-11.

10. **Александрова, А.Ю.** Оценка экологических рисков при камнедобыче / **А.Ю. Александрова** // Совершенствование технологии горных работ и подготовка кадров для обеспечения техносферной безопасности в условиях Северо-Востока России : Сборник трудов Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием, посв. 80-летию д-ра техн. наук, профессора, действительного члена Академии горных наук РФ Чемезова Е.Н., Якутск, Россия, 25 апреля 2018 года. – Якутск, Россия: СВФУ им. М.К. Аммосова, 2018. – С. 193-200.

11. **Александрова, А.Ю.** Содержание микрочастиц в атмосферном воздухе и их экологический фактор / **А.Ю. Александрова**, А.А. Носенко, И.Ю. Осипова // Байкал 2018 : Сборник статей Междунар. научно-практ. конф., Ольхонский район, 11–20 июня 2018 года. – Иркутск: ИРНИТУ, 2018. – С. 232-237.

12. **Александрова, А.Ю.** Пылевая нагрузка территории Слюдянского района от деятельности горных предприятий и технология пылеподавления / **А.Ю. Александрова**, С.С. Тимофеева // Безопасность и охрана труда – 2018 : Труды Междунар. молодежной конф., Москва, 11–14 декабря 2018 года. – М.: Издательский дом МЭИ, 2018. – С. 7-10.

13. **Александрова, А.Ю.** Технологии и средства пылеподавления в горной промышленности / **А.Ю. Александрова**, С.С. Тимофеева // Техносферная безопасность в XXI веке : Сборник научных трудов магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Иркутск, 27–28 ноября 2017 года. – Иркутск: ИРНИТУ, 2017. – С. 210-216.

14. **Александрова, А.Ю.** Экологический риск камнеобрабатывающих предприятий / **А.Ю. Александрова**, С.С. Тимофеева // Кузбасс: образование, наука, инновации : материалы Инновационного конвента, Кемерово, 09 декабря 2016 года / Департамент молодежной политики и спорта Кемеровской области, Кузбасский технопарк, Совет молодых ученых Кузбасса. – Кемерово: СибГИУ, 2016. – С. 89-91.