

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Александрова Ангелина Юрьевна

**Оценка и управление геоэкологическими рисками, создаваемыми
наноразмерными частицами каменной пыли**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор С. С. Тимофеева

Иркутск 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ДОБЫЧЕ И ОБРАБОТКЕ ОБЛИЦОВОЧНЫХ И ПОДЕЛОЧНЫХ КАМНЕЙ.....	11
1.1. Геоэкологическое воздействие горных предприятий на окружающую среду. Характеристика видов воздействия	11
1.2. Экологические риски: источники и факторы формирования.....	23
1.3. Геоэкологическое воздействие производственной каменной пыли на природную среду	29
Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	35
2.1. Характеристика объектов исследования	35
2.2. Технология открытой разработки и добычи облицовочных и поделочных камней ..	50
2.3. Характеристика методов исследования	52
2.3.1. Воздушный способ отбора проб с помощью электроаспирационного устройства и индивидуального респиратора.....	52
2.3.2. Гравиметрический (весовой) метод измерений и весовая седиментация	53
2.3.3. Мембранная фильтрация	53
2.3.4. Рентгеновская спектроскопия	57
2.3.5. Электронная микроскопия	58
2.3.6. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.....	59
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ДОБЫЧЕ ОБЛИЦОВОЧНЫХ И ПОДЕЛОЧНЫХ КАМНЕЙ.....	61
3.1. Исследуемые образцы	61
3.2. Определение дисперсного состава частиц пыли методом мембранной фильтрации	62
3.3. Химический состав микро- и наночастиц производственной пыли	65
3.4. Фазовый (рентгеноструктурный) анализ образцов пыли облицовочных и поделочных камней	78
3.5. Особенности распространения пыли облицовочных и поделочных камней в атмосферном воздухе	86
3.6. Гранулометрический состав и морфология каменной пыли	90
3.7. Экологические риски при загрязнении атмосферы каменной пылью.....	94
3.8. Экологический риск от ингаляционного воздействия каменной пыли.....	105
Глава 4. СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ КАМЕННОЙ ПЫЛИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	112
4.1. Алгоритм управления геоэкологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней	112

4.2. Техническая система автоматизации управления экологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
ПРИЛОЖЕНИЯ	142
Приложение А.....	142
Приложение Б	149
Приложение В.....	152
Приложение Г	153
Приложение Д.....	154
Приложение Е	157

ВВЕДЕНИЕ

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 предприятиях 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 этим, 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 надёжности 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, образующейся 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 микро-размеров. 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 исследуемых 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.

Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ДОБЫЧЕ И ОБРАБОТКЕ ОБЛИЦОВочНЫХ И ПОДЕЛОЧНЫХ КАМНЕЙ

1.1. Геоэкологическое воздействие горных предприятий на окружающую среду. Характеристика видов воздействия

Горнодобывающая промышленность оказывает существенное воздействие на окружающую среду. Процессы добычи полезных ископаемых приводят к нарушению геологического строения участков недр и формированию огромных полостей, искажающих естественный ландшафт и нарушающих природные экосистемы. Кроме того, использование технологий с применением химических веществ в процессе добычи может сопровождаться выбросами опасных веществ в атмосферу и водные источники, что негативно сказывается на качестве воздуха и воды, а также на здоровье местных жителей и животных [53; 56].

В настоящее время деятельность предприятий горнодобывающей отрасли в основном направлена на достижение определенного уровня экономической эффективности и в меньшей степени на обеспечение экологической безопасности. Окружающая среда испытывает мощное давление со стороны горнодобывающего производства. По мнению В. И. Вернадского, окружающая природная среда составляет некую материальную оболочку Земли, в которой происходят изменения в результате жизнедеятельности человека [8], и представляет собой совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов, а также антропогенных объектов. Природные компоненты включают атмосферный воздух, растительный и животный мир, почву и подстилающие породы, недр, подземные и поверхностные воды и человека с его разнообразной деятельностью. Природно-антропогенные компоненты связаны с человеческой деятельностью, выражающейся в строительстве и эксплуатации промышленных предприятий [4].

Антропогенная трансформация природной среды протекает на глобальном, региональном и локальном уровнях, порождая соответствующего масштаба экологические проблемы и катастрофы. Проблемы, вызванные этими процессами, затрагивают разнообразные аспекты экологической функции государства и постоянно обсуждаются научным, предпринимательским сообществом и представителями власти. Таким образом уточняются и развиваются общие представления об антропогенной трансформации природной среды на уровне экосистем и окружающей среды [5–27]. В

результате антропогенной трансформации девственная экосистема претерпевает существенные изменения: нарушаются естественные процессы круговорота вещества, заложенные в течение длительной истории формирования планеты; меняются климат и погодные условия; развиваются эрозии; нарушаются естественные ландшафты; ухудшается качество атмосферного воздуха; меняются биохимические и другие процессы.

Исследователями установлено, что особенно остро эти изменения могут проявляться при эксплуатации предприятий горнодобывающего комплекса. В ходе сравнения данных об экологическом состоянии регионов с геосистемами разной степени устойчивости (естественные компоненты геотехнических систем) к воздействию на них горнодобывающих предприятий и регионов, испытывающих разные в зависимости от продолжительности эксплуатации на их территории предприятий по добыче и обработке полезных ископаемых геэкологические проблемы, и в том и в другом случае были подтверждены негативные последствия деятельности таких предприятий [39; 45; 102].

Последствия деятельности горных предприятий проявляются в виде различного рода воздействий на земельные ресурсы, недра и почвы, на атмосферный воздух, подземные и поверхностные воды, таких как:

- загрязнение атмосферного воздуха выбросами газообразных и взвешенных веществ (выбросы в атмосферу газов и пыли);

- нарушение целостности участков недр (проходка горных выработок, складирование отвалов вскрышных пород, выемка полезного ископаемого и др.);

- изменения рельефа поверхности земли, приводящее к изменению геологического строения земной коры и вертикальным деформациям грунтов и почвенно-плодородного слоя (взрывы и экскавация добываемой породы, засыпка естественных углублений рельефа, осушение водотоков, складирование отходов производства);

- воздействие шума и вибрации (акустические возмущения, электромагнитные излучения, работа техники и технологических устройств);

- накопление крупномасштабных отходов, объемы которых на стадии разработки месторождения в 4–5 раз превосходят объемы добычи (создание отвалов горных пород, занимающих огромные площади);

- загрязнение поверхностных и подземных вод за счет нарушения целостности недр и выбросов в атмосферу (изменение качества природных вод, смывы с техногенных территорий, осушение русел водотоков, дренаж водоносных горизонтов горными выработками, развитие эрозии);

– ухудшение качества жизни населения, проявляющееся в виде роста заболеваемости, смертности, оттока населения на наиболее благополучные территории и т. д.

Ниже представлены показатели степени влияния различных методов добычи полезных ископаемых на элементы окружающей среды (таблица 1.1), где 5 – сильное влияние, 1 – отсутствие влияния.

Таблица 1.1 – Оценка влияния различных методов добычи полезных ископаемых на элементы окружающей среды [57]

Метод добычи	Недра	Атмосфера	Гидросфера	Почвы	Флора и фауна
Открытый горный разрез	5	5	5	5	5
Подземная горная работа	5	2	3	1	3
Скважинный метод	5	1	2	1	2
Обогащение	1	3	5	5	5
Производство щебня	1	3	2	5	5
Производство блочного камня	1	2	2	1	1

Приведенные данные свидетельствуют о значительном воздействии горнодобывающей промышленности на окружающую среду, особенно в силу взаимосвязи и взаимозависимости различных элементов природной среды. Это означает, что любое изменение или нарушение в одном элементе может повлечь за собой цепную реакцию и вызвать негативный ответ на воздействие в других элементах природой среды.

По мнению Ю. О. Славиковской, в целом последствия открытого способа отработки, вызывающие большое разрушающее воздействие на горные породы и полезное ископаемое, и их перемещения в больших объемах от места добычи до мест потребления и складирования на практике приводят к тотальному разрушению геологической и природной среды и росту экологической напряженности в районах массового производства горных работ [45].

Деятельность горнодобывающих предприятий прямо и косвенно сказывается на всех элементах окружающей среды. Например, в процессе добычи полезных ископаемых происходит разрушение участков недр, что может привести к образованию шахт, карьеров или отвалов. Это, в свою очередь, влияет на водные ресурсы, так как может вызвать изменение режима подземных и поверхностных вод и даже загрязнение водоемов в результате выбросов или химических реакций в новообразовавшихся полостях. Кроме того, деятельность предприятий горнодобывающей промышленности сопровождается

выбросами вредных веществ, таких как пыль, твердые и газообразные выбросы, в атмосферу, что влечет загрязнение воздуха и влияет на климатические процессы, а также на здоровье людей и животных. Воздействие предприятий горнодобывающей отрасли распространяется на почвенный и растительный покров, провоцируя деградацию почв и гибель природной растительности, влияя на экосистемы и биоразнообразие. Все эти аспекты подчеркивают важность принятия надлежащих мер для защиты окружающей среды и сохранения ее природных ресурсов.

Статистические данные Росстата свидетельствуют о значительном воздействии горного производства на окружающую среду. Более 40 % нарушенных земель, более 30 % вредных выбросов в атмосферу и 10 % объема сточных вод приходятся на долю горнодобывающей промышленности. Это указывает на серьезные недоработки в части обеспечения экологической безопасности и на необходимость принятия соответствующих мер для снижения вредного воздействия на окружающую среду [48].

М. Накао предложил классификацию негативного воздействия горного производства на окружающую среду, выделив четыре основные группы последствий (осадка земной поверхности, ущерб сельскому хозяйству, ущерб сельскому хозяйству и лесоводству, ущерб живым существам (таблица 1.2)). Однако эта классификация является узкой и не охватывает всех аспектов воздействия на окружающую среду. Е. Малара, Т. Скавина и З. Боярский дополнили ее, приняв во внимание еще геомеханические, гидрологические, химические, физико-механические и термические изменения, которые происходят в окружающей среде под влиянием горнодобывающей промышленности [39].

Таблица 1.2 – Основные направления и характер воздействия техногенных месторождений на природную окружающую среду [29]

Тип техногенного месторождения	Атмосфера	Почвы и грунты	Гидросфера	Биосфера
Горнодобывающая промышленность				
Отвалы вскрышных и вмещающих пород, некондиционных руд. Отвалы разработки месторождений меди – Яман-Касы, Маканского и др.	Загрязнение пылью в результате ветровой эрозии	Отчуждение земель хозяйственного пользования, загрязнение тяжелыми металлами	Сток дренажных отвалов вод, загрязнение поверхностных и подземных вод, локальное заболачивание вблизи отвалов	Угнетение растительного и животного мира

Ниже приведена схема (рисунок 1.1), описывающая воздействие горного производства на окружающую среду с учетом геомеханических и гидрологических изменений.



Рисунок 1.1 – Воздействие горного производства на окружающую среду с учетом геомеханических и гидрологических изменений

Эти геомеханические изменения связаны с различными процессами добычи, строительства и управления отходами горнодобывающей промышленности. Они приводят к нарушению природных структур, изменению рельефа, а также могут вызывать опасные ситуации, такие как обрушения и оползни. Также воздействие горнодобывающей промышленности на окружающую среду может повлечь гидрологические изменения, проявляющиеся в изменении гидрологических условий и режима функционирования гидротехнических сооружений. Водоотведение из подземных и открытых горных выработок при их осушении, строительство водоемов, а также загрязнение вод промышленными стоками – все это влияет на гидрологический режим и гидрогеологические условия в регионе. Осушение месторождений также может стать причиной изменения режима и качества подземных вод и трансформации гидрологической системы.

Другим требующим особого внимания видом негативного воздействия на окружающую среду, возникающего при разработке месторождений, является воздействие на недра: нарушение целостности участков недр, изъятие земельных и водных ресурсов, экстенсивное использование недр, изменения рельефа поверхности земли, приводящее к изменению геологического строения земной коры и вертикальным деформациям грунтов и почвенно-растительного слоя. Воздействия на недра, вызванные деятельностью горнодобывающих предприятий, могут быть разнообразными и зависят от множества факторов, таких как глубина разработки, наличие подземных вод и развитие экзогенных процессов. Исследования Н. В. Назаренко и его коллег показывают, что даже малые карьеры, занимающие площадь от 5 до 15 га и имеющие отвалы, оказывают такое же негативное воздействие на окружающую среду, как и горнорудные предприятия, хотя и меньшего масштаба [21].

Для оценки текущего состояния нарушенных земель следует обратиться к имеющимся данным, отражающим степень разработки целостных земель и степень рекультивации нарушенных земель. Морфологический анализ рельефа, отраженного на картах нарушенных земель и их рекультивации, показывает, что массовая разработка малых, средних и крупных карьеров полезных ископаемых приводит к появлению техногенного рельефа большого площадного распространения. Длительная эксплуатация таких карьеров и некачественное проведение работ по их рекультивации, разработка карьеров стихийным способом провоцируют и усиливают такие негативные процессы, как выветривание, оползневые, обвально-осыпные, просадочные явления, эрозионный размыв, дефляция, накопление техногенного слоя пород, подтопление. Кроме того, по мнению Н. В. Назаренко с соавторами, в ряде случаев при производстве горных работ допускаются нарушения поверхности пологих склонов проходами плугов бульдозеров вдоль и поперек склонов с образованием длинных борозд, узких траншей или беспорядочных «закопушек». В последующем они становятся местами активизации процессов оврагообразования протяженностью до нескольких километров [33; 34; 48].

Весомый вклад в увеличение площадей нарушенных земель вносят несанкционированные карьеры по добыче полезных ископаемых. Несмотря на реализацию активных предупредительных и запрещающих мер воздействия, а также применение административных наказаний за несанкционированную разработку, их количество растет. Из-за несовершенства законодательной системы часто невозможно установить лиц, ведущих разработку, и, соответственно, привлечь их к административной ответственности по каждому этапу геологических изысканий и разработки

месторождений общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ), описанных в ГОСТ 17.4.3.04-85 [19].

Помимо несанкционированных карьеров, угрозу окружающей среде несут объекты, на которых в огромных количествах хранятся отходы отработанной части промышленного цикла по добыче облицовочных и поделочных камней. Собственники таких карьеров имеют лицензии на разработку, но процесс рекультивации в полном объеме не завершают, тем самым нарушая условия соглашения на пользование участком недр. Это влечет за собой техногенно-негативную нагрузку на почвы и рельеф прилегающих к карьере территорий. Согласно ГОСТ 17.4.3.04-85 производству работ в карьере должно предшествовать снятие потенциально плодородного слоя мощностью 25 см с соответствующими содержанием гумуса и засоленностью почв. Владельцы несанкционированных разработок по добыче облицовочных и поделочных камней это требование не соблюдают, чем наносят экологический ущерб и вносят негативный вклад в состояние ненарушенных земель [48].

Кроме того, предприятия горнодобывающей промышленности являются источником шума и вибрации, особенно на карьерах по добыче облицовочных и поделочных камней при буровзрывных работах, выемке, погрузке и разгрузке горных пород, движении транспортных средств, работе грохотов и другого технологического оборудования на обогатительных фабриках. Уровень шума также будет зависеть от близости к автомобильным, железным дорогам и жилым постройкам. Для оценки уровня шума используются специальная техника и автотранспорт, обеспечивающие информацией о шумах, которые генерируются техникой в процессе работы на карьере. Следует отметить, что допустимые показатели уровня звука, определенные для жилых кварталов, составляют 40 децибел (дБА) в дневное время и 30 дБА – в ночное [43]. Это рекомендуемые значения, которые помогают обеспечить комфортные условия проживания людей и защитить их от негативного воздействия шума.

На карьерах, где разработка осуществляется без проведения буровзрывных работ, уровень шума обычно не превышает установленных норм для прилегающих заселенных территорий, что является важным фактором, обеспечивающим поддержание благоприятной для жителей этих мест окружающей среды. Однако работники предприятий испытывают на себе большее воздействие шума, поскольку показатели уровня шума на таких карьерах могут превышать допустимые значения. Это делает условия труда на рабочих местах опасными, что требует применения особых мер защиты людей от вредного воздействия шума. На карьерах, где производятся буровзрывные работы, уровень звукового давления находится в диапазоне от 70 до 92 дБА. И, несмотря

на краткосрочность воздействия такого шума (буровзрывные работы проводятся с периодичностью от одного до четырех раз в месяц), оно также выступает негативным фактором влияния на окружающую среду и человека. Основная часть энергии, образующаяся при промышленных взрывах, расходуется на разрушение грунта и тепловое излучение и за счет этого распространяется ударной волной в воздух. Взрывы в карьерах вызывают интенсивное шумовое загрязнение, которое распространяется на большие территории, приводя к необратимым последствиям для окружающей среды и человека [25].

Значительное по масштабам воздействие на окружающую среду оказывают большие объемы отходов производства, на стадии разработки месторождения в 4–5 раз превосходящие объемы добычи. В последние 50 лет отмечается усиление антропогенного воздействия, связанного с добычей минерального сырья, на природные ландшафты. За годы функционирования десятков предприятий на дневную поверхность вынесено свыше 1 млрд куб. м горных пород и более 300 млн куб. м отходов, образующихся в процессе обогащения руд. При глубокой отработке месторождений на дневную поверхность поднимают горные породы различного геологического возраста и химического состава – от нейтральных до кислых и щелочных. Такие породы, как правило, представлены карбонатными суглинками, песками разного гранулометрического состава, алевритами, мелом. При разработке месторождений отходы производства (породы вскрышных или обогатительных работ) в раздробленном и смешанном виде десятилетиями остаются обнаженными. Семена растений, споры микроорганизмов и высаженные растения на поверхности отвалов практически не выживают. Селективный же способ складирования, подразумевающий складирование пород в соответствии со стратиграфической последовательностью напластования (колонкой) в определенных условиях карьеров, является дорогостоящим, и ни одно предприятие его не использует.

Между тем, как отмечают А. М. Бурькин с соавторами [6], при нарушении природного ландшафта не только теряются плодородные почвы, сельскохозяйственные угодья, леса, но и формируется новый техногенный ландшафт со всеми его отрицательными свойствами: опустыниванием, бесплодностью почв, большой расчлененностью, эродированностью. Техноземы можно отнести к одному из видов маргинальных экосистем, характеризующихся большой неустойчивостью. Их рельеф, растительный покров, водный режим, формирующие почвы, энтомофаги не претерпевают больших изменений и часто деградируют под влиянием водной и ветровой эрозии, оползней, обвалов, усадки грунтов, токсичных пород, отсыпанных на дневную поверхность, микроклимата и других факторов. Техноземы, в отличие от ненарушенных

ландшафтов, лишены грунтовых вод, имеют значительную площадь поверхности испарения, крутые склоны, большую контрастность в условиях распределения влаги и освещенности по экспозициям склонов. Площади техноземов ежегодно увеличиваются.

Нередко при разработке и добыче полезных ископаемых происходит загрязнение поверхностных и подземных вод за счет нарушения целостности недр, рудничных стоков на поверхность и в водотоки и выбросов в атмосферу. Гидрогеологические условия месторождений играют ключевую роль при определении стратегии разработки карьеров и выборе последующих мероприятий по рекультивации нарушенных земель.

Во многих случаях добыча поделочных камней происходит без проведения дополнительных осушительных и водоотводных работ, поэтому прямой водоотлив приводит к загрязнению водотоков и водоемов взмученными водами, маслами и отходами, образующимися в процессе эксплуатации карьеров. Исследования, проведенные Т. Н. Кравчуком с соавторами, показывают, что строительство и функционирование горнодобывающих предприятий существенно нарушают гидродинамический режим подземных вод. Экологические последствия незавершенной рекультивации и несоблюдения надлежащих мер по водоотводу в карьерах представляют собой серьезную проблему. Однако использование современных технологий и управленческого подхода делает возможным смягчение негативного воздействия горных предприятий на водную среду. Такой подход предполагает планирование добычи с учетом гидрогеологических особенностей участка, применение современных технологий осушения и водоотведения, а также осуществление мер по рекультивации территорий после окончания добычи, что позволит минимизировать влияние на окружающую среду и обеспечить более устойчивое взаимодействие между промышленностью и природой [22].

Последствия техногенного воздействия на подземные воды, возникающего при разработке карьеров, проявляются не сразу и фактически необратимы. Выявление загрязненности подземных вод происходит в большинстве случаев на поздних стадиях процесса, когда предотвратить последствия этого загрязнения становится невозможным. В некоторых случаях откачка подземных вод на карьерах ведется для нужд технологического процесса, например при обработке поделочных камней (нефрита, чароита, офиокальцита, мрамора и др.).

Исследования М. З. Мадаевой предоставляют убедительные доказательства того, что химический состав почв, прилегающих к рудникам, существенно зависит от выбрасываемой пыли. Эффект от загрязнения был ярче выражен в непосредственной близости к горнодобывающим предприятиям. Например, исследователи установили, что содержание свинца и цинка в почве превышало допустимые предельные значения,

особенно в верхних слоях почвы. Эти результаты указывают на техногенное происхождение загрязнений в окрестностях рудников. Выбрасываемая в атмосферу пыль и выбросы предприятий содержат большие количества различных химических элементов, в том числе и тяжелых металлов, которые затем оседают на прилегающей территории, попадают в почву и накапливаются в верхних слоях геологического разреза. Это явление получило широкое распространение в районах добычи полезных ископаемых [28].

Так, по данным проектов нормативов предельно допустимых выбросов, разработанных на горнодобывающих предприятиях, основными компонентами, оказывающими негативное влияние на природную среду, являются вещества, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Перечень загрязняющих веществ на объектах по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней

Вещество	Класс опасности
Пыль металла	3
Серная кислота	3
Коксовые остатки	3
Зола угольная	3
Железа оксид	3
Марганец и его соединения	2
Азота диоксид (азота (IV) оксид)	3
Азот (II) оксид (азота оксид)	3
Углерод черный (сажа)	3
Ангидридсернистый	3
Дигидросульфид (сероводород)	2
Углерод оксид	4
Фторидыгазообразные	2
Фториды плохо растворимые	2
Бенз/а/пирен (3,4-бензпирен)	1
У/в по керосину	
Углеводороды предельные C12-C19, в том числе ароматические	4
Пыль неорганическая 20–70 % SiO ₂ (сварка)	3
Пыль неорганическая < 20 % SiO ₂	3
Пыль угольная	3
Пыль золошлаковых отходов	3

Одним из аспектов изучения эффекта, оказываемого горнодобывающими предприятиями на окружающую среду, также выступает оценка состояния среды жизнедеятельности человека, влияющего на качество его жизни. В последнее время специалистами разного профиля разработаны различные методики оценки измерения качества жизни. Экономисты, социологи, медики, специалисты по безопасности, а особенно экологи – все они рассматривают понятие качества жизни с учетом различных

факторов. Для экологов, например, важными факторами являются экологические условия, состояние природной среды и ее влияние на здоровье людей. Использование интегрального показателя «качество жизни» позволяет комплексно оценить жизненные условия с учетом различных аспектов жизнедеятельности и влияния различных областей хозяйственно-экономической деятельности на благополучие общества. Подобные исследования играют важную роль в формулировании политик и стратегий, направленных на улучшение условий жизни и обеспечение устойчивого развития [26]. Применительно к оценке качества жизни работников предприятий по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней и населения, проживающего в зоне действия таких предприятий, необходимо учитывать описанные выше виды воздействия на природную среду, так или иначе влияющие и на человека. Индикаторами качества жизни предстают уровень развития социальной инфраструктуры, состояние здоровья, природно-климатические условия, уровень заболеваемости и смертности. Так, по данным исследования [66], в зоне действия карьеров по добыче облицовочных и поделочных камней распространена и находится на высоком уровне первичная заболеваемость (таблица 1.4), профессиональная заболеваемость.

Таблица 1.4 – Структура и распространенность общей патологии горняков горных карьеров (случаи за последние 5 лет)

Нозологические классы	Распространенность	
	абс. (доля, %)	на 100 работников
Болезни органов дыхания	383 (18,4)	55,2
Болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани	320 (15,2)	45,6
Болезни глаза и его придаточного аппарата	287 (14,5)	43,5
Болезни кожи и подкожной клетчатки	279 (13,4)	40,2
Болезни системы кровообращения	257 (12,0)	36,0
Болезни эндокринной системы, расстройства питания и обмена веществ	180 (8,8)	26,4
Болезни уха и сосцевидного отростка	135 (6,2)	18,6
Болезни нервной системы	100 (4,9)	14,7
Болезни органов пищеварения	82 (4,2)	12,6
Болезни мочеполовой системы	26 (1,1)	3,3
Болезни других органов и систем	14 (0,7)	2,1

Недостаток точной информации о составе материалов и неправильное обращение с токсичными химическими веществами приводят к возникновению различных заболеваний, частота которых нередко недооценивается. Среди документально

подтвержденных заболеваний на горных карьерах наиболее распространены пневмокониозы, такие как силикозы и хронические пылевые бронхиты. Вторым часто встречающимся заболеванием является интоксикация угарным газом, способная привести к отравлению свинцом.

В Российской Федерации располагаются крупнейшие техногенные месторождения, образованные в результате деятельности предприятий горной промышленности и металлургии. Формирование этих объектов происходит в разнообразных, преимущественно поверхностных условиях, в том числе в условиях динамичных геотехнических систем [41]. Они часто размещаются в областях, где активно осваиваются минеральные ресурсы, что обуславливает слияние промышленных центров в крупные районы и промышленные узлы, связанные разветвленными транспортными, энергетическими, коммуникационными и информационными системами. Однако такие техногенные месторождения становятся источниками загрязнения окружающей природной среды.

Главной причиной загрязнения окружающей среды от этого источника является миграция тяжелых металлов через атмосферные и гидрогенные потоки рассеяния. В результате образуются техногенные ореолы и аномалии содержания тяжелых металлов, которые становятся источниками вторичного загрязнения. Особенно важным фактором формирования таких ореолов является тип техногенного месторождения, при этом другие факторы – климатические, технологические, гидрологические и геологические – играют в формировании загрязнений роль, зависящую от состава техногенного месторождения.

Для контроля загрязнения окружающей среды в условиях формирования техногенных месторождений важно детально изучить основные пути миграции тяжелых металлов и их нахождение в депонирующих средах, таких как почва и донные отложения. Важной задачей становится разработка физико-механических моделей формирования техногенных месторождений и их изменений при выветривании, а также разработка научно-методических подходов к оценке влияния на окружающую природную среду.

Открытые (карьерные) разработки полезных ископаемых вследствие образования пыли и газов при их эксплуатации, как правило, оказывают отрицательное воздействие на атмосферный воздух [61]. Значительные объемы пыли образуются при формировании отвалов, так как большие незакрепленные поверхности при неблагоприятных метеорологических условиях способствуют интенсивному распространению пыли. Кроме того, весомый вклад в загрязнение атмосферного воздуха карьерных полей вносят выбросы автотранспорта и пыль, образующаяся при обработке пород.

Таким образом, одним из направлений изучения воздействия горнодобывающих предприятий, связанных с добычей и обработкой облицовочных и поделочных камней, является исследование состояния атмосферного воздуха и степени его загрязнения производственной каменной пылью.

1.2. Экологические риски: источники и факторы формирования

В настоящее время в научной литературе широко используется термин экологического риска. Экологический риск представляет собой вероятность возникновения неблагоприятных изменений в окружающей природной среде или долгосрочных отрицательных последствий этих изменений, обусловленных отрицательным воздействием на окружающую среду. В контексте горнодобывающей промышленности, как и других видов деятельности, связанных с природными ресурсами, существуют определенные риски и ситуации, которые могут быть плохо контролируемы или совсем не контролируемы. Именно поэтому определение оптимальной системы управления рисками на промышленных горнодобывающих предприятиях становится одной из приоритетных задач настоящего времени.

Горнодобывающая промышленность с точки зрения возникновения экологических рисков представляет особый интерес, поскольку ведение добычных работ и переработка полезных ископаемых связаны с интенсивным воздействием на окружающую среду. Этот процесс может приводить к разрушению природных ландшафтов, загрязнению водных ресурсов, уничтожению экосистем и негативному влиянию на здоровье живых организмов, включая человека.

В свете экологических проблем, связанных с влиянием на окружающую среду горнодобывающей промышленности, предприятиям становится все более важным разрабатывать и внедрять системы управления рисками, которые бы способствовали предотвращению или минимизации негативных последствий их деятельности и обеспечивали бережное использование природных ресурсов. Такие системы должны учитывать особенности каждого предприятия, окружающей его среды и основных горнодобывающих процессов. С этой целью необходимо проводить комплексный анализ экологических рисков, определять их вероятность и степень воздействия на окружающую среду. Оптимальное управление рисками включает разработку и реализацию соответствующих мер и программ, а также строгий контроль за их выполнением. Ключевыми аспектами такой системы управления являются регулярный мониторинг

окружающей среды, анализ данных, обучение персонала и соблюдение всех нормативных требований в области охраны окружающей среды [13].

Развитие производства, экономический рост отдельных регионов, стран, мира в целом в большинстве случаев влечет за собой риск экологического ущерба, проявляющегося в виде воздействия на экосистемы окружающей среды. Экологический риск, т. е. вероятность возникновения неблагоприятных последствий воздействия на окружающую среду со стороны всех технико-технологических систем, как математическая модель в той или иной степени всегда присутствует.

Он заключается в опасности превышения предельно допустимой концентрации вредных веществ в атмосфере, воде и почве. Выбросы токсичных и опасных веществ в окружающую среду могут вызывать загрязнение атмосферы и водных ресурсов, что отрицательно сказывается на качестве воздуха, воды и почвы в районах, где осуществляется добыча. Кроме того, образование отходов производства является ещё одной проблемой, связанной с экологическим воздействием горнодобывающей промышленности.

Все сказанное еще раз подтверждает необходимость внедрения современных технологий и методов, позволяющих минимизировать экологические воздействия горнодобывающей промышленности; разработки и реализации экологически ответственных методов добычи и обработки, а также обеспечения строгого контроля выбросов и утилизации отходов. Только используя все имеющиеся высокотехнологичные разработки и соблюдая экологические требования, возможно снизить негативное воздействие горнодобывающей промышленности на окружающую среду и обеспечить устойчивое использование природных ресурсов.

Специфика работы горнодобывающих предприятий позволяет выделить несколько видов экологических рисков:

1. Геологический риск обусловлен неопределенностью количества и качества ресурсов месторождения, возможными изменениями в минералогическом составе.
2. Технологический риск связан с выбранной технологией работ на месторождении, возможностью или невозможностью добычи и переработки, а также с опасными явлениями природы, которые могут повлиять на планируемые операции. Технологические риски могут возникнуть из-за сложных геологических условий и недостатка соответствующего оборудования.
3. Экономический и финансовый риск включает операционные издержки, сложности в определении точного спроса на ресурсы, конкуренцию на рынке, процентные

ставки, обменные курсы и инфляцию. Неопределенность в экономических условиях может повлиять на доходность предприятия.

4. Политический риск связан с возможностью приватизации предприятия, изменениями в законодательстве и нормативных актах, регламентирующих, например, налог на прибыль, или положения по охране окружающей среды. Политические риски могут повлиять на стабильность и устойчивость работы предприятия.
5. Риски, связанные с работами в условиях высокой опасности на предприятиях горнодобывающей промышленности и обеспечением безопасности труда.

Внедрение комплексных систем управления экологическими рисками предписано и стандартом ISO 14001. Получить сертификат соответствия этому стандарту стремятся многие предприятия, но не всегда это стремление продиктовано искренней озабоченностью органов управления производством влиянием отходов производства на экологическую обстановку и их приверженностью требованиям безопасного производства и поддержания благоприятной среды [75]. Чаще всего обладание сертификатом экологического менеджмента играет роль способа формирования позитивного имиджа, посредством которого предприятие добивается повышения конкурентоспособности. Обладатель сертификата отвечает запросам заказчика на сотрудничество с ответственным производителем и демонстрирует свою социальную позицию. Однако многие другие аспекты, свидетельствующие о воздействии на окружающую среду предприятия, могут оставаться незаметными.

Стандарт ISO 14001 предполагает комплексный подход к управлению окружающей средой, что подразумевает своевременную идентификацию всех возможных негативных воздействий на окружающую среду, связанных с деятельностью предприятия, и разработку эффективных мер по снижению и предотвращению негативных последствий, вызванных такими воздействиями.

Кроме того, важно, чтобы система экологического менеджмента была внедрена на всех уровнях структуры управления предприятия для обеспечения последовательного и стабильного соблюдения стандартов и нормативов. Экологическая политика должна быть частью стратегии компании, и деятельность по ее реализации должна быть включена в ежедневные процессы и процедуры.

Управление экологическими рисками строится на основе комплексной оценки политических, социальных и экономических аспектов, полученных в результате анализа рисков.

Процесс управления экологическими рисками начинается с сопоставления характеристик различных вариантов управленческих решений по снижению риска, включающего оценку эффективности и возможных последствий каждого варианта решения. Все варианты рассматриваются с точки зрения того, насколько успешно их реализация поможет справиться с конкретными экологическими угрозами и снизить вероятность возникновения негативных изменений в окружающей среде. Производится анализ размера и характера ущерба, который может быть причинен вследствие использования того или иного варианта управленческих решений. Этот анализ включает в себя оценку потенциальных убытков для окружающей среды, здоровья людей, а также возможных социальных и экономических последствий.

Ключевой составляющей управления экологическими рисками является определение оптимальных мероприятий по предотвращению или снижению рисков. Эти мероприятия разрабатываются с учетом результатов анализа и ориентированы на минимизацию негативных воздействий на окружающую среду.

Важной частью процесса управления экологическими рисками является также оценка выгод, которые будут получены в результате реализации этих мероприятий. Оценка выгод осуществляется на основе результатов анализа экономических и социальных преимуществ, таких как снижение затрат на реабилитацию загрязненных территорий, улучшение имиджа предприятия, увеличение степени доверия клиентов и инвесторов.

Управление экологическими рисками предполагает постоянный контроль и мониторинг процесса реализации утвержденных мероприятий. Это позволяет оперативно реагировать на изменения ситуации и корректировать стратегию управления рисками при необходимости. Следует подчеркнуть, что управление экологическими рисками не ограничивается лишь техническими аспектами. Важную роль в этом процессе играют также политические, социальные и этические факторы, которые могут повлиять на принимаемые решения и успешность реализации мероприятий. Поэтому комплексность подхода к управлению экологическими рисками, учитывающего множество факторов, является необходимым условием обеспечения устойчивого развития предприятий и сохранения окружающей среды.

В целом большинство исследований, посвященных оценке экологического риска, напрямую связано с проблематикой технологического риска, риска возникновения аварий, экономического ущерба, с изучением отдельных антропогенных производственных факторов (например, каменной пыли).

Понятие «экологический риск» закреплено положениями Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) в 1978 г., согласно которым экологический риск – это ожидаемая частота нежелательных эффектов, возникающих от заданного воздействия загрязнителя [18; 77]. В зарубежных источниках в 1960–1970 гг. вопросы экологических рисков часто связывались с экспертизой «риска технологий». Методология такого подхода ограничивалась моделированием технологического риска (главным образом в терминах аварий и катастроф) и оценкой последствий воздействия на окружающую среду. Наиболее разработанной в то время была методология, применявшаяся в ядерной энергетике [70]. В Советском Союзе об экологическом риске впервые упоминалось во Временной инструкции о порядке проведения государственной экологической экспертизы 1990 г. В принятом в 1991 г. Законе РФ «Об охране окружающей природной среды» [71] понятие экологического риска определено не было, однако содержательно оно было близко к таким используемым в законе понятиям, как «зоны экологического бедствия» и «зоны чрезвычайной экологической ситуации». Законодательное закрепление оно получило в 2002 г. с принятием Федерального закона № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

В настоящее время управление экологическими рисками является неотъемлемой частью системы экологического менеджмента предприятий, осуществляемого в соответствии со стандартом ISO 14001 [111]. ISO 14001 не содержит жестких требований использования конкретных методов оценки и управления рисками, что дает предприятиям свободу выбора в данном вопросе. Однако общий подход к управлению рисками, включая экологические, описан в стандарте ISO 31000. Этот подход предполагает систематическую и сбалансированную оценку рисков с учетом всех факторов, которые могут повлиять на достижение целей предприятия. Он помогает компаниям определить вероятность возникновения различных рисков и их потенциальные последствия, что позволяет разрабатывать соответствующие меры по их управлению.

Международный стандарт ИЕС 31010 описывает наиболее распространенные методы оценки рисков, дает их краткую характеристику, оценивает их применимость на различных этапах управления рисками, а также определяет сильные и слабые стороны каждого метода. Это позволяет компаниям выбрать наиболее оптимальный метод, учитывающий специфику деятельности компании и ее потребности.

Представляется, что комплексное следование стандартам ISO 14001 и ISO 31000, а также использование методов, представленных в ИЕС 31010, дает возможность предприятиям осуществлять эффективное управление экологическими рисками, принимать обоснованные решения и обеспечивать устойчивое и ответственное ведение бизнеса с учетом требований защиты окружающей среды.

Как упоминалось выше, в Российской Федерации понятие экологического риска закреплено Федеральным законом № 7-ФЗ (в ред. от 26.03.2022) «Об охране окружающей среды», в соответствии с которым экологический риск – это вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера [87]. Оценка экологических рисков осуществляется с использованием точных и адекватных методов идентификации, анализа риска. Важную роль играют глубина и полнота методик, уровень детализации, квалификация и компетентность экспертов, привлекаемых для проведения оценки, а также степень эффективности использования цифровых технологий для обработки информации и обмена данными [117].

Управление экологическими рисками в горнодобывающей промышленности представляет собой сложный и важный процесс, направленный на принятие решений, способствующих минимизации отрицательных последствий для окружающей среды и здоровья человека. В целях эффективного управления экологическими рисками используются следующие методы:

– «уклонение от рисков». Предполагает исключение определенных деятельностей или процессов, которые могут повлечь за собой значительные экологические риски. В числе мер, подразумеваемых этим методом, отказ от использования определенных технологий или материалов, негативно влияющих на окружающую среду;

– «снижение рисков». Направлен на минимизацию вероятности возникновения экологических рисков или смягчение их последствий. В числе мер внедрение новых технологий, усовершенствование производственных процессов, обучение персонала по вопросам безопасности и экологии

– «сохранение (принятие) рисков». Подразумевает осознанный выбор предприятием принятия определенных экологических рисков с пониманием их последствий. В некоторых случаях избежать рисков может быть технически сложно или меры по их устранению оказываются экономически нецелесообразными, и предприятия могут принять решение сохранить эти риски на определенном уровне;

– «передача (перенос) рисков». Подразумевает делегирование ответственности за управление экологическими рисками другой стороне, например страховым компаниям или специализированным подрядчикам. Используется в случаях, когда предприятие не может обеспечить проведение необходимой экспертизы или не обладает ресурсами для управления определенными рисками;

– методы аналитической идентификации и диаграммы влияния. Позволяют анализировать и визуализировать экологические риски, процедуры оценки степени воздействия загрязнителей на экосистему позволяют более точно определить потенциальные последствия экологических рисков и выработать соответствующие контрмеры.

Важно отметить, что управление экологическими рисками необходимо рассматривать как долгосрочный процесс, который требует постоянного мониторинга и обновления стратегий. Эффективное управление экологическими рисками позволяет предприятиям не только минимизировать возможные расходы на устранение последствий аварий и экологических инцидентов, но также создает благоприятные условия для устойчивого развития предприятия и сохранения окружающей среды.

Таким образом, эффективное управление экологическими рисками требует комплексного подхода, учета всех факторов и определения приоритетов для разработки и реализации адекватных мероприятий по защите окружающей среды.

1.3. Геоэкологическое воздействие производственной каменной пыли на природную среду

Деятельность горных предприятий, включая карьеры и шахты, сопровождается процессом пылевыведения. На карьерах, где осуществляются взрывные работы для разрушения горных пород и добычи материалов, образуется большое количество пыли, распространяющейся в воздухе, который вдыхается рабочими. Пылевыведение возникает при транспортировке материалов, особенно при перемещении сыпучих материалов. Дробление материалов на карьерах также способствует образованию пыли, которая становится источником загрязнения воздуха на территории предприятия [127].

Таким образом, производственная пыль не только осложняет условия работы на предприятиях, но и негативно влияет на окружающую среду. Пыль переносится на значительные расстояния, в радиусе ее распространения оказываются населенные пункты, жители которых испытывают на себе ее воздействие, отражающееся на их здоровье.

Ввиду сказанного необходимость ведения строгого контроля и управления процессами пылеобразования на горных предприятиях имеет особую актуальность. В ряд наиболее важных мер должны быть включены мероприятия по предотвращению и снижению пылевыведения, обеспечивающие безопасные и экологически устойчивые условия работы на горнодобывающих предприятиях, в числе которых использование

пылеулавливающего оборудования, организация систем вентиляции, увлажнения воздуха для снижения концентрации пыли.

Исследователями в разное время были разработаны теоретические основы и практические решения по подавлению пыли на горнодобывающем производстве. Значительный вклад в решение данной проблемы внесли как отечественные, так и зарубежные ученые: Н. А. Фукс, П. А. Коузов, Н. А. Гаспарьян, А. П. Бульбашев, И. Н. Логачев, В. В. Недин, К. К. Ткачук, В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг, Е. И. Андрианов, Ф. Г. Банит, Х. Грин, В. Лейн, Я. Зайончковский, П. Уайт, С. Смит и др.

По мнению специалистов, глобальное потребление минерального сырья в мире достигло впечатляющего уровня – около 12 млрд т в год, в то же время из недр Земли ежегодно извлекается около 100 млрд т горных пород. Эти данные демонстрируют значимость минеральных ресурсов в современном мире и интенсивность их добычи и использования. В России, богатой природными ресурсами, объем добычи угля составляет около 259,9 млн т в год (данные Министерства энергетики РФ и Росинформугля), ежегодно добывается около 230 млн т металлических руд и около 1,4 млрд т стройматериалов. Эти цифры свидетельствуют о значительном вкладе России в мировую добычу и производство минерального сырья [110], а также о стремительном развитии и модернизации горнодобывающей отрасли, что ставит промышленность перед необходимостью более эффективно использовать минеральные ресурсы и оптимизировать их добычу.

Однако интенсификация добычи минерального сырья влечет за собой и ряд экологических и социальных проблем, обуславливающих необходимость обеспечения баланса между экономическими интересами и задачами сохранения окружающей природной среды. Поэтому разработка и внедрение устойчивых практик управления добычей и переработкой минеральных ресурсов является ключевым аспектом стратегии устойчивого развития горнодобывающей промышленности в России.

Производственная каменная пыль горных карьеров – это тонкий полидисперсный компонент твердых отходов, образующихся при дроблении каменной породы. Производственная каменная пыль – один из наиболее значимых и часто встречающихся неблагоприятных факторов, влияющих на окружающую среду, в частности в горном производстве [12].

Размер частиц пыли играет существенную роль в ее способности к детонации и нанесению вреда здоровью человека [44]. Чем мельче частица, тем она более подвержена дисперсии в воздухе и способна проникнуть в дыхательные пути и легкие человека, что

влечет серьезные последствия для его здоровья, поскольку накопление пыли в организме с течением времени может вызывать хронические заболевания.

Фракционный состав различных пород, таких как гранит, мигматит, мраморизованный известняк, нефрит, серпентинит, чароит и офиокальцит, в диапазоне от микрофльтрации до нанофльтрации определяется процессами механического разрушения горных пород под воздействием различных внешних факторов в технологических процессах горнодобывающих предприятий. Этот процесс приводит не только к изменениям размеров и геометрических характеристик исходной монолитной структуры породы, но также вызывает ее изменения [10].

В результате этих процессов образуются наноразмерные и микроразмерные частицы, которые получают наиболее глубоко измененное состояние. Эти частицы отличаются по форме, минералогии и структуре, что делает их уникальными и разнообразными [74]. При такой многообразности частиц каждая из них будет оказывать различное воздействие на окружающую среду как механически, так и физически.

Исследования, проведенные коллективом авторов [31; 51; 54; 59], показывают, что при вдыхании минеральных частиц пыли часть из них оседает в верхних отделах дыхательных путей и выводится из организма благодаря механизму «эскалатора» мукоцилиарного тракта, где мелкие частицы задерживаются и удаляются. Однако частицы размерами от 0,5 до 5 мкм, которые отличаются наибольшей агрессивностью, способны проникать глубоко в самые мелкие ветви бронхиального дерева и аккумулироваться там.

Таким образом, мельчайшие частицы пыли могут достигать самых удаленных участков легких, что приводит к повреждению дыхательных путей, воспалительным процессам и даже образованию рубцовой ткани. Это может вызвать различные заболевания дыхательной системы, включая пневмокониозы, силикозы, хронические пылевые бронхиты и другие заболевания, связанные с нанесением вреда легким. Предполагается, что микрочастицы пыли также могут иметь негативное влияние на другие органы и системы человеческого организма.

В процессе работы с горными материалами, пылевые частицы, содержащиеся в воздухе, попадают в респираторный тракт человека, где они фагоцитируются легочными макрофагами, которые являются клетками иммунной системы легких. После этого пыль оседает в интерстициях легочной ткани (пространство между альвеолами), а также в лимфатических сосудах и лимфоузлах корня легкого и средостения [1; 15]. По мнению некоторых исследователей, именно в этих местах происходит реальное депонирование минеральной пыли [23; 48].

Среди горняков распространено заболевание, известное как силикоз, который развивается из-за вдыхания пыли кварца (кремнезема), находящегося в свободном состоянии. В производственной пыли облицовочных и поделочных камней, которая образуется на горных карьерах, содержится от 40 до 80 % двуокиси кремния (SiO_2) в свободной форме [14]. Также пыль, возникающая при разработке мраморных и гранитных карьеров, вызывает различные легочные патологии, требующие особого внимания и контроля со стороны медицинских специалистов.

В связи с этим разработка и внедрение эффективных мер по контролю и снижению выбросов пыли на горнодобывающих предприятиях, а также обеспечению работникам соответствующей защиты в целях предотвращения вредного воздействия на их здоровье должны стать важной составляющей программы ответственного развития производства.

Предприятию необходимо сосредоточиться на повышении стандартов экологической безопасности и усовершенствовании мероприятий по контролю за содержанием пыли на рабочих местах, чтобы предотвращать возникновение заболеваний и поддерживать здоровье тех, кто работает в горнодобывающей промышленности и сопряженных с ней отраслях.

Результаты некоторых исследований показывают, что относительную безопасность для здоровья рабочих, занятых в горнодобывающей промышленности, может обеспечить снижение уровня пыли до $0,05 \text{ мг/м}^3$, а в дальнейшем до $0,01 \text{ мг/м}^3$ [58].

Несмотря на то, что основным фактором развития силикоза является пыль, существуют доказательства того, что и другие характеристики окружающей среды могут существенно влиять на возникновение этого заболевания у сотрудника горнодобывающего предприятия. Например, свежевзорванная порода, примеси других минералов в горной породе и глиняные компоненты, покрывающие поверхность породы, могут не только усложнять состав пыли, но и усиливать ее опасность для окружающей среды и людей, а также вносить свой вклад в развитие силикоза [19; 38].

В результате различных технологических процессов, применяемых на производстве по добыче каменного сырья (гранитов, мрамора, офиокальцитов, нефритов, чароитов и др.), способствующих увеличению объемов техногенных пылевых выбросов в окружающую среду, в частности в атмосферный воздух, появляется множество минеральных микро- и наночастиц, играющих негативную роль в росте заболеваемости. Опасность таких частиц состоит в том, что они преодолевают клеточный барьер и вызывают изменения в организме на клеточном уровне.

Особое место в системе изучения нанотоксичности минералов занимают биоиндикация и биомониторинг экологозависимых заболеваний (заболеваний,

возникновению которых способствует нарушение экологической обстановки в результате загрязнения элементов биосферы). Хотя исследования загрязнений атмосферного воздуха перешли на новый уровень в связи с возможностью выделения новых классов токсичности частиц нано- и микро размеров, механизм их воздействия однозначно еще не определен. При этом частицы пыли минералов размером от 1 до 100 нм представляют наибольшую опасность для человека и живых организмов [2; 24].

Чем мельче частица пыли, тем дольше она может оставаться во взвешенном состоянии в воздухе, что повышает вероятность ее участия во взрывных процессах. При взрыве газопылевоздушной смеси образующаяся ударная волна поднимает пыль, которая оседает на различных поверхностях и почве в районе горных разработок, чем создается опасная ситуация, поскольку поднятая пыль может стать источником последующих взрывов. В связи с этим предприятиям следует регулярно осуществлять наблюдение за уровнем запыленности в воздухе. Для этого используются специализированные системы мониторинга, позволяющие оперативно выявлять возможные угрозы и принимать соответствующие меры по предотвращению взрывов и снижению рисков.

Повышению эффективности борьбы с запыленностью воздуха способствует решение следующих задач:

- 1) изучение процессов образования и распространения пыли (для определения основных источников ее образования и путей распространения в окружающей среде);
- 2) разработка мероприятий и технологий, направленных на сокращение образования пыли на различных стадиях добычи, транспортирования и переработки горной массы;
- 3) устранение уже образовавшейся пыли и контроль за ее объемами в воздухе.

Такой комплексный подход позволит существенно снизить риски и минимизировать отрицательное воздействие пыли на здоровье работников и окружающую среду, что особенно важно для безопасного функционирования горнодобывающих предприятий и защиты здоровья всех вовлеченных в производственные процессы людей.

Это обстоятельство актуализировало необходимость углубленного изучения микро- и наночастиц производственной каменной пыли, образующейся при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней, оказывающих воздействие на окружающую среду, чему и посвящено настоящее диссертационное исследование.

Выводы по главе

Анализ современного состояния проблем обеспечения геоэкологической безопасности горных карьеров облицовочных и поделочных камней показал следующее.

Обзор научной литературы и результатов исследований позволили определить направления горного производства, требующие пристального внимания при разработке мероприятий по снижению негативного влияния на окружающую среду.

Предприятия по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней являются источником негативного воздействия на окружающую среду и характеризуются высоким уровнем геоэкологических рисков, проявляющихся в виде воздействия на земельные ресурсы, недра и почвы, на атмосферный воздух, подземные и поверхностные воды, растительный и животный мир.

Проблемы пылевой нагрузки в настоящее время актуальны, и реализация существующих конструктивных решений по ее подавлению на практике еще недостаточна, пылевые выбросы и их концентрация в атмосферном воздухе продолжают увеличиваться.

Основным источником загрязнения атмосферного воздуха на горнодобывающих предприятиях по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней является производственная каменная пыль горных пород.

В связи с вышеизложенным **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.

Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Характеристика объектов исследования

Облицовочные и поделочные полезные ископаемые представляют собой определенную категорию полезных ископаемых, которые включены в специальные перечни. В соответствии с пунктом 6.1 Закона Российской Федерации от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 «О недрах» указанные перечни разрабатываются федеральными органами государственной власти, ответственными за регулирование отношений в области использования недр, совместно с субъектами Российской Федерации [15]. Эти виды полезных ископаемых играют ключевую роль в ресурсном потенциале России в целом и ее регионов в частности. Облицовочные и поделочные ископаемые широко применяются в строительстве, архитектуре, декоративном искусстве, производстве ювелирных изделий и других отраслях промышленности. Они используются для оформления зданий и сооружений, создания уникальных декоративных элементов, а также производства ценных украшений.

Россия обладает богатыми природными запасами облицовочных и поделочных ископаемых, и их добыча и использование имеют важное экономическое значение для страны. Эти ресурсы способствуют развитию строительной и декоративной отрасли, созданию рабочих мест и привлечению инвестиций. Однако необходимо учитывать, что разработка этих ископаемых оказывает воздействие на окружающую среду, поскольку требует проведения геолого-разведочных работ и горнодобывающих операций. При их производстве важно соблюдать экологические стандарты, а процесс добычи и использования облицовочных и поделочных полезных ископаемых должен быть урегулирован в целях соблюдения баланса между развитием отрасли и сохранением природных ресурсов.

Около 66 % от общего числа горнодобывающих предприятий занимаются добычей облицовочных и строительных камней. В 2021 г. в России было зарегистрировано почти 6 тысяч юридических лиц, активно занимающихся добычей облицовочных и поделочных камней. Эти предприятия ведут свою деятельность открытым, т. е. карьерным, способом. На территории этих предприятий также функционирует примерно тысяча обогатительных фабрик, установок и сортировок, осуществляющих переработку добытого сырья, что составляет примерно 12 % от общего числа российских предприятий [49; 52; 88].

Все месторождения полезных ископаемых подразделяются на серии, группы и классы в соответствии с генетической классификацией, предложенной еще в 1976 г. В. И. Смирновым (таблица 2.1.).

Таблица 2.1 – Сводная генетическая классификация месторождений полезных ископаемых (по В. И. Смирнову [46])

Серия	Группа	Класс	
Эндогенная	Магматическая	Полномагматический Ликвационный Раннемагматический Собственно магматический, или ортомагматический Позднемагматический	
	Флюидно-магматическая	Карбонатитовый Пегматитовый	
	Постмагматическая	Пневматолитовый	Скарновый Альбититовый Грейзеновый
		Гидротермальный	Плутогенный Вулканогенный
Экзогенная	Экзогенно-магматогенная	Седиментационно-гидротермальный Фильтрационно-гидротермальный	
	Выветривания	Остаточный Переотложенный Элювиальный Делювиальный Пролувиальный Аллювиальный Морской и озерный Гляциальный (моренный и флювиогляционный)	
	Осадочная	Механический Химический Биохимический Вулканогенно-осадочный	
	Фильтрационная	Грунтово-фильтрационный Инфильтрационный Эксфильтрационный	
Метаморфогенная	Экзогенно-метаморфогенная	Метаморфизованный Зеленосланцевый	
	Метаморфическая	Регионального метаморфизма Контактового метаморфизма Амфиболитовый Гранулит-эклогитовый Импактитовый	
	Магматогенно-метаморфогенная	Метаморфогенно-гидротермальный Ультраметаморфический	

Однако необходимо отметить дискуссионность генетической классификации месторождений полезных ископаемых, поскольку далеко не все процессы рудообразования хорошо изучены. Помимо генетической классификации, широко используется классификация Н. И. Еремина, согласно которой полезные ископаемые делятся на три типа: топливные, рудные и нерудные (рисунок 2.1).

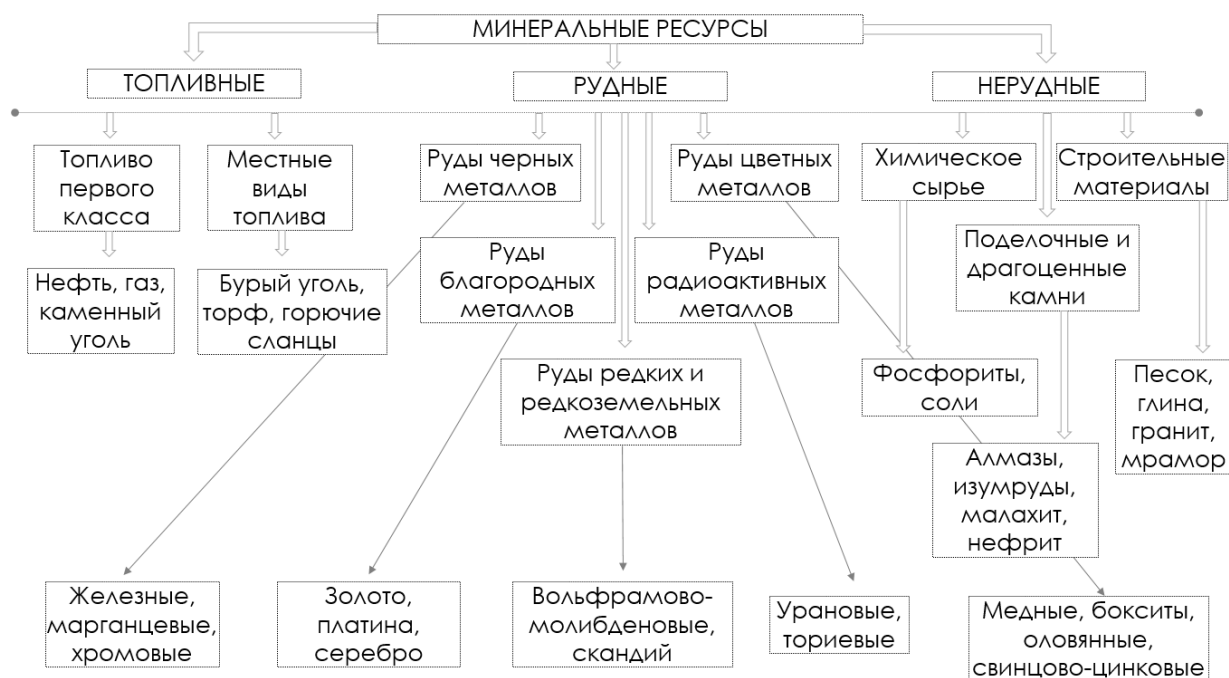


Рисунок 2.1 – Классификация полезных ископаемых (по Н. И. Еремину)

Для нашего исследования были выбраны несколько основных видов полезных ископаемых, относящихся к облицовочным, – гранит, мигматит, мраморизованный известняк, кроме того, рассмотрены и нефрит, чароит, серпентинит и офиокальцит. По промышленной систематизации полезных ископаемых [15] они относятся к нерудным и классифицируются как поделочные камни (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Горные породы, выбранные для исследования

В качестве объектов исследования были выбраны пять месторождений на территории Иркутской области и Республики Бурятия, где добываются перечисленные выше полезные ископаемые. Достоверность выбора указанных объектов объясняется данными ежегодной переоценки ESG Risk Rating [104]. Ниже представлена таблица 2.2, содержащая информацию о потенциальных экологических рисках на выбранных объектах добычи в зависимости от уровня содержания производственной пыли.

Таблица 2.2 – Потенциальные экологические риски на выбранных объектах добычи в зависимости от уровня содержания производственной пыли.

Номер	Объект добычи	Экологические риски объекта	Уровень пыли производства
1	Ангасольское месторождение гранитов и мигматитов	Осыпание пород, заболевания дыхательных путей от пыли	Высокий
2	Месторождение «Перевал» мраморизованного известняка	Нарушение экосистемы, негативное воздействие на природу	Высокий
3	Алзагайское месторождение офиокальцита	Взрывоопасные ситуации, аномальные выбросы газов	Низкий
4	Месторождение чароита «Сиреневый камень», участок «Старый»	Обрушение горных пород, повреждение прилегающей территории	Средний
5	Оспинское месторождение нефрита	Негативное воздействие на природу, угроза биоразнообразию	Низкий

Выбор данных объектов для нашего исследования обусловлен их территориальной принадлежностью и факторами образования пылевых выбросов в условиях добычи и обработки облицовочных и поделочных камней.

Выбранные объекты характеризуются различным уровнем экологического риска, методика оценки влияния их деятельности проверена вне зависимости от типа производства и является достоверной.

Объект исследования № 1. Ангасольское месторождение гранитов и мигматитов, расположенное в Слюдянском районе Иркутской области (Российская Федерация), находится на расстоянии приблизительно 53 км к юго-востоку от города Шелехова и 10

км к северо-востоку от города Слюдянки. Месторождение занимает площадь в 0,4 км к северу от железнодорожной станции Ангасолка и находится в 2,2 км от берега озера Байкал, на левом склоне пади Правая Ангасолка.

История эксплуатации месторождения началась в конце 40-х гг. прошлого столетия с разработки придорожного скального выхода. Постепенно эксплуатация Ангасольского месторождения гранитов и мигматитов приняла планомерный характер, и с 1957 г. здесь осуществляется активная добыча. Важным этапом в развитии месторождения стало введение в 1981 г. в эксплуатацию завода производительностью 350 тыс. куб. м щебня в год. Месторождение Ангасольское обладает значительным потенциалом гранитов и мигматитов, что делает его ключевым ресурсом для строительной и инфраструктурной отрасли. С момента открытия и введения в эксплуатации месторождение сыграло важную роль в обеспечении строительных и дорожных работ сырьем высокого качества.

Ангасольский щебеночный завод производит щебень семи фракций из горных пород месторождения с одноименным названием. Месторождение разрабатывается одним карьером. Территория, которую занимает месторождение, расположена на возвышенности – на одном из массивов Прибайкальского хребта. Глубина карьера – от 20 м вдоль его западного борта до 70 м вдоль восточного (рисунки 2.3, 2.4). В настоящее время горные работы в карьере развиваются как в глубину, так и за счет расширения его восточного борта.



Рисунок 2.3 – Месторождение Ангасольское (добыча гранитов и мигматитов)



Рисунок 2.4 – Территория Ангасольского карьера (июль 2020 г.)

Ангасольский щебеночный завод всегда динамично развивался, и за время его функционирования на нем были проведены несколько реконструкций и модернизаций оборудования, а также внедрены новые передовые технологии. Эти меры способствовали значительному увеличению объемов производства готовой продукции. С мощности в 350 тыс. куб. м в год завод повысил свою производительность до 800 тыс. куб. м готовой продукции в год.

С 2008 г. Ангасольский щебеночный завод стал филиалом крупной компании «Первая нерудная компания», созданной на активы ОАО «Российские железные дороги». Таким образом, завод стал частью крупной структуры, что позволило ему расширить свои возможности, улучшить качество производимой продукции и усилить свою конкурентоспособность на рынке.

Благодаря активному развитию, реконструкциям и модернизации Ангасольский щебеночный завод смог существенно увеличить свои объемы производства и занять место значимого игрока на рынке строительных материалов. Его продукция стала незаменимым ресурсом для строительства дорог, зданий и других инфраструктурных объектов Сибири, что способствовало развитию строительной отрасли.

Вскрышными породами в период строительства карьера и в основной период ведения горных работ сформировано два внешних отвала на северо-западе и юго-западе

от карьера. Добытый гранит перерабатывают на одном стационарном дробильно-сортировочном комплексе. К погрузочным конвейерным эстакадам комплекса подведен один железнодорожный путь, по которому подают думпкары под погрузку товарного щебня с обратным выходом груженных составов с остановочного пункта Поворот Восточно-Сибирской железной дороги. На территории комплекса имеется возможность отгрузки фракционированного щебня с открытых складов погрузчиками на автомобильном шасси в магистральные автосамосвалы потребителей [80].

Объект исследования № 2. Месторождение мраморизованного известняка «Перевал» находится у юго-западной оконечности озера Байкал в 5 км к юго-востоку от г. Слюдянки Иркутской области и в 7 км к северо-востоку от железнодорожной станции Слюдянка-1, а также в 7,8 км от берега озера Байкал на территории Слюдянского района Иркутской области в долине реки Похабиха.

История эксплуатации месторождения начинается в конце 50-х гг. прошлого века с разработки мраморизованного известняка для получения цемента. Постоянная эксплуатация месторождения «Перевал» началась с 1957 г. и продолжается по сегодняшний день [36]. Годовая производительность карьера составляет порядка 1 млн т добываемого сырья. При такой мощности разработки запасы полезного ископаемого иссякнут ориентировочно через сто лет. Месторождение «Перевал» относится к мраморному месторождению «Слюдянское», мощность его продуктивного слоя составляет 350 м, протяженность – около 10 км. Разработкой и эксплуатацией карьера занимается ОАО «Ангарскцемент». На предприятии используется законченный производственный цикл по добыче, дроблению, отгрузке и дальнейшей переработки сырья (рисунки 2.5, 2.6).

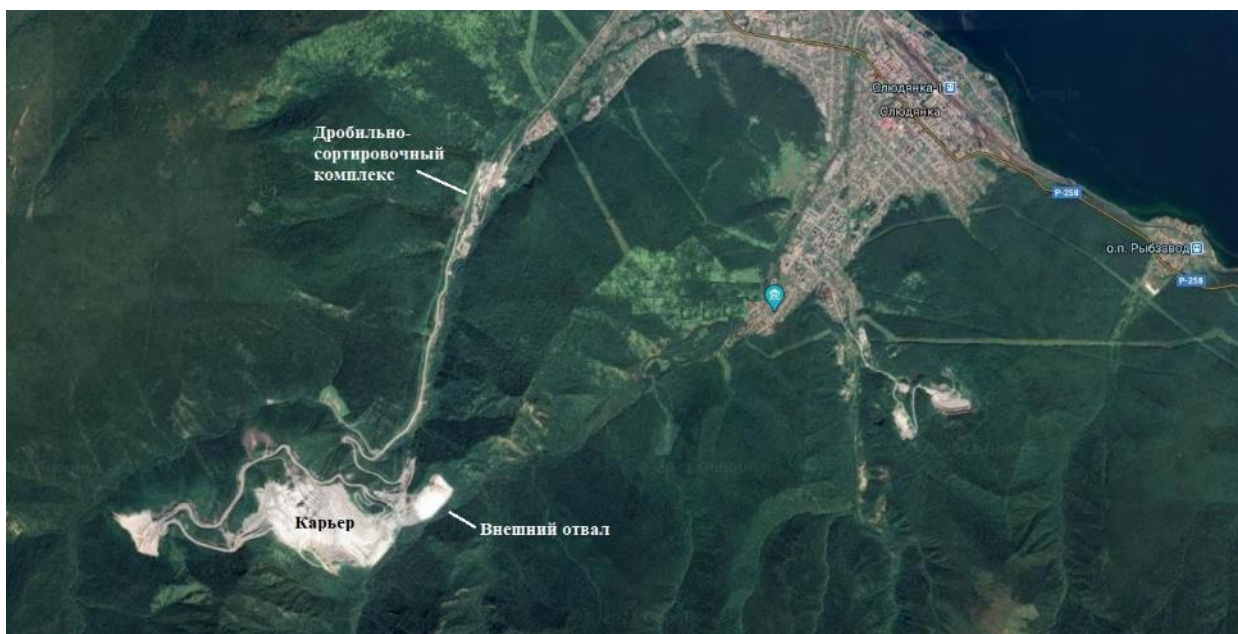


Рисунок 2.5 – Месторождение «Перевал» (добыча мраморизованного известняка)

Мраморный карьер «Перевал» производит белый дробленый мрамор для использования в строительстве, производстве цемента, для применения в декоративных штукатурках, для отделки наружных и внутренних поверхностей различных конструкций, для изготовления плит, декоративной плитки и мозаичных полов, для отсыпки поверхностей. Дробленый мраморизованный известняк выпускается во фракциях от 5 до 20 мм, от 40 до 70 мм, от 0 до 5 мм и во фракции от 0 до 30 мм для производства цементного сырья.



Рисунок 2.6 – Территория карьера «Перевал» (июль 2020 г.)

Вскрышные породы в период эксплуатации карьера укладываются в два внешних отвала, отсыпаемых на северо-востоке и юго-западе от карьера. Добытое сырье перерабатывается на одном стационарном дробильно-сортировочном комплексе, который располагается в 3 км от карьера. По погрузочно-разгрузочным конвейерам комплекса добытое сырье в вагонетках перемещается на горно-обогатительную фабрику, где перерабатывается. Помимо вагонеток, сырье на фабрику попадает посредством перевозки на грузовых автомобилях с территории карьера на территорию дробильно-сортировочной фабрики [11].

Объект исследования № 3. Алзагайское месторождение офиокальцита находится в 10 км к юго-востоку от села Онот Черемховского района Иркутской области, в 91,9 км от г. Черемхово и в 1,2 км от реки Алзагайка на территории Черемховского района на правом склоне реки Онот (рисунок 2.7).

Эксплуатация месторождения начата в 90-х гг. прошлого столетия. Месторождение Алзагайское не относится к традиционным карьерам по добыче облицовочных и поделочных камней, порода такого типа слагает отдельные залежи (жилы) размером от 30 до 50 м, мощностью более 200 м. Протяженность таких жил может достигать от 3 до 5 км. Всего на Алзагайском месторождении семь залежей, в которых выделяются различные тела офиокальцита мощностью от 1 до 3,5 м. Добыча породы ведется открытым способом двух типов: месторождения вскрываются канавой или небольшим карьером, отвалы на таких карьерах практически не образуются, так как дробления на мелкие фракции на участках не производится. Порода разрушается взрывным способом на блоки от 1 до 3 м и перевозится в таком виде на промышленный завод по его обработке [63]. На заводе порода режется на более мелкие блоки и обрабатывается для изготовления поделочных изделий.

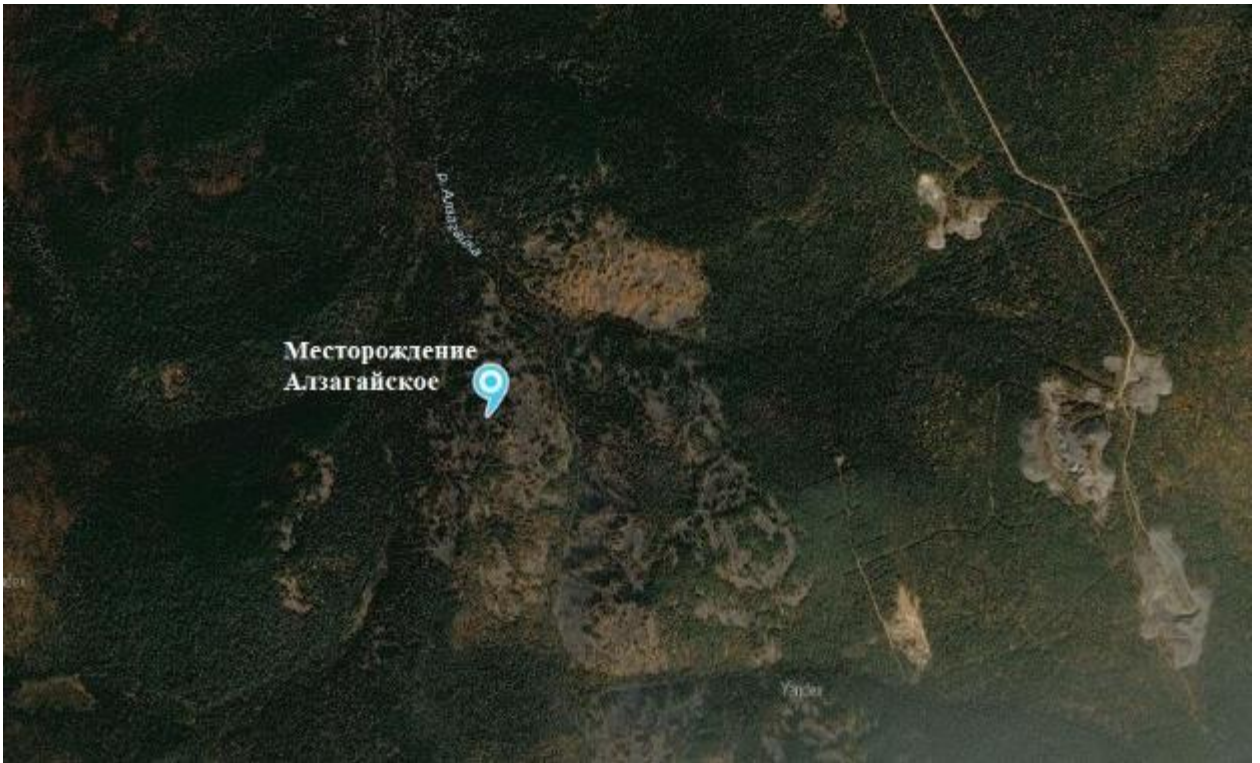


Рисунок 2.7 – Месторождение Алзагайское (добыча офиокальцита)

Лицензия на разработку и эксплуатацию месторождения Алзагайское принадлежит ОАО «Байкалкварцсамоцветы». Обработка офиокальцита Алзагайского месторождения производится на заводе по обработке поделочных камней, принадлежащего также ОАО «Байкалкварцсамоцветы».

Объект исследования № 4. Месторождение чароита «Сиреневый камень», участок «Старый», находится на пересечении границ между Иркутской областью, Республикой Саха (Якутией) и Забайкальским краем. Участок «Старый» месторождения «Сиреневый камень» расположен на левом борту истока ручья Дитмаровский на водоразделе в 40 км к югу от деревни Перевоз Иркутской области и в 60 км к юго-востоку от реки Чара, а также в 300 км к востоку от города Олекминска Республики Саха (Якутия) (рисунки 2.8, 2.9).

Участок «Старый» месторождения «Сиреневый камень» по добыче чароита не является традиционным карьером по добыче облицовочных и поделочных камней, порода такого типа слагает отдельные залежи (жилы) размером от 10 до 70 м, мощностью более 300 м. Протяженность жил может достигать от 3 до 5 км. Всего на месторождении «Сиреневый камень» четыре участка добычи чароита: «Старый», «Новый», «Грозовой» и «Магистральный», на которых располагаются многочисленные залежи различных типов тел чароита мощностью от 1 до 10 м.

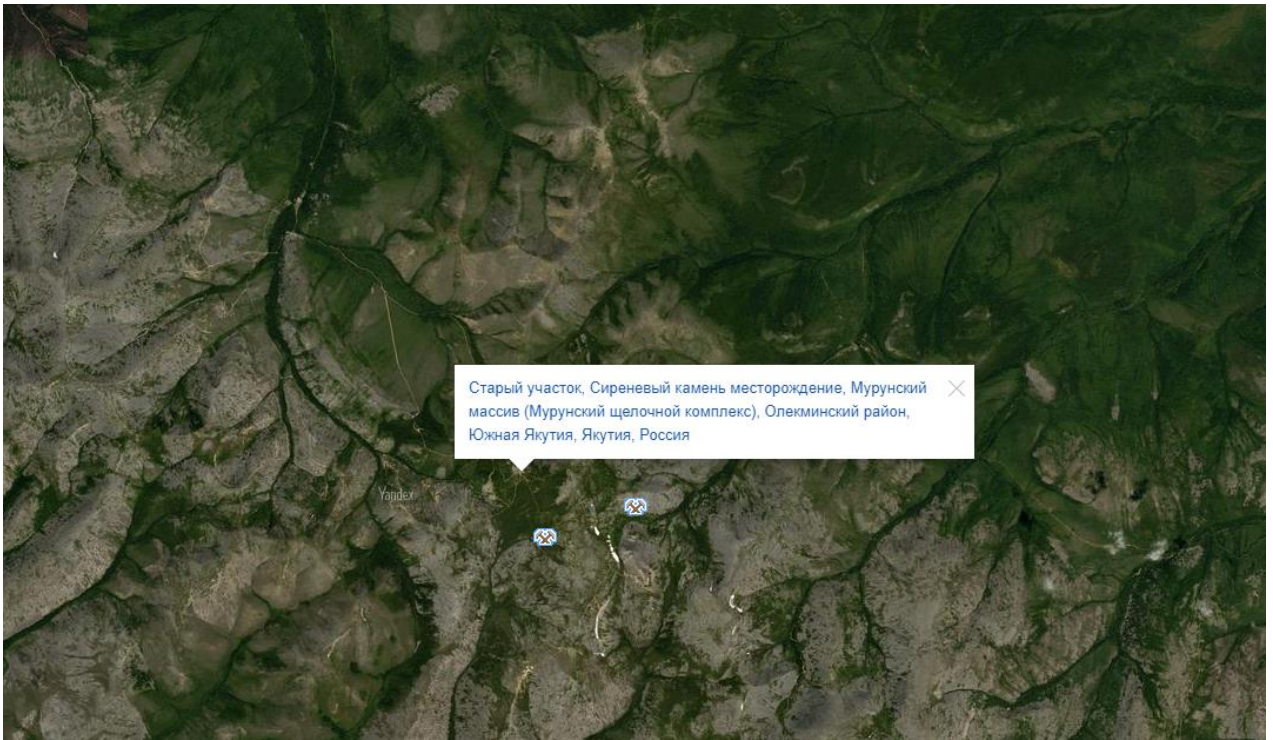


Рисунок 2.8 – Месторождение «Сиреневый камень», участок «Старый»
(добыча чароита)



Рисунок 2.9 – Территория участка «Старый», месторождения «Сиреневый камень»
(электронный ресурс)

Добыча породы ведется открытым способом двух типов: месторождения вскрываются канавами или небольшим карьером, отвалы на таких карьерах практически не образуются, так как дробление на мелкие фракции на участках не производится.

Порода разрушается взрывным способом на блоки от 1 до 3 м и перевозится в таком виде на промышленный завод по его обработке [40]. На заводе порода режется на более мелкие блоки и обрабатывается для изготовления поделочных изделий.

Лицензия на разработку и эксплуатацию участка «Старый» месторождения «Сиреневый камень» принадлежит ОАО «Байкалкварцсамоцветы». Обработка чароита данного месторождения производится на заводе по обработке поделочных камней ОАО «Байкалкварцсамоцветы».

Объект исследования № 5. Оспинское месторождение нефрита, одно из крупнейших промышленных месторождений нефрита в России, находится в 50 км к северо-западу от поселка Монды Тункинского района Республики Бурятия, в 3 км к северо-западу от деревни Самарта и в 74,5 км к юго-востоку от поселка Аршан Тункинского района Республики Бурятия, в верховьях реки Ильчир – правого притока реки Онот, в 85 км к северу от поселка Кырен, в 180 км к западу от Иркутска (рисунки 2.10, 2.11).

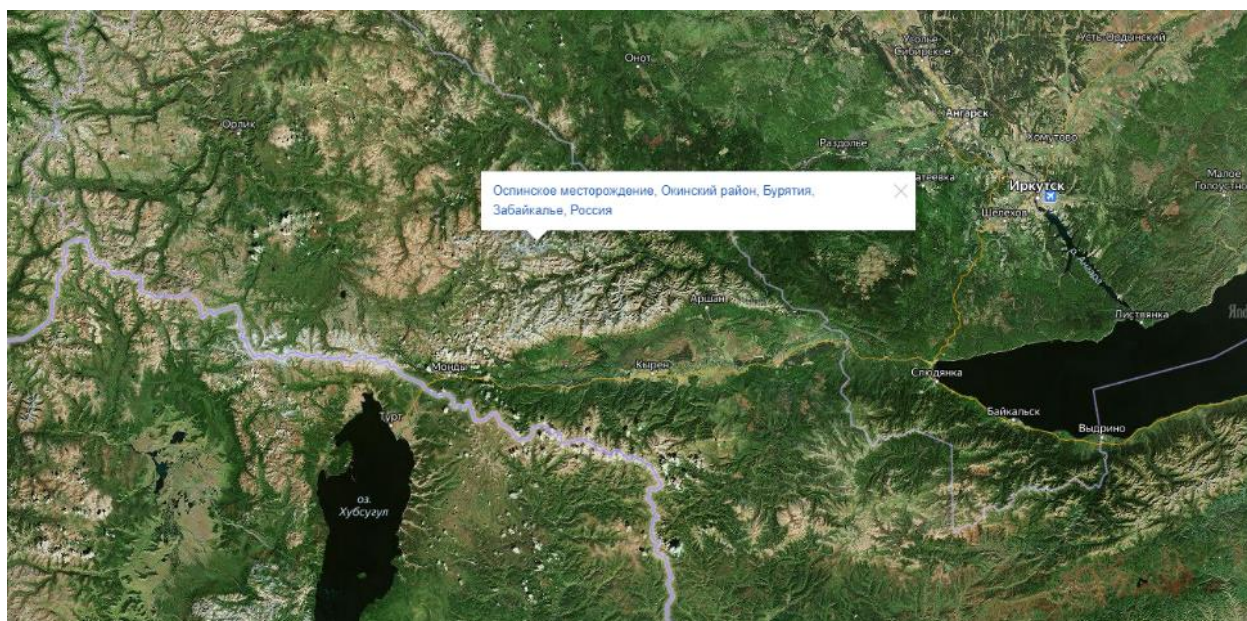


Рисунок 2.10 – Месторождение Оспинское (добыча нефрита)



Рисунок 2.11 – Территория месторождения Оспинское (электронный ресурс)

Эксплуатация месторождения начата в 90-х гг. прошлого столетия. Месторождение Оспинское не является традиционным карьером по добыче облицовочных и поделочных камней, порода такого типа слагает отдельные залежи (жилы) размером от 10 до 70 м, мощностью более 400 м. Протяженность жил может достигать от 2 до 7 км. Основная доля запасов нефрита сосредоточена в одной из крупных жил – в жиле № 7, запасы которой составляют порядка 6 тыс. т сырья. Добыча породы ведется открытым способом двух типов: месторождения вскрываются канавами или небольшим карьером, отвалы на таких карьерах практически не образуются, так как дробление на мелкие фракции на участках не производится. Порода разрушается взрывным способом на блоки от 1 до 3 м и перевозится в таком виде на промышленный завод по его обработке [20]. На заводе данная порода режется на более мелкие блоки и обрабатывается для изготовления поделочных изделий.

Лицензия на разработку и эксплуатацию месторождения Оспинское принадлежит ОАО «Байкалкварцсамоцветы». Обработка нефрита данного месторождения производится на заводе по обработке поделочных камней ОАО «Байкалкварцсамоцветы».

На месторождениях нефрита, помимо нефритовых жил, могут располагаться жилы серпентинита в единичных проявлениях. Для нашего исследования также в качестве

объекта исследования дополнительно был взят участок на Оспинском месторождении, где ведется разработка жилы серпентинита.

Таким образом, в качестве объектов исследования были выбраны пять месторождений полезных ископаемых: Ангасольское по добыче гранита и мигматита, месторождение «Перевал» по добыче мраморизованного известняка; три месторождения по добыче поделочных камней – участок «Старый» месторождения «Сиреневый камень» по добыче чароита, Алзагайское месторождение по добыче офиокальцита и Оспинское месторождение по добыче нефрита с проявлениями серпентинита.

Все выбранные объекты исследования так или иначе являются источниками загрязнения атмосферного воздуха производственной каменной пылью пород. Добыча различных материалов, таких как гранит, мигматит, мраморизованный известняк, офиокальцит, чароит, нефрит и серпентинит, сопровождается значительными выбросами производственной пыли в виде микро- и наночастиц. Проекты нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу показывают, что на предприятиях, занимающихся добычей данных пород, ежегодно формируется от 4,5 до 120 т пылевых выбросов в атмосферу (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Источники выбросов загрязняющих веществ на объектах по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней

№ п/п	Объект добычи облицовочных и поделочных камней	Вещество	Суммарный выброс, т/год
1	Ангасольское месторождение гранитов и мигматитов	Пыль неорганическая 20–70 % SiO ₂ (породная)	119,55
2	Месторождение «Перевал» мраморизованного известняка	Пыль неорганическая 20–70 % SiO ₂	118,94
3	Алзагайское месторождение офиокальцита	Пыль неорганическая 20–70 % SiO ₂	4,48
4	Месторождение чароита «Сиреневый камень», участок «Старый»	Пыль неорганическая 20–70 % SiO ₂	3,38
5	Оспинское месторождение нефрита	Пыль неорганическая 20–70 % SiO ₂	3,94

В ходе данного исследования было обнаружено, что на всех рассматриваемых объектах производственной деятельности образуется каменная пыль в форме микро- и наночастиц. Подтверждение этого факта описано в разделе 2.3.3. Эта пыль представляет

собой сложный полидисперсный компонент, состоящий из тонких микро- и наночастиц, которые могут быть как естественного, так и техногенного образования.

В большинстве случаев в состав каменной пыли входят минеральные частицы горных пород, которые добываются на месторождениях. Эти частицы попадают в пыль в результате выемочно-погрузочных и вскрышных работ, перемещения и экскавации сырья, а также дробления и пересыпки материала.

Важно отметить, что, помимо частиц из естественных источников, каменная пыль также содержит антропогенные частицы, образовавшиеся в результате износа шин технологического транспорта, сгорания топлива работающих двигателей, износа тормозных колодок, работы оборудования по измельчению горной породы и других производственных процессов.

Пыль, содержащая микро- и наночастицы, представляет особый интерес, так как эти частицы обладают высокой мобильностью и могут проникать в дыхательные пути человека, что может привести к патологическим состояниям. Особенно важно учитывать наличие антропогенных частиц, так как они могут содержать токсичные вещества и являться потенциальными источниками загрязнения окружающей среды. Это диктует необходимость принятия соответствующих мер контроля и минимизации образования каменной пыли с особым вниманием к антропогенным источникам. Такие меры могут включать совершенствование технологических процессов, применение современных фильтрационных систем, а также обеспечение надлежащей вентиляции и соблюдение нормативов предельно допустимых выбросов. Только при таком подходе можно обеспечить экологическую безопасность и сохранить здоровье работников и населения, проживающего вблизи объектов добычи полезных ископаемых [30].

Пыль, содержащая микро- и наночастицы, особенно антропогенные частицы, придает токсичности каменной пыли горных карьеров. Однако на производстве должного внимания изучению данного вида пыли не уделяется, она не учитывается при выявлении причин возникновения профессиональных заболеваний сотрудников, нормативы по ее допустимому содержанию на предприятиях не вводятся, не проводится усовершенствований технологического процесса для снижения пылеобразования и выбросов такого рода пыли в окружающую среду.

В связи с этим на примере перечисленных выше объектов исследования будет показана необходимость изучения фракционного, дисперсионного, химического состава пыли для определения влияния такого рода частиц на окружающую среду, а также проведен сравнительный анализ пылеобразования на предприятиях по добыче и обработке

облицовочных камней с выбросами до 120 т в год и на предприятиях по добыче поделочных камней с пылевыми выбросами до 4,5 т в год.

2.2. Технология открытой разработки и добычи облицовочных и поделочных камней

Добыча облицовочных и поделочных камней производится открытым способом, который включает в себя вскрышные и добычные виды работ. Вскрышные работы осуществляются путем снятия почвенно-растительного слоя и удаления неликвидных (необогатенных) пород. Применение вскрышных работ открывает доступ к полезному ископаемому, залегающему на территории разработки.

Добычные работы производятся методом извлечения полезного ископаемого из недр земли буровзрывным способом и карьерной экскавацией. По периметру будущего карьера образуется каскад уступов, на которых проводятся плановые буровзрывные работы, в результате которых разрушается горная порода. По окончании буровзрывных работ производится экскавация породы для погрузки ее в карьерные самосвалы и дальнейшей транспортировки в корпуса дробления и корпуса сортировки. После дробления и сортировки фракций по размеру порода отправляется на склад хранения до дальнейшей передачи сырья потребителю.

При передаче потребителю сырье пересыпается в вагоны или самосвалы и перевозится до условленного пункта назначения потребителя. Типовая схема добычи облицовочных и поделочных камней изображена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Типовая схема добычи и переработки облицовочных и поделочных камней

На каждом из этапов технологического цикла добычи и обработки облицовочных и поделочных камней выделяется неорганическая пыль, отбор проб которой и изучение на рассматриваемых объектах исследования производили такими методами, как: отбор проб пыли гравиметрическим (весовым), седиментационным, воздушным и комбинированным способами; изучение собранной пыли методом мембранной фильтрации для фракционирования и выделения частиц микро- и наноразмеров, методом рентгеновской спектроскопии для изучения структуры частиц, методом электронной микроскопии для получения наглядного изображения размеров и формы исследуемых частиц пыли, методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой для определения химического и элементного состава исследуемых частиц, а также методом рентгеноструктурного анализа для определения кристаллической структуры частиц пыли.

Для оценки экологического риска, связанного с воздействием открытых горных работ на окружающую среду, использовались геоинформационные технологии, которые позволяют проводить картирование и анализ пространственного распределения пылевого загрязнения. Применение геоинформационных технологий при решении данной проблемы имеет ряд преимуществ, так как позволяет более точно и наглядно представить результаты исследования.

Геоинформационные технологии позволяют составлять карты уровней пылевого воздействия на основе собранных данных, отображая концентрации загрязняющих веществ на реальной топографической основе. Это позволяет показать пространственное распределение пылевых частиц и их концентраций на различных участках окружающей среды.

Кроме того, с помощью геоинформационных технологий можно проводить расчеты площади участков, на которых отмечаются различные уровни загрязнения, что помогает составить рейтинг загрязненных площадей и сравнить их между собой по степени воздействия на окружающую среду. Для проведения анализов и расчетов использовался программный комплекс Golden Software Surfer, который предоставляет широкие возможности по визуализации данных и созданию интерактивных карт.

Каждый из перечисленных методов исследования будет описан ниже, в том числе показаны результаты исследования с применением конкретного метода, обсуждены его особенности и значимость для оценки экологического риска, связанного с горными работами.

2.3. Характеристика методов исследования

2.3.1. Воздушный способ отбора проб с помощью электроаспирационного устройства и индивидуального респиратора

Для проведения исследования и отбора проб воздуха использовалось электроаспирационное устройство «Экотех-Урал» ПА-300М, которое предназначено для сбора проб воздуха в рабочей зоне помещений, а также на открытых пространствах. Основным методом исследования состава воздушных проб было пропускание большого объема воздуха через тонкодисперсный фильтр.

Процесс отбора проб воздуха осуществлялся с использованием фильтров или поглотителей. Чтобы получить точную навеску пыли, фильтры взвешивались до и после сбора проб. Принцип эксперимента заключался в следующем: фильтр помещался в фильтродержатель, а гибкий шланг соединялся с входным штуцером аспиратора. Затем воздух прогонялся через фильтр, и все содержащиеся в воздухе примеси оседали на нем.

Определение объема воздуха, прокачанного через фильтр, производилось путем измерения скорости прохождения воздуха и времени отбора пробы. После проведения эксперимента количество осевшей на фильтре пыли определяли с помощью весового метода.

Такой подход к сбору и анализу воздушных проб позволяет получать точные данные о содержании пылевых частиц в окружающей среде и оценивать уровень загрязнения воздуха на рабочих местах и в других местах проведения горных работ.

Респираторный (комбинированный) способ отбора проб опирается на воздушный и весовой способы отбора проб. Пробы отбирались с внешней поверхности респираторов типа «Полумаска фильтрующая (респиратор) противоаэрозольная НЕВА-210 с клапаном выдоха» и типа «Полумаска фильтрующая (респиратор) противоаэрозольная ЗМ 8132 с клапаном выдоха», которые носили работники горнодобывающих предприятий во время выполнения своих трудовых обязанностей. Респираторы взвешивались до и после использования для получения весовой пробы с поверхности респиратора, осевшей в процессе работы. Осажденная фракция каменной пыли анализировалась методами мембранной фильтрации и химического анализа.

2.3.2. Гравиметрический (весовой) метод измерений и весовая седиментация

Гравиметрический (весовой) метод отбора проб основан на точном измерении массы отбираемого компонента, образовавшегося в виде навески известного отбираемого образца. Гравиметрический метод реализуется с помощью испарения, отгонки, сублимации или осаждения. Для каменной пыли подходит способ осаждения на заготовленных стеклянных бюксах. Основным объемом проб отобран весовым методом, поскольку в большинстве случаев он позволяет определить массовую концентрацию пыли, что особенно важно при проведении контроля состояния запыленности атмосферного воздуха. Для этого стеклянные бюксы раскладывались на рабочих местах горнорабочих, в течение заданного времени на них осаждалась пыль, образующаяся в процессе работы персонала. Стеклянные бюксы до эксперимента и после взвешивались на аналитических весах, масса отобранного после осаждения образца записывалась в журнал отбора проб.

Весовая седиментация применялась при проведении снеговой съемки на основе геохимической методики. Опробование проводилось в конце зимнего сезона, это обеспечивало наибольшую продолжительность снегонакопления. При отборе проб выкапывался шурф на всю мощность снегового покрова, фиксировались размеры шурфа и отбирались снеговые пробы весом 5–7 кг, что соответствовало примерно 3–4 л талой воды. Снеговая вода фильтровалась, в результате чего на фильтре оставалась осажденная фракция пыли, используемая в дальнейшем исследовании.

2.3.3. Мембранная фильтрация

Метод мембранной фильтрации представляет собой технологию, которая использует мембраны с порами различных размеров для выделения различных фракций частиц из смесей. Этот метод широко применяется для изучения частиц в окружающей среде, особенно в жидких средах.

Принцип работы метода заключается в том, что образец окружающей среды, содержащий частицы различных размеров, проходит через специальную мембрану с порами определенных размеров. Мембрана действует как фильтр, который позволяет пропускать частицы определенного размера и удерживать более крупные или мелкие частицы. Таким образом, фракции частиц разделяются на основе их размеров. После прохождения образца через мембрану каждая фракция частиц остается на своей стороне мембраны. Это дает возможность изучать и анализировать каждую фракцию независимо

от других. Метод мембранной фильтрации позволяет получить информацию о размерах и концентрации различных частиц в образце, что может быть важным для определения загрязнения воздуха, воды или других сред. Этот метод широко используется в научных исследованиях и при мониторинге окружающей среды, а также в промышленности и медицине для выделения и изучения различных частиц и веществ с определенными размерами и свойствами. В представленной работе исследования пыли и выбросов на горных предприятиях методом мембранной фильтрации позволяют определить фракцию микро- и наночастиц, что важно для оценки их влияния на окружающую среду [91; 101; 112].

Фракции наночастиц каменной производственной пыли выделили с использованием фильтра с порами диаметром 0,2 мкм, фракционирование проводили на фильтрах с порами диаметром от 0,05 до 10 мкм для разделения на фракции и изучения распределения элементного состава выделившихся образцов. Фракционированию подвергались пробы, которые были отобраны ранее на рассматриваемых карьерах. Разделение данным методом является достаточно сложным экспериментальным процессом, результаты которого могут быть слегка искажены за счет образования осадка на фильтре и забивания пор вследствие взаимодействия осаждаемого материала с материалом, из которого изготовлена мембрана (целлюлоза, стекло, поликарбонат) [95; 105]. Для разделения каменной пыли больше подходят мембраны, изготовленные из целлюлозы. В целом мембранная фильтрация позволила выделить достаточный объем фракционируемых образцов и, помимо выделения частиц микро размера, выделить частицы наноразмеров. Мембранную фильтрацию дополнительно используют в комбинации с седиментацией и центрифугированием [62], но для целей нашего исследования использование мембранного метода в единичном формате было достаточным. Мембранная фильтрация – универсальный метод фракционирования, однако в процессе фильтрации фракционирование частиц каменной производственной пыли происходит по эффективному размеру частиц, поэтому частицы, имеющие разную плотность и разные поверхностные свойства, могут оказаться в одной фракции.

Таким образом, метод мембранной фильтрации является надежным и эффективным способом выделения наноразмерных частиц из образцов каменной пыли, что позволяет проводить детальные исследования и контроль качества в различных областях применения [9]. В нашем случае «ненужные» частицы станут основополагающим объектом исследования, а частицы большей крупности, наоборот, будут удаляться, оставляя возможность для изучения частиц наноразмеров.

Самые распространенные промышленные мембранные процессы классифицируются по характеру движущей силы (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Классификация мембранной фильтрации

Градиент электрического поля	Градиент концентрации	Градиент давления
Электродиализ Электрофорез	Пермеация Диализ Газоразделение Первапорация	Микрофильтрация Ультрафильтрация Нанофильтрация Обратный осмос

Мембранная фильтрация, применяемая в диапазоне от микрофильтрации до нанофильтрации, представляет интерес для исследователей, так как позволяет более полно и всесторонне охарактеризовать частицы каменной пыли и разделить их на микро- и нанодракции. Такой подход позволяет достичь поставленной цели – провести первоначальное разделение и изучение частиц с высокой детализацией. Однако необходимо иметь в виду, что применение мембранной фильтрации может повысить энергозатраты и потребовать использования больших трудовых ресурсов для достижения результата.

Таким образом, мембранная фильтрация представляет собой мощный инструмент для исследования и анализа каменной пыли с высокой степенью детализации и точности, что способствует более эффективной оценке ее воздействия на окружающую среду и принятию соответствующих мер по улучшению экологической ситуации на предприятиях добычи каменных материалов.

При разделении частиц мембранной фильтрацией в кустарных условиях возникают несколько основных задач, решение которых необходимо для предупреждения опасности для окружающей среды, владельцев карьеров и конечных потребителей:

1. Выбор наиболее существенных технологических процессов: важно определить технологические этапы, на которых образуются нано- и микрочастицы в наибольшем количестве. Это позволит прогнозировать количество таких частиц, образующихся в технологическом цикле предприятия в целом.
2. Определение закономерностей образования частиц: исследование основных закономерностей образования нано- и микрочастиц поможет выявить, на каких этапах технологического процесса применение мембранной фильтрации будет наиболее эффективным и перспективным.

3. Разработка особенностей мембранной фильтрации: необходимо выработать оптимальные параметры и особенности применения мембранной фильтрации для разделения каменной пыли горных карьеров.

Оптимизация этого метода позволит предотвратить негативные последствия для окружающей среды и обеспечить более эффективное использование каменных материалов в различных производственных процессах.

В задаче разделения каменной пыли, как уже было отмечено, ключевую роль играет применение мембранной фильтрации, а выбор конкретной модели мембранного фильтра зависит от особенностей объектов исследования. Наиболее распространенные модели:

1. Мембранные фильтры Merck (Millipore) 10 мкм. Эти фильтры представляют собой нейлоновую сетку с отверстиями диаметром 10 мкм и мембраной диаметром 25 мм. Они применяются на начальной стадии разделения частиц и для количественного анализа. Также они служат вводным звеном перед использованием других размерных линеек мембранных фильтров.
2. Мембранные фильтры типа ФМСЕ-3,0 Sartorius. Эти фильтры, производимые ЗАО «Владисарт», обладают отверстиями диаметром 0,45 и 3 мкм и состоят из смеси эфиров целлюлозы (ФМСЕ), которая обеспечивает большую скорость фильтрации и хорошую пропускную способность мембраны, сохраняя гидрофильные свойства и низкую экстрагируемость.
3. Мембранные фильтры типа МФАС-Б. Эти фильтры, производимые ЗАО НТЦ «Владипор», имеют отверстия диаметром 50 нм и представляют собой микропористый пленочный материал на основе смеси ацетатов целлюлозы. Они обладают высокой эффективностью удержания частиц наноразмеров.

Выбор конкретного типа мембранного фильтра зависит от размера частиц, которые необходимо разделить, а также от скорости и эффективности фильтрации. Комбинация различных мембранных фильтров может быть использована для достижения оптимальных результатов в процессе разделения каменной пыли. Применение мембранной фильтрации позволит успешно решить задачу разделения «тончайших» частиц каменной пыли.

Определение основных физико-химических свойств полидисперсной системы, которую необходимо фильтровать, и правильный выбор материала для мембранных фильтров обеспечивает большую эффективность процессу разделения. Такой подход позволяет исключить возможность химического взаимодействия между мембраной и разделяемой системой, а также определить оптимальные размеры мембран.

Когда мембранные фильтры подобраны с учетом особенностей полидисперсной системы, следующим шагом становится фракционирование – разделение частиц на различные размерные группы. Важно определить точное количество наночастиц после фракционирования для последующего детального исследования. Для этой цели используется масс-спектрометр – прибор, который позволяет определить химический состав частиц.

Масс-спектрометр работает на основе принципа разложения частиц на ионы и их детектирования. Сначала фрагменты наночастиц ионизируются, а затем происходит их разделение в магнитном поле, основанное на отношении массы к заряду (m/z). Таким образом можно определить массу ионов, что в свою очередь даст информацию о химическом составе частиц.

Описанный подход позволяет получить подробные сведения о химическом составе фракционированных наночастиц, что имеет важное значение для дальнейшего исследования и понимания влияния этих частиц на окружающую среду. Использование мембранной фильтрации с последующим анализом масс-спектрометром – это эффективный и точный метод для изучения наночастиц каменной пыли и их химического состава.

2.3.4. Рентгеновская спектроскопия

Рентгенографические исследования представляют собой процесс формирования потока высокоскоростных частиц, которые постепенно рассеиваются в радиальном направлении. В этом процессе имеется лидирующая частица, движущаяся вдоль оси кумулятивного заряда. Главная цель таких исследований заключается в распределении частиц по оси и в точках на основе их размера и формы.

Данный метод исследования обладает несколькими преимуществами. В частности, он позволяет контролировать процесс рассеивания частиц в режиме реального времени. Это значит, что данные о движении и распределении частиц получаются практически мгновенно, благодаря чему можно получить результаты эксперимента за короткое время с минимальными погрешностями для каждой точки захвата частицы и ее фиксации на графике рентгенограммы.

Метод рентгеновской спектроскопии особенно востребован в случаях, когда требуется оперативно получить информацию о движении и поведении частиц в процессе их рассеивания. Например, в исследованиях динамических процессов, где каждая

мельчайшая деталь имеет значение, рентгенографические исследования обеспечивают получение ценной информации о поведении частиц на момент съемки.

Рентгеновская спектроскопия, представляющая собой метод анализа с большими возможностями, широко используется для определения элементного и минерального состава каменной производственной пыли [60; 76; 85; 97; 116; 121]. Определение элементного состава образцов этим методом является критически важным для понимания происхождения пыли. В данной работе был использован метод рентгеновской спектроскопии для определения элементного состава пыли таких горных пород, как гранит, мигматит, мраморизованный известняк, офиокальцит, чароит, нефрит и серпентинит.

Еще одно преимущество метода рентгеновской спектроскопии заключается в том, что он позволяет анализировать нано- и микрочастицы без предварительного разделения образцов на фракции, что упрощает проведение эксперимента и экономит время. Однако следует отметить, что результаты, полученные этим методом, могут быть неполными, поскольку рентгеновская спектроскопия позволяет определить только основные элементы в частицах. Для полного анализа и определения всех элементов требуется применение других методов анализа.

Частицы каменной пыли в разных частях карьеров могут иметь различное происхождение в зависимости от технологического цикла предприятия, следствием чего будет отличающийся элементный состав частиц. Оценка элементного состава только методом рентгеновской спектроскопии представляет собой сложную задачу и является недостаточной. Кроме определения элементного состава, метод рентгеновской спектроскопии использовался и для изучения структуры частиц каменной производственной пыли.

2.3.5. Электронная микроскопия

Метод электронной микроскопии является уникальным с точки зрения получения наглядного изображения исследуемых образцов и изучения морфологии частиц каменной производственной пыли. Он основан на просвечивающей электронной микроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Метод дает возможность прямого наблюдения разного рода эффектов, включений, пластических деформаций и взаимодействия частиц между собой [60; 69; 78; 97; 130].

Метод электронной микроскопии позволил изучить как сухие, так и влажные образцы каменной производственной пыли, визуализировать частицы микро- и

наноразмеров, исследовать их морфологический состав, определить размер частиц без применения математических расчетов, используемых в методах светорассеивания.

Методом электронной микроскопии получены уникальные изображения частиц каменной производственной пыли гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, отражающие размеры частиц, встречающиеся в исследуемых образцах пыли.

2.3.6. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой

Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) является мощным инструментом анализа, который позволяет определять элементный состав анализируемых образцов с точностью до 10 %. Одним из основных преимуществ этого метода является возможность определения изотопного состава элементов, что обеспечивает проведение более глубокого анализа образцов.

Принцип работы ICP-MS основан на ионизации анализируемых образцов в индуктивно связанной плазме. Плазма представляет собой сильно нагретый газ, образованный под действием высокочастотного электрического разряда. В этой плазме атомы исследуемого образца становятся положительно заряженными ионами. Этот метод дает возможность анализировать образцы с высокой чувствительностью и точностью, что особенно важно при определении микроэлементов, имеющих низкие концентрации [106]. Точные и надежные данные, получаемые с помощью этого метода, играют важную роль в экологических и геологических исследованиях [82; 83; 105; 119]. Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой расширяет область изучения влияния поступления частиц микро- и наноразмеров в окружающую среду.

Исследования методом масс-спектрометрии проводились на оборудовании ICP-MS NexION 300D № BE10481012 и с использованием весов лабораторных электронных CP 225 D № 0001357235, дозатора ВЮНИТ (100-1000 мкл) № 17571917, дозатора ВЮНИТ (5-50 мкл) № 14586020 и сертифицированных растворов. В данной работе была использована методика МВИ 002-ХМС-2009, которая основана на применении масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) для определения массовых долей 62 элементов в различных образцах, таких как почвы, донные отложения, горные породы и сплавы цветных металлов. Этот метод обладает высокой точностью и чувствительностью.

С помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой возможно определить не только концентрацию элементов, но и размер наночастиц в исследуемых суспензиях. Принцип анализа частиц заключается в том, что каждая частица

в суспензии регистрируется как отдельный импульс. Этот метод дает возможность получать детальную характеристику наночастиц и изучать их химический состав, что особенно важно при геоэкологических исследованиях, а также для разработки новых технологий. Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой предоставляет мощный и универсальный инструмент для анализа наночастиц и исследования их свойств и изучения их влияния на окружающую среду [81; 92; 103; 108; 128; 131].

Выводы по главе

Для детального исследования каменной пыли, были выбраны гранит, мигматит, мраморизованный известняк, а также нефрит, чароит, серпентинит, офиокальцит, которые по промышленной систематике полезных ископаемых относятся к нерудным и классифицируются как облицовочные и поделочные камни.

В качестве изучаемых объектов были определены пять месторождений облицовочных и поделочных камней: Ангасольское месторождение гранита и мигматита, месторождение «Перевал» мраморизованного известняка, Алзагайское месторождение офиокальцита, участок «Старый» месторождения «Сиреневый камень» по добыче чароита, Оспинское месторождение нефрита с проявлениями серпентинита.

Образующаяся на объектах производственная каменная пыль является сложным полидисперсным компонентом, состоящим из тонких микро- и наночастиц естественного и антропогенного происхождения. Выбор объектов исследования позволяет провести сравнительный анализ пылеобразования на предприятиях по добыче облицовочных камней с выбросами до 120 т в год и на предприятиях по добыче поделочных камней с пылевыми выбросами до 4,5 т в год.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ДОБЫЧЕ ОБЛИЦОВОЧНЫХ И ПОДЕЛОЧНЫХ КАМНЕЙ

3.1. Исследуемые образцы

В настоящей работе изучены образцы пыли гранитов, мигматитов, мраморизованного известняка, нефритов и серпентинитов, чароитов, офиокальцитов, отобранных на объектах исследования, описанных во второй главе. Образцы пыли взяты в 2019-2023 гг. 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. Условия отбора проб исследуемой пыли приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Время и метеорологические условия мест отбора проб исследуемой пыли по данным соответствующих метеорологических станций (<https://www.wunderground.com>)

Место отбора проб	Месяц, год	Температура, °С	Давление, мм рт. ст.	Влажность воздуха, %	Направление ветра
Ангасольское месторождение	Июнь 2020	26	720, 2	44	СВ
Ангасольское месторождение	Март 2021	4	754, 2	58	СЗ
Карьер «Перевал»	Июнь 2022	28	717,4	48	ЮЗ
Карьер «Перевал»	Март 2023	2	758,6	54	СЗ
Алзагайское месторождение	Июль 2023	31	730,1	54,6	СЗ
Месторождение «Сиреневый камень», участок «Старый»	Май 2019	14	764,4	76,8	СЗ
Оспинское месторождение	Август 2022	11	793,8	67,1	ЮВ

При опробовании пыли на карьерах были использованы четыре способа отбора проб: гравиметрический (весовой), седиментационный, воздушный (аспирационный) и комбинированный (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Сводная таблица исследуемых образцов пыли

№ п/п	Производственная пыль породы	Количество проб, шт.	Вес пробы (от ... до, мг)	Способ отбора
1	Пыль гранита	480	0,04–50	Гравиметрический (весовой), седиментационный, воздушный и комбинированный
2	Пыль мигматита	480	0,04–50	Гравиметрический (весовой), седиментационный, воздушный и комбинированный
3	Пыль мраморизованного известняка	480	0,04–50	Гравиметрический (весовой), седиментационный, воздушный и комбинированный
4	Пыль нефрита	480	0,04–50	Гравиметрический (весовой), седиментационный, воздушный и комбинированный
5	Пыль чароита	480	0,04–50	Гравиметрический (весовой), седиментационный, воздушный и комбинированный
6	Пыль офиокальцита	480	0,04–50	Гравиметрический (весовой), седиментационный, воздушный и комбинированный
7	Пыль серпентинита	480	0,04–50	Гравиметрический (весовой), седиментационный, воздушный и комбинированный

3.2. Определение дисперсного состава частиц пыли методом мембранной фильтрации

Образцы пыли гранитов, мигматитов, мраморизованного известняка, нефритов и серпентинитов, чароитов, офиокальцитов отобраны по периметрам исследуемых месторождений, в зоне работы экскаваторной техники, в местах погрузки и разгрузки сырья и на рабочих местах горняков. Для фракционирования пыли были выбраны пробы массой 90–100 мг, обеспечивающей получение более точных результатов эксперимента.

В процессе фракционирования образцов пыли была применена многоступенчатая мембранная фильтрация, что позволило разделить частицы пыли на различные размерные фракции (рисунок 3.1). Для этой процедуры использовалась фильтрационная ячейка объемом 10 мл от компании Millipore. Вначале подготавливали суспензию из 90–100 мг пыли, смешивая ее с 10 мл деионизированной воды. Затем проводили диспергирование суспензии в ультразвуковой ванне в течение 5 минут. После этого суспензию оставляли на оседание в течение 1 минуты для удаления крупных частиц, супернатант (жидкая часть) был декантирован.

Далее фильтрат, содержащий частицы размером менее 10 мкм, проходил через мембрану с порами средним диаметром 2,5 мкм от компании Sartorius. В результате получали осажденную фракцию частиц диаметром более 2,5 мкм, которые были отделены на этом этапе. Частицы размером менее 2,5 мкм проходили через эту мембрану и переходили на следующий этап фильтрации.

Таким образом, полученный фильтрат проходил через мембрану с порами средним диаметром 0,45 мкм также от компании Sartorius. Этот шаг дал возможность выделить осажденную фракцию частиц диаметром более 0,45 мкм. Частицы размером менее 0,45 мкм продолжали прохождение через мембрану и переходили на последний этап фильтрации.

На последнем этапе частицы размером менее 0,45 мкм (менее 450 нм) фильтровались через мембрану с порами средним диаметром 0,05 мкм (менее 50 нм) от компании «Владипор». В результате была выделена самая тонкая фракция пыли, содержащая частицы размером меньше 0,05 мкм (менее 50 нм).

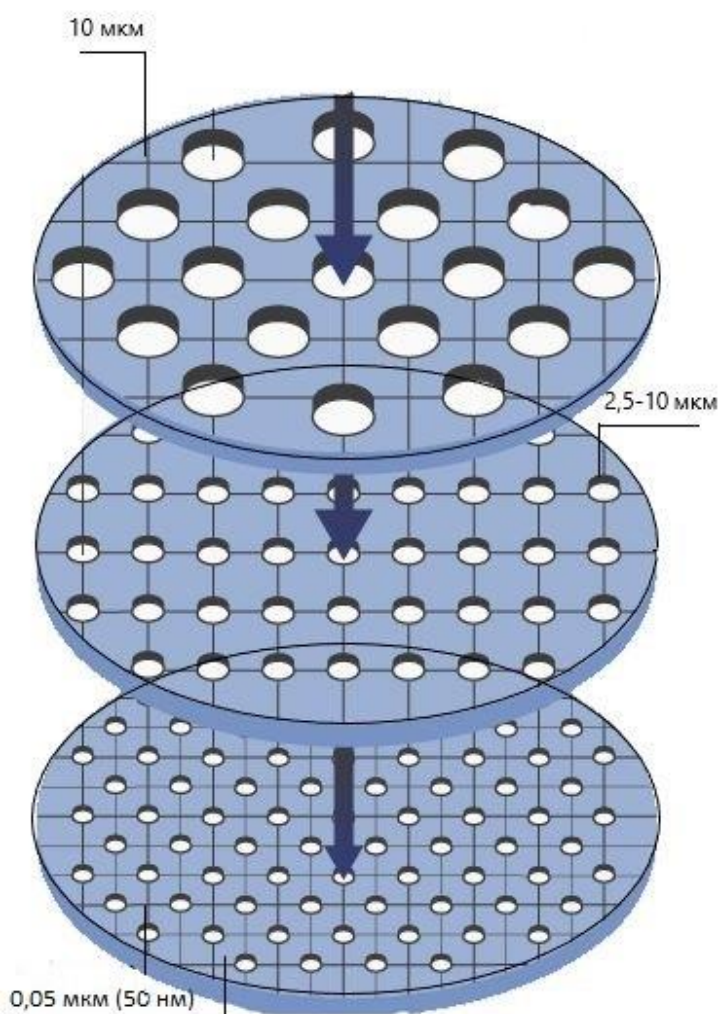


Рисунок 3.1 – Этапы фракционирования частиц производственной пыли

Данные этапы многоступенчатой мембранной фильтрации позволили нам разделить образцы пыли на несколько фракций частиц различных размеров. Выделенные фракции изучались в дальнейшем методами, описанными в разделах 3.2–3.7, что позволило получить более полную информацию о составе пыли и определить наличие частиц наноразмеров, которые оказывают влияние на здоровье человека и окружающую среду.

Анализ фракционного состава образующихся пылевых частиц методом мембранной фильтрации, показал, что до 10 % пылевидных частиц имеют размер менее 0,13 мкм, а наноразмерные частицы составляют от 1,6 до 2,1 % от общей массы пылевидных частиц (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – 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, представленные в таблице 3.3, показывают процентное соотношение частиц различных размерных фракций 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.

Общая средняя масса производственной пыли на рассматриваемых предприятиях достигает отметки около 72,4 т в год, и до 10 % этой пыли составляют наноразмерные частицы (менее 0,13 мкм). Это означает, что в одном килограмме производственной пыли может содержаться до 5 г наноразмерных частиц. Согласно нормативам предельно допустимых выбросов, разработанным для данных предприятий, ежегодно выбрасывается около 1500 кг наноразмерных частиц. Если технологический процесс не будет

усовершенствован, то за 10 лет работы одного предприятия наноразмерные частицы будут выброшены в атмосферу в объеме примерно 15 т.

Эти данные подтверждают, что в окружающую среду горнодобывающими предприятиями выбрасывается значительный объем наноразмерных частиц. В силу потенциального воздействия таких частиц на окружающую среду и здоровье человека необходимо активно разрабатывать и применять такие технологии и методы, которые способствовали бы снижению выбросов и минимизации негативных последствий для окружающей среды.

Проведенные исследования с использованием метода мембранной фильтрации позволили разделить пылевидную фракцию различных горных пород, таких как граниты, мигматиты, мраморизованный известняк, нефриты и серпентиниты, чароиты и офиокальциты, в диапазоне от микро- до наночастиц. Используя различные типы мембранных фильтров – фильтры типа Merck (Millipore) с порами диаметром 10 мкм, мембранные фильтры типа ФМСЕ-3,0 с отверстиями диаметром 0,45 и 3 мкм, а также мембранные фильтры типа МФАС-Б с отверстиями диаметром 0,05 мкм (50 нм), – удалось эффективно разделить пыль на различные размерные фракции.

Результаты исследования показали наличие наночастиц в пылевидной фракции минимального размера в пределах 0,05 мкм (< 50 нм). Таким образом, обнаружено наличие значительного количества наночастиц в производственной пыли. Именно эти наночастицы, основным компонентом которых является кремнезем, могут оказывать негативное влияние на окружающую среду.

Комплексный анализ осажденных частиц из каждой фракции, проведенный после многоступенчатой мембранной фильтрации, позволил получить обширную информацию о размерах наночастиц в каменной пыли исследуемых месторождений. Эти результаты использованы при разработке мер по снижению негативных последствий добычи и использования каменного материала, которые приведены в главе 4 настоящей работы.

3.3. Химический состав микро- и наночастиц производственной пыли

Изучение химического и элементного состава микро- и наночастиц производственной пыли гранитов, мигматитов, мраморизованного известняка, нефритов и серпентинитов, чароитов, офиокальцитов проведено в Центре коллективного пользования в аналитическом отделе Института геохимии имени А. П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук – в лаборатории атомно-эмиссионных методов анализа и стандартных образцов и в химико-аналитической производственной

лаборатории. Экспериментальные исследования осуществлялись на спектрометре рентгенофлуоресцентном S4 Pioneer (Германия, Bruker AXS GmbH), на комплексах для атомно-эмиссионного спектрального анализа по способам вдувания-просыпки и испарения из канала, на спектрометре эмиссионном с индуктивно связанной плазмой iCAP 6300 DUO (США, Termo Electron Corporation) и на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Finnigan Element2 (Германия, Thermo-Finnigan MAT) и NexION 300D (США, PerkinElmer Inc.). При разложении проб используют муфельные печи и сушильные шкафы типа СНОЛ, автоклавный комплекс МКП-03 «АНКОН-АТ-2», систему разложения проб DigiPREP KeyPAD Controller, платформы нагревательные и плиты электрические.

Частицы каменной пыли аккумулируют в себе различные токсичные вещества и элементы, в том числе тяжелые металлы, которые, вероятнее всего, скапливаются в пыли за счет антропогенных процессов. Тяжелые металлы, связанные с частицами каменной пыли, могут легко попадать в систему сточных вод, в почвы, растения и оказывать токсичное воздействие на живые организмы и окружающую среду в целом. При изучении элементного состава каменной пыли определялось содержание таких тяжелых металлов, как Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, Tl и Pb [72; 93; 100; 123; 124; 132].

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой были исследованы пробы для каждой породы и каждого месторождения. Процедура и условия отбора образцов пыли описаны ранее в разделе 3.1. Исследование проводилось отдельно для микрочастиц и для наночастиц. Результаты определения химического состава в отобранных образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой представлены в таблицах 3.4 и 3.5 соответственно. Согласно полученным результатам, содержание различных химических элементов в образцах значительно варьируются. Так, для гранита Ангасольского месторождения преобладающими элементами являются титан (Ti), хром (Cr), марганец (Mn), никель (Ni), медь (Cu), цинк (Zn), стронций (Sr), барий (Ba), таллий (Tl); для мигматита Ангасольского месторождения преобладающие элементы – титан (Ti), хром (Cr), кобальт (Co), медь (Cu), цинк (Zn), свинец (Pb), барий (Ba), диспрозий (Dy); для офиокальцита Алзагайского месторождения – литий (Li), титан (Ti), марганец (Mn), медь (Cu), вольфрам (W); для мраморизованного известняка месторождения «Перевал» – титан (Ti), хром (Cr), марганец (Mn), барий (Ba); для нефрита Оспинского месторождения – литий (Li), хром (Cr), марганец (Mn), кобальт (Co), никель (Ni), цинк (Zn), барий (Ba), вольфрам (W); для чароита участка «Старый» месторождения «Сиреневый камень» преобладающими являются титан (Ti), хром (Cr), марганец (Mn), кобальт (Co), стронций (Sr), олово (Sn), цезий (Cs), барий (Ba), лантан (La), церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), европий (Eu); для серпентинита Оспинского месторождения

– хром (Cr), марганец (Mn), кобальт (Co), никель (Ni), цинк (Zn), барий (Ba), вольфрам (W), свинец (Pb).

Источниками загрязнения пыли тяжелыми металлами, согласно проектам нормативов предельно допустимых выбросов, служат электродная сварка, газовая резка металла, газовая сварка, переносной сварочный пост, двигатели автобусов, автотранспорта, дорожной грузовой техники, бензовозов, бульдозеров, экскаватора, компрессоров, токарные, фрезерные, заточные и винторезные работы, резервуары для хранения дизельного топлива, бензина и топливного масла, буровые станки и залповые взрывы.

Таблица 3.4 – Результаты химического анализа частиц каменной пыли **наноразмеров** методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Концентрация, ppm (г/т) (наночастицы 10 нм)

Элемент	Изотоп	Предел обнаружения (ПО)	Пыль гранита	Пыль мигматита	Пыль офиокальцита	Пыль мраморизованного известняка	Пыль нефрита	Пыль чароита	Пыль серпентинита
<i>Li</i>	Li 7 S	1,54	11,9	12,8	9,4	11,3	10,0	10,5	9,2
<i>Be</i>	Be 9 S	0,039	0,96	1,06	0,50	0,012	0,65	8,3	0,49
<i>Sc</i>	Sc 45 S	0,53	46	47	1,01	0,80	13,3	< ПО	0,45
<i>Ti</i>	Ti 49 S	3,93	4626	5843	78	23	109	1052	82
<i>V</i>	V 51 S	1,24	359	402	13,6	9,6	28	43	11,8
<i>Cr</i>	Cr 52 S	1,36	202	230	4,40	1,95	5331	2,26	5,2
<i>Mn</i>	Mn 55 K	0,74	1288	1324	270	2,48	1326	1263	246
<i>Co</i>	Co 59 S	0,20	55	59	1,58	0,99	75	2,37	3,57
<i>Ni</i>	Ni 60 K	0,91	109	124	46	2,47	1581	2,28	3,49
<i>Cu</i>	Cu 63 S	0,75	94	121	10,2	2,84	47	15	10,9
<i>Zn</i>	Zn 66 S	1,23	80	101	4,59	2,93	319	52	5,9
<i>Ga</i>	Ga 71 S	0,75	17	18	0,61	0,050	1,17	12,0	0,63
<i>Ge</i>	Ge 74 S	0,019	1,46	1,43	0,23	< ПО	0,65	0,90	0,26
<i>Rb</i>	Rb 85 S	0,16	10,3	14,5	0,45	0,21	4,59	185	0,41
<i>Sr</i>	Sr 88 S	2,00	489	513	35	1516	54	90175	31
<i>Y</i>	Y 89 S	0,30	19	21	2,12	0,27	0,37	34	2,19
<i>Zr</i>	Zr 90 S	0,38	27	35	2,80	0,38	1,31	372	2,91
<i>Nb</i>	Nb 93 S	0,92	2,73	4,05	0,37	0,037	0,29	7,4	0,37
<i>Mo</i>	Mo 95 S	0,095	0,36	0,95	0,50	0,31	3,05	0,39	0,82
<i>Sn</i>	Sn 120 S	0,18	1,55	1,84	0,11	0,020	0,24	6,6	0,17
<i>Sb</i>	Sb 123 S	0,032	0,041	0,079	0,11	0,070	0,67	0,17	0,12
<i>Cs</i>	Cs 133 S	0,088	0,068	0,11	0,083	0,084	0,63	11,6	0,078
<i>Ba</i>	Ba 138 K	0,71	208	266	41	125	85	53716	35
<i>La</i>	La 139 S	0,36	16	18	0,99	0,11	0,56	375	0,96

Элемент	Изотоп	Предел обнаружения (ПО)	Пыль гранита	Пыль мигматита	Пыль офиокальцита	Пыль мраморизованного известняка	Пыль нефрита	Пыль чароита	Пыль серпентинита
Ce	Ce 140 S	0,73	38	42	2,29	0,17	0,99	649	2,26
Pr	Pr 141 S	0,15	5,1	5,6	0,28	0,017	0,10	68	0,29
Nd	Nd 143 S	0,053	23	25	1,12	0,079	0,43	238	1,21
Sm	Sm 149 S	0,014	5,2	5,8	0,28	0,013	0,085	33	0,26
Eu	кор. Eu 151 S	0,029	1,47	1,59	0,055	0,0062	0,015	6,3	0,059
Eu	Eu 151 S	0,023	1,49	1,62	0,059	0,021	0,025	12,6	0,063
Gd	Gd 157 S	0,083	5,1	5,6	0,29	0,024	0,072	29	0,31
Gd	Gd 160 S	0,092	5,3	5,7	0,31	0,026	0,069	24	0,33
Tb	кор. Tb 159 S	0,015	0,69	0,75	0,043	0,0043	0,010	1,86	0,044
Tb	Tb 159 S	0,013	0,74	0,81	0,046	0,0044	0,011	2,37	0,047
Dy	Dy 163 S	0,017	3,88	4,33	0,26	0,022	0,064	8,2	0,26
Ho	Ho 165 S	0,013	0,75	0,83	0,047	0,0054	0,013	1,32	0,053
Er	Er 167 S	0,036	2,07	2,30	0,14	0,018	0,045	3,40	0,15
Tm	Tm 169 S	0,0069	0,28	0,31	0,019	0,0023	0,0088	0,42	0,020
Yb	Yb 172 S	0,029	1,78	1,96	0,13	0,018	0,072	2,53	0,11
Yb	Yb 174 S	0,029	1,79	2,00	0,11	0,015	0,076	2,52	0,12
Lu	Lu 175 S	0,0060	0,26	0,28	0,017	0,0027	0,013	0,33	0,016
Hf	Hf 178 S	0,10	1,14	1,37	0,075	0,014	0,043	8,1	0,089
Ta	Ta 181 S	0,082	0,22	0,31	0,0059	0,0015	< ПО	< ПО	0,016
W	W 184 S	0,13	4,13	1,39	3,40	0,21	6,9	0,35	6,3
Tl	Tl 205 S	0,057	0,090	0,13	< ПО	0,0068	0,041	1,24	< ПО
Pb	Pb 208 S	0,25	6,9	8,7	0,97	0,45	4,02	84	1,00
Th	Th 232 S	0,18	1,74	1,24	0,27	0,016	0,099	1,75	0,29
U	U 238 S	0,092	0,50	0,54	1,96	0,10	0,051	9,2	2,09

Таблица 3.5 – Результаты химического анализа частиц каменной пыли **микроразмеров** методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Концентрация, ppm (г/т) (микрочастицы 2,5 мкм)

Элемент	Изотоп	Предел обнаружения (ПО)	Пыль гранита	Пыль мигматита	Пыль офиокальцита	Пыль мраморизованного известняка	Пыль нефрита	Пыль чароита	Пыль серпентинита
<i>Li</i>	Li 7 S	1,54	5,4	3,8	4,08	3,42	2,8	4,77	4,18
<i>Be</i>	Be 9 S	0,039	0,30	0,33	0,23	0,0029	0,59	2,5	0,14
<i>Sc</i>	Sc 45 S	0,53	19,1	22,3	0,53	0,66	4,75	< ПО	0,34
<i>Ti</i>	Ti 49 S	3,93	1128	886,5	33,8	9,5	49,54	584,4	45,5
<i>V</i>	V 51 S	1,24	163	174,7	7,15	2,9	15,5	13	6,55
<i>Cr</i>	Cr 52 S	1,36	65,1	79,3	2,4	0,92	1903	1,88	4,1
<i>Mn</i>	Mn 55 K	0,74	920	472,8	81,8	0,65	552,2	382,7	87,8
<i>Co</i>	Co 59 S	0,20	17,7	24,5	0,56	0,55	41,6	1,31	2,74
<i>Ni</i>	Ni 60 K	0,91	72,6	20,6	19,1	1,07	479,1	1,2	1,93
<i>Cu</i>	Cu 63 S	0,75	40,85	39,1	4,43	1,29	26,1	4,54	6,05
<i>Zn</i>	Zn 66 S	1,23	36,6	56,1	1,99	1,55	99,6	10,1	2,45
<i>Ga</i>	Ga 71 S	0,75	5,15	2,72	0,25	0,021	0,65	4,8	0,19
<i>Ge</i>	Ge 74 S	0,019	1,1	0,103	0,10	< ПО	0,54	0,39	0,12
<i>Rb</i>	Rb 85 S	0,16	4,5	6,1	0,17	0,19	2,55	102,7	0,15
<i>Sr</i>	Sr 88 S	2,00	74,1	165,4	15,9	270,2	14,2	16102,6	25,8
<i>Y</i>	Y 89 S	0,30	7,6	9,54	1,1	0,21	0,030	18,8	1,8
<i>Zr</i>	Zr 90 S	0,38	20,7	11,2	1,16	0,15	0,07	206,6	0,88
<i>Nb</i>	Nb 93 S	0,92	1,4	3,3	0,076	0,01	0,13	1,32	0,30
<i>Mo</i>	Mo 95 S	0,095	0,2	0,39	0,27	0,14	1,69	0,18	0,65
<i>Sn</i>	Sn 120 S	0,18	0,73	0,51	0,04	0,009	0,21	3,6	0,14
<i>Sb</i>	Sb 123 S	0,032	0,025	0,032	0,022	0,0022	0,20	0,14	0,06
<i>Cs</i>	Cs 133 S	0,088	0,021	0,05	0,0025	0,04	0,33	3,5	0,06
<i>Ba</i>	Ba 138 K	0,71	50,7	50,1	4,9	37,8	20,7	16394	19,4
<i>La</i>	La 139 S	0,36	6,6	8,5	0,47	0,035	0,31	73,1	0,53

Элемент	Изотоп	Предел обнаружения (ПО)	Пыль гранита	Пыль мигматита	Пыль офиокальцита	Пыль мраморизованного известняка	Пыль нефрита	Пыль чароита	Пыль серпентинита
Ce	Ce 140 S	0,73	15,8	20	1,2	0,14	0,30	129,8	1,25
Pr	Pr 141 S	0,15	1,59	4,3	0,21	0,013	0,04	20,6	0,09
Nd	Nd 143 S	0,053	5,22	7,8	0,53	0,037	0,28	76,7	0,80
Sm	Sm 149 S	0,014	2,7	1,9	0,21	0,003	0,077	27,5	0,23
Eu	кор. Eu 151 S	0,029	0,98	0,69	0,023	0,004	0,009	2,52	0,018
Eu	Eu 151 S	0,023	1,1	0,67	0,045	0,017	0,0075	5,72	0,056
Gd	Gd 157 S	0,083	4,25	1,8	0,13	0,013	0,051	7,07	0,25
Gd	Gd 160 S	0,092	1,6	2,1	0,28	0,021	0,036	13,3	0,13
Tb	кор. Tb 159 S	0,015	0,55	0,24	0,035	0,0039	0,004	0,66	0,034
Tb	Tb 159 S	0,013	0,23	0,36	0,020	0,0017	0,0036	1,31	0,023
Dy	Dy 163 S	0,017	1,25	1,44	0,19	0,014	0,045	3,9	0,12
Ho	Ho 165 S	0,013	0,5	0,25	0,020	0,0018	0,009	1,09	0,037
Er	Er 167 S	0,036	0,62	0,69	0,084	0,009	0,0032	1,54	0,12
Tm	Tm 169 S	0,0069	0,24	0,16	0,009	0,0020	0,0048	0,22	0,018
Yb	Yb 172 S	0,029	0,89	0,18	0,054	0,016	0,06	1,20	0,09
Yb	Yb 174 S	0,029	1,37	1,66	0,05	0,004	0,044	1,05	0,09
Lu	Lu 175 S	0,0060	0,22	0,24	0,006	0,0023	0,010	0,275	0,010
Hf	Hf 178 S	0,10	0,49	0,59	0,034	0,010	0,0033	3,54	0,056
Ta	Ta 181 S	0,082	0,18	0,18	0,0045	0,0006	< ПО	< ПО	0,012
W	W 184 S	0,13	1,37	0,63	1,62	0,091	3,8	0,16	4,1
Tl	Tl 205 S	0,057	0,075	0,065	< ПО	0,0021	0,017	0,68	< ПО
Pb	Pb 208 S	0,25	2,2	4,14	0,404	0,376	3,35	64	0,89
Th	Th 232 S	0,18	0,75	0,37	0,12	0,013	0,0047	1,45	0,12
U	U 238 S	0,092	0,19	0,24	0,89	0,07	0,031	4,6	1,85

Ниже предела обнаружения в большинстве случаев для всех исследуемых образцов были галлий (Ga), рубидий (Rb), иттрий (Y), ниобий (Nb), гадолиний (Gd), гольмий (Ho), тулий (Tm), гафний (Hf), лютеций (Lu), тантал (Ta), в отдельных случаях для мраморизованного известняка карьера «Перевал» ниже предела обнаружения оказались бериллий (Be), рубидий (Rb), для мигматита Ангасольского месторождения – празеодим (Pr), таллий (Tl), для гранита Ангасольского месторождения – гольмий (Ho), европий (Eu), для офиокальцита Алзагайского месторождения – галлий (Ga), олово (Sn), для нефрита Оспинского месторождения – гольмий (Ho), торий (Th), для серпентинита Оспинского месторождения – иттрий (Y), лантан (La), гафний (Hf), для чароита участка «Старый» месторождения «Сиреневый камень» – тантал (Ta), вольфрам (W).

Данные таблиц 3.4 и 3.5 свидетельствуют о содержании в образцах каменной производственной пыли облицовочного и поделочного камня тяжелых металлов в разных количествах. Более детальное сравнение образцов производственной каменной пыли было проведено по содержанию в ней таких тяжелых металлов, как хром (Cr), кобальт (Co), никель (Ni), медь (Cu), цинк (Zn), олово (Sn), таллий (Tl) и свинец (Pb) (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – 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	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

Таблица 3.7 – Превышение содержания тяжелых металлов в частицах пыли наноразмеров к частицам пыли микроразмеров (во сколько раз концентрация тяжелых металлов в частицах наноразмеров выше, чем в частицах микроразмеров) по данным таблицы 3.7

Элемент	Пыль гранита	Пыль мигматита	Пыль офиокальцита	Пыль мраморизованного известняка	Пыль нефрита	Пыль чаронита	Пыль серпентинита
Cr	3,1	2,9	1,8	2,1	2,8	1,2	1,2
Co	3,1	2,4	2,8	1,8	1,8	1,8	0,76
Ni	1,5	6,1	2,4	2,3	3,2	1,9	1,8
Cu	2,3	3,1	2,3	2,2	1,8	3,3	1,8
Zn	2,1	1,8	2,3	1,8	3,2	5,1	2,4
Sn	2,1	3,6	2,7	2,2	1,1	1,8	1,2
Tl	1,2	2,0	< ПО	3,2	2,4	1,8	< ПО
Pb	3,1	2,1	2,3	1,1	1,2	1,3	1,1

По данным, приведенным в таблице 3.7, видно, что закономерность соблюдается вне зависимости от того, какой металл содержится в пыли. При этом концентрация тяжелых металлов в частицах наноразмеров в 1,1–3,2 раза выше, чем в частицах микроразмеров, для всех видов пыли.

Проведено сравнение содержания тяжелых металлов в частицах микроразмеров с содержанием тяжелых металлов в частицах наноразмеров, и получена следующая закономерность. Чем меньше фракция производственной пыли исследуемых образцов, тем выше содержание тяжелых металлов (для частиц размерами, входящими в диапазон от 2,5 мкм до 10 нм с прогнозом до 1 нм). Данные отображены на рисунке 3.2 на примере тяжелого металла хрома (Cr) для исследуемых образцов. Аналогичная закономерность наблюдается у всех исследуемых образцов по выбранным тяжелым металлам (Приложение А (рисунки А1–А7)).

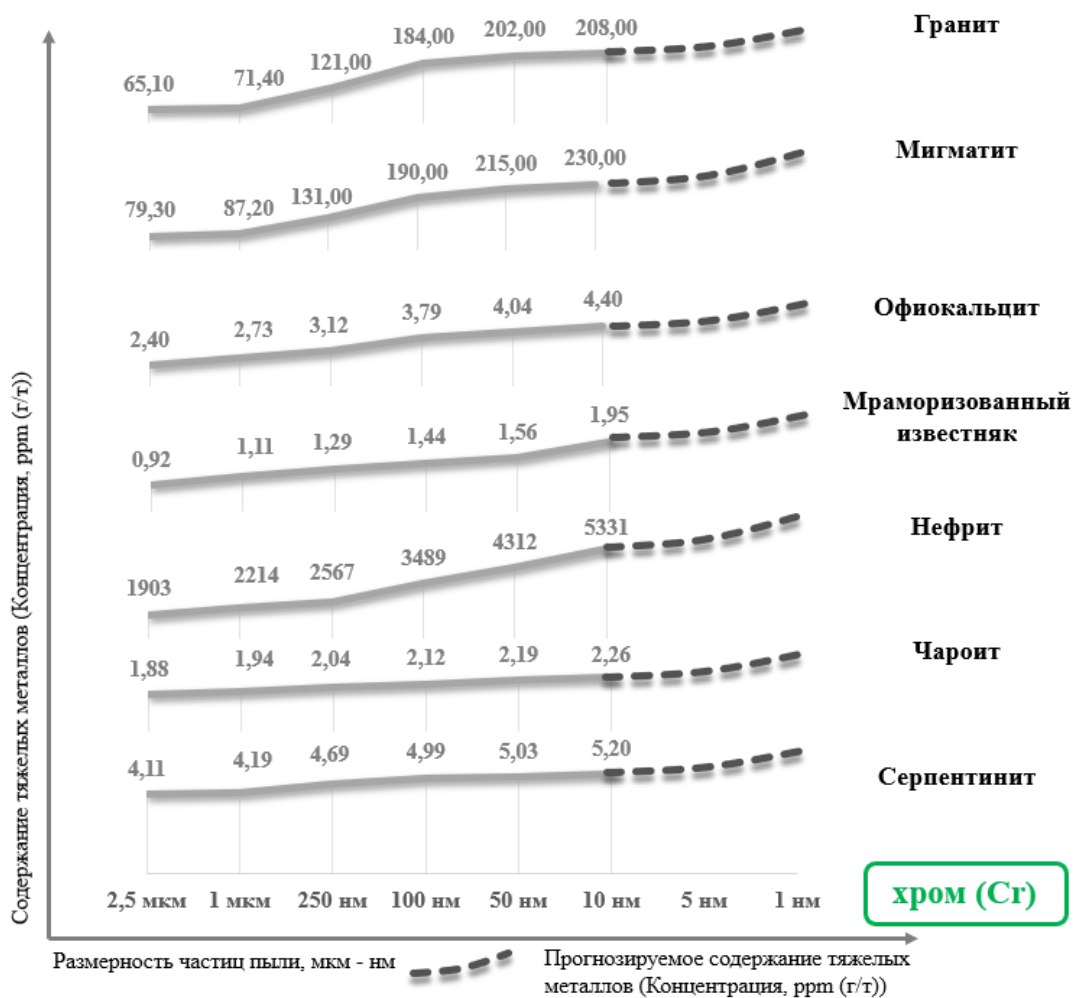


Рисунок 3.2 – Концентрации тяжелого металла хрома (Cr) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

Согласно полученным результатам, образцы пыли нефрита, гранита и мигматита являются наиболее загрязненными. Например, концентрация хрома (Cr) в нефритовой пыли превышает фоновое значение в 3000 раз, в то время как в пыли офиокальцита концентрация хрома (Cr) составляет всего 4,4 г/т. Содержание кобальта (Co) в значительной степени содержится в пыли гранита и мигматита и превышает предел обнаружения в 295 раз. На высоком уровне находится содержание никеля (Ni) в нефритовой пыли (1581 г/т), никель (Ni) содержится в гранитной и мигматитовой пыли и в меньшей степени в пыли офиокальцита (46 г/т). Самое высокое содержание меди (Cu) и цинка (Zn) в пыли гранита (94/80 г/т), мигматита (121/101 г/т) и офиокальцита (10,2/4,59 г/т), а у нефрита отмечается высокое содержание цинка (319 г/т). В пыли мраморизованного известняка содержание тяжелых металлов находится на низком уровне, все тяжелые металлы в ней присутствуют, но в сравнении с другими видами пыли

незначительно. Самое высокое содержание тяжелых металлов в пыли мраморизованного известняка – по хрому (Cr), меди (Cu) и цинку (Zn). В пыли чароита отмечается высокое содержание свинца (Pb) (84 г/т), меди (Cu) и цинка (Zn). А в пыли серпентинита содержится всего 10,9 г/т меди (Cu), 5,2 г/т хрома (Cr), 3,57 г/т кобальта (Co) и 3,49 никеля (Ni). Такие тяжелые металлы, как олово (Sn), таллий (Tl) и свинец (Pb), в рассматриваемых образцах каменной производственной пыли присутствуют в малом количестве. Ниже предела обнаружения только таллий (Tl) в образцах каменной пыли офиокальцита и серпентинита.

Для оценки загрязнения образцов каменной производственной пыли гранита, мигматита и офиокальцита тяжелыми металлами использовали индекс геоаккумуляции (*I_{гео}*), который рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{гео}} = \log_2 \left[\frac{C_{\text{элемент}}}{1,5B_{\text{элемент}}} \right], \quad (3.1)$$

где $C_{\text{элемент}}$ – концентрация элемента в исследуемом образце;

$B_{\text{элемент}}$ – фоновое значение концентрации элемента.

В контексте расчета индекса геоаккумуляции (*I_{гео}*) для оценки загрязнения образцов каменной производственной пыли тяжелыми металлами фоновое значение концентрации элемента ($B_{\text{элемент}}$) представляет собой уровень концентрации данного элемента в окружающей среде, которая не подвергается воздействию исследуемых образцов. Это значение получено из литературных данных, связанных с характеристиками содержания тяжелых металлов в зонах, не затронутых деятельностью промышленных объектов или месторождений, – относительно их фоновых концентраций в почвах Слюдянской рекреационной зоны.

Коэффициент 1,5 в формуле используется для учета возможных вариаций в фоновых значениях концентраций и обеспечения большей чувствительности к изменениям. Это позволяет более точно выделить воздействие исследуемых образцов на уровни загрязнения по сравнению с фоновыми значениями.

Таким образом, фоновое значение концентрации элемента ($B_{\text{элемент}}$) является важным параметром в расчете индекса геоаккумуляции, представляя собой базовый уровень концентрации, характерный для окружающей среды, не испытывающей воздействия промышленных и горнодобывающих процессов [142–145]. Расчет индексов геоаккумуляции выполнен по методике МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы» [146] на основе значений концентраций тяжелых металлов.

Индексы геоаккумуляции для каждого элемента исследуемой каменной пыли приведены на рисунке 3.3. Высокие значения индексов указывают на высокий уровень загрязнения тяжелыми металлами, тогда как низкие значения свидетельствуют о низком уровне загрязнения.

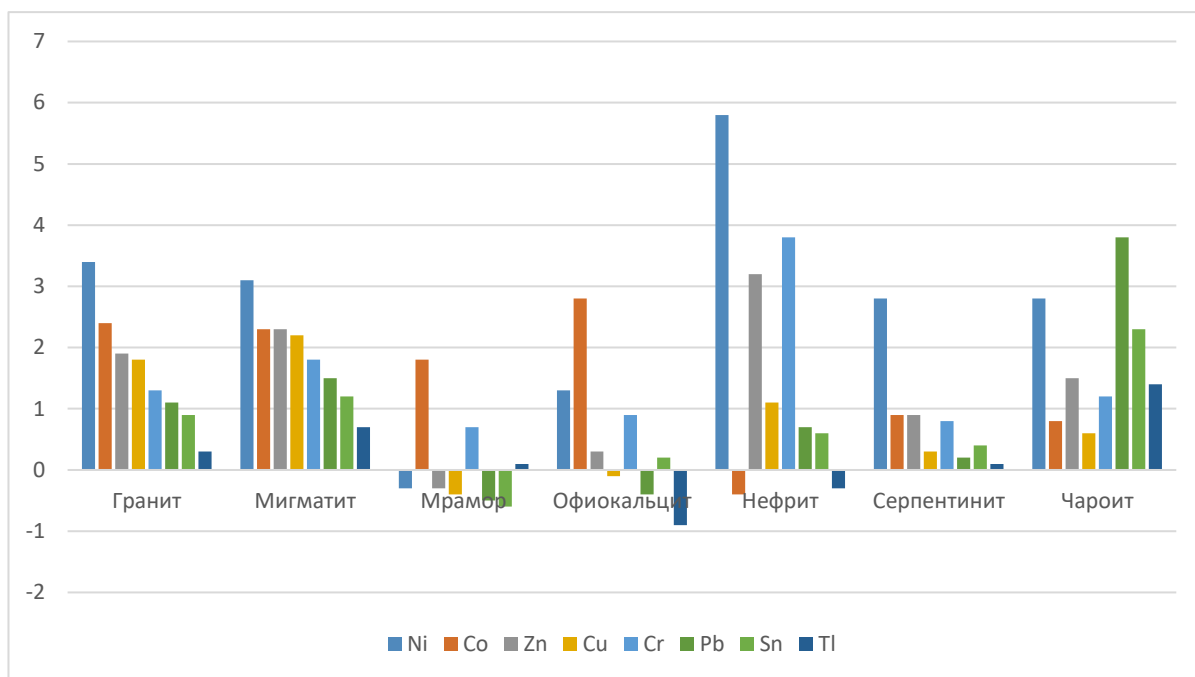


Рисунок 3.3 – Индексы геоаккумуляции элементов в каменной производственной пыли гранитов, мигматитов, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита и чароита относительно их фоновых концентраций в почвах Слюдянской рекреационной зоны

Согласно расчетным данным и данным, представленным на графике, образцы каменной пыли в наибольшей степени загрязнены никелем, содержание которого достигает 1581 ppm (г/т), кобальтом (до 75 ppm (г/т)), медью (до 121 ppm (г/т)) и цинком (до 319 ppm (г/т)). Это значит, что основная масса такого типа пыли аккумулирует именно никель (Ni), кобальт (Co), медь (Cu) и цинк (Zn). В умеренной степени присутствует загрязнение оловом (до 6,6 ppm (г/т)), которое также аккумулируется в данном типе пыли. В исключительных случаях наблюдается загрязнение исследуемых образцов отдельными тяжелыми металлами. Так, чароитовая пыль загрязнена свинцом (до 6,6 ppm (г/т)), гранитная и мигматитная пыль загрязнена кобальтом (до 59 ppm (г/т)). Наименее загрязненными оказались мраморная пыль и офиокальцитовая (до 10,2 ppm (г/т)).

По индексу геоаккумуляции для пыли гранита и мигматита Ангасольского месторождения Слюдянского района Иркутской области установлен геохимический ряд распределения тяжелых металлов на промышленной территории Ангасольского месторождения на основании следующих данных (таблица 3.8, 3.9), опираясь на концентрации тяжелых металлов в пыли nano размеров.

Таблица 3.8 – Расчетные данные для определения геохимического ряда в каменной производственной пыли гранитов

Элемент	С _{фоновое} , Г/Г	Концентрация тяжелого металла С _{элемент} в пыли гранита, г/г	Коэффициент контрастности, К= $\left[\frac{C_{\text{элемент}}}{C_{\text{фоновое}}} \right]$,	Индекс геоаккумуляции для пыли гранита
Ni	9,65	109	11,2	3,4
Co	6,8	55	8,1	2,4
Zn	12,6	80	6,3	1,9
Cu	15,7	94	5,9	1,8
Cr	46,7	202	4,3	1,3
Pb	1,8	6,9	3,8	1,1
Sn	0,55	1,55	3	0,9
Tl	0,03	0,090	1	0,3

Таблица 3.9 – Расчетные данные для определения геохимического ряда в каменной производственной пыли мигматитов

Элемент	С _{фоновое} , Г/Г	Концентрация тяжелого металла С _{элемент} в пыли мигматита, г/г	Коэффициент контрастности, К= $\left[\frac{C_{\text{элемент}}}{C_{\text{фоновое}}} \right]$,	Индекс геоаккумуляции для пыли мигматита
Ni	12,1	124	10,2	3,1
Co	7,7	59	7,7	2,3
Zn	13,2	101	7,6	2,3
Cu	16,5	121	7,3	2,2
Cr	38,4	230	5,9	1,8
Pb	1,7	8,7	5,1	1,5
Sn	0,46	1,84	4	1,2
Tl	0,05	0,13	2,6	0,7

Соответственно, 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).

Вывод: 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: $Ni > Co > Zn > Cu > Cr > Pb > Sn > Tl$.

Полученные результаты подтверждают наличие высокого геоэкологического риска: попадание тяжелых металлов в почву происходит в процессе применения экологически опасных технологических процессов производства, а именно – открытой перевозки руды, выноса пылевых фракций с поверхности отвалов и свалок некондиционного сырья, стоков обогатительных фабрик, и влечет за собой попадание тяжелых металлов в растения. Поступление тяжелых металлов в атмосферный воздух происходит за счет «застойных» явлений атмосферы и нахождения пылевых частиц во взвешенном состоянии продолжительное время.

3.4. Фазовый (рентгеноструктурный) анализ образцов пыли облицовочных и поделочных камней

Информация, которую можно получить из дифрактограмм пыли, имеет прямое отношение к исследованию влияния размера частиц на ингаляционное воздействие каменной пыли. Давайте рассмотрим, почему это исследование важно:

1. Размер и структура частиц: дифрактограммы отражают структуру кристаллических частиц в пыли. Знание размера и формы частиц позволяет предположить, как они могут взаимодействовать с органами дыхания.

2. Ингаляционное воздействие: более мелкие частицы могут легче проникать в дыхательные пути и даже достигать мелких бронхов и альвеол. Размер частиц является ключевым фактором для оценки потенциальных воздействий на здоровье при ингаляции.

3. Оценка риска: знание структуры и размеров частиц пыли помогает оценить риск для здоровья человека, так как от размеров частиц пыли зависит то, какое воздействие она может оказать на легкие и дыхательные пути.

4. Контроль и предотвращение: изучение дифрактограмм помогло в разработке стратегий контроля и предотвращения воздействия каменной пыли. Стратегия может включать усовершенствование технологий обработки материалов или принятие мер для минимизации образования мелких частиц.

5. Экологические последствия: понимание структуры и размеров частиц также важно для оценки экологических последствий. Мелкие частицы могут дольше задерживаться в атмосфере и иметь большую площадь распространения или распространяться на большие расстояния.

Таким образом, анализ дифрактограмм пыли предоставляет ключевую информацию для оценки потенциальных рисков и разработки мер по защите здоровья людей и окружающей среды от воздействия каменной пыли.

Статистически выявленное стандартное отклонение для полуколичественного анализа методом порошковой рентгеновской дифракции в зависимости от фазового состава образца может составлять от 3 до 10 % масс. Предел обнаружения фаз – 0–3 % масс.

Данные порошковой рентгеновской дифракции были получены и с использованием дифрактометра D8 ADVANCE Bruker, оснащённом сцинтилляционным детектором и зеркалом Göbel при пошаговом режиме съёмки в диапазоне дифракционных углов 2θ от 3 до 80 градусов, используя $\text{CuK}\alpha$ источник излучения. Экспериментальные условия были следующими: 40 kV, 40 mA, время экспозиции – 1 с, размер шага – $0.02^\circ 2\theta$. Обработка полученных данных выполнялась с использованием пакета программных средств DIFFRAC^{plus}. Образцы были идентифицированы с помощью Базы данных порошковой дифрактометрии PDF-2 (ICDD, 2007) и идентифицированы с применением программного обеспечения EVA (Bruker, 2007). В случае многофазных образцов в программе TOPAS 4 (Bruker, 2008) определялось процентное содержание фаз. Суммарное содержание идентифицированных фаз приводится к 100%. Статистически выявленное стандартное отклонение для полуколичественного анализа методом порошковой рентгеновской дифракции в зависимости от фазового состава образца может составлять от 3 до 10% масс. Предел обнаружения фаз составляет 0-3 %.

Дифрактограммы исследуемых образцов представлены на рисунках 3.4–3.9.

Образец чароитовой пыли главным образом состоит из следующих фаз: чароита (приблизительно 92 %) и баритокальцита (8 %) (рисунок 3.4).

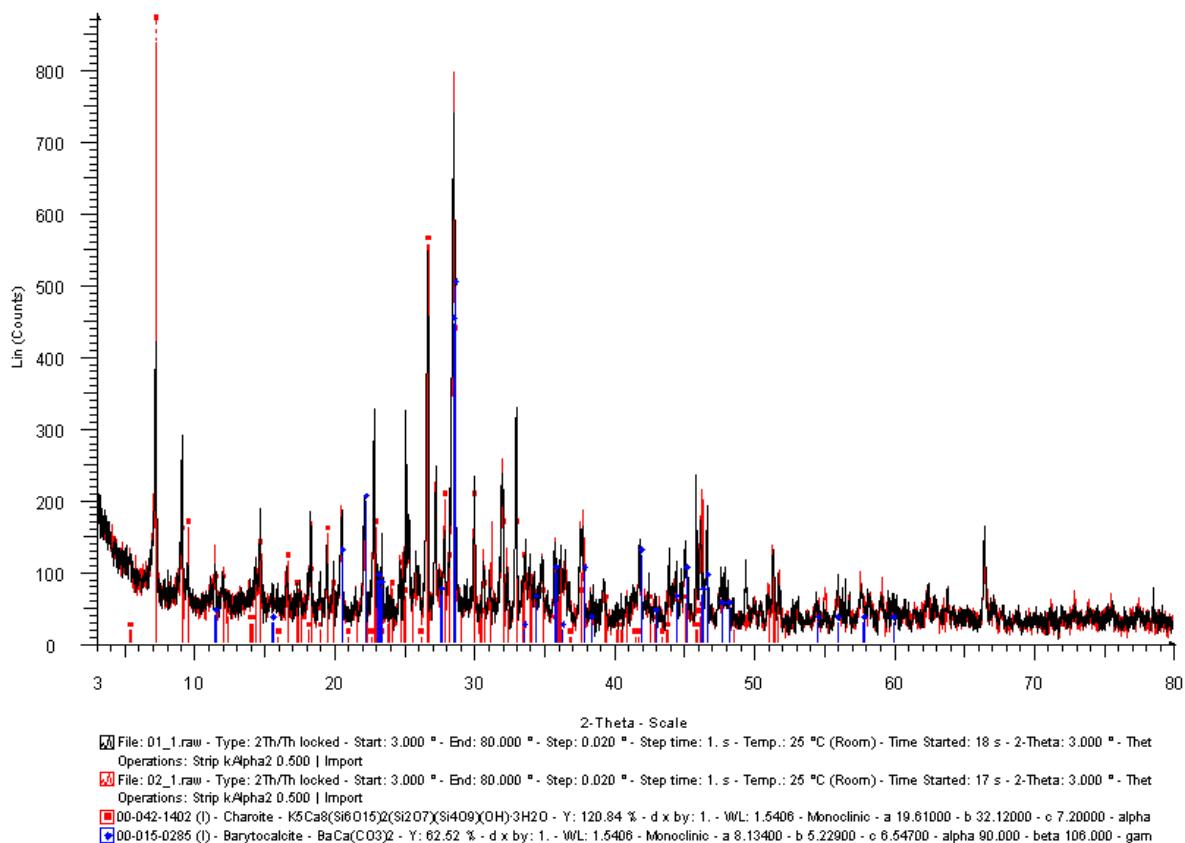


Рисунок 3.4 – Дифрактограмма образца чароитовой пыли

Для пыли чароита (рисунок 3.4), который относится к группе силикатных пород – пироксенов, размеры пиков распределены равномерно, имеет разную интенсивность и высокую упорядоченность её кристаллической структуры, которая сохраняется в измельченном состоянии (состоянии пыли).

Образец нефритовой пыли главным образом состоит из фазы актинолит-тремолитового ряда (по наилучшему совпадению рефлексов с карточками базы данных PDF-2 (ICDD 2007), соответствующего актинолиту (рисунок 3.5).

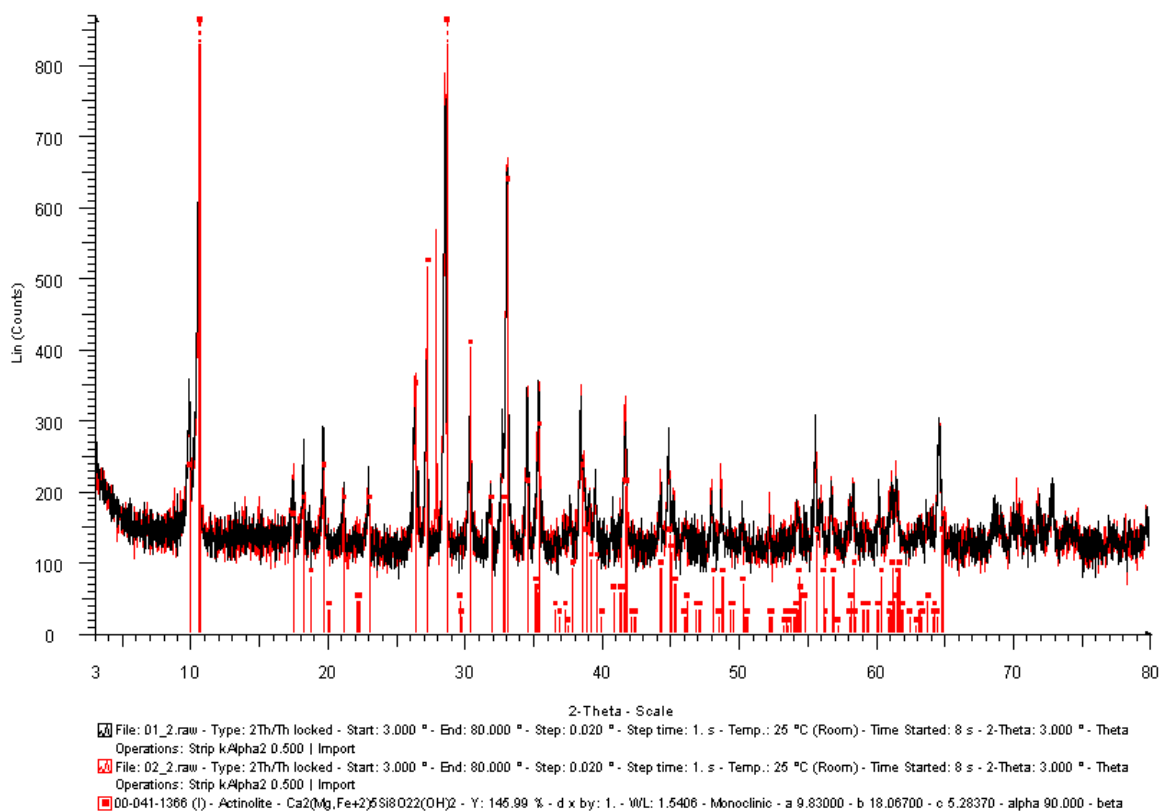


Рисунок 3.5 – Дифрактограмма образца нефритовой пыли

Для пыли нефрита (рисунок 3.5), минерала группы амфиболов с характерной волокнистой структурой сложного переменного состава – это силикат кальция, магния и железа. Характерное распределение пиков с частыми скачками по интенсивности характеризует структуру нефритовой пыли как волокнисто-кристаллическую и подтверждает наличие в данной пыли не только чистого нефрита, но и других минеральных и антропогенных примесей.

Гранит – это магматическая плутоническая горная порода кислого состава нормального ряда щёлочности из семейства гранитов. Состоит из кварца, плагиоклаза, калиевого полевого шпата и слюд: биотита и/или мусковита. Образец гранитно-мигматитовой пыли), главным образом состоит из следующих фаз: фазы, структурно близкой к минералам группы амфибола, идентифицированной по наилучшему совпадению рефлексов с карточками баз данных PDF-2 (ICDD 2007) как роговая обманка (около 55 %), полевого шпата (по наилучшему совпадению рефлексов с карточками из базы данных PDF-2 (ICDD 2007)), ближе к анортиту (27 %), слюды (по наилучшему совпадению рефлексов с карточками из базы данных PDF-2 (ICDD 2007)), ближе всего к мусковиту (около 13 %) и кварца (около 5 %), другие фазы – ниже предела обнаружения (рисунок 3.6).

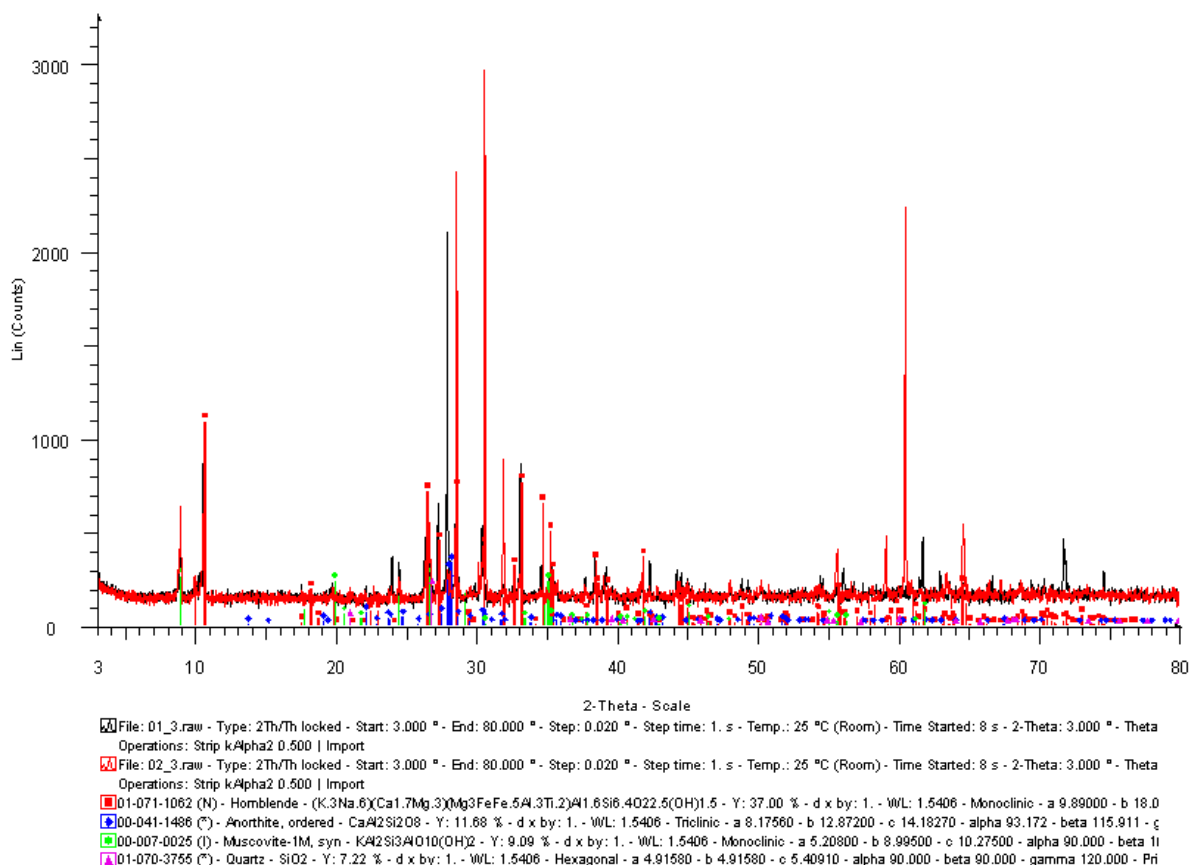


Рисунок 3.6 – Дифрактограмма образца гранитно-мигматитовой пыли

Для гранитно-мигматитовой пыли (рисунок 3.6) характерна низкая интенсивность пиков дифракционной картины, что также указывает на качественную структуру пыли, в исключительных случаях наблюдаются резкие отклонения пиков, которые свидетельствуют о наличии в гранитно-мигматитовой пыли различных кристаллических структур других минералов (амфиболы, роговая обманка, полевые шпаты, анортит, слюда, кварц).

Офикальцит – это мелкозернистая метаморфическая горная порода. В её состав входят кальцит и хризотил, которые, как правило, содержат многочисленные вкрапления и целые змеевидные прожилки благородного серпентина (также известного как офит или змеевик). По структуре напоминает известняк или мрамор, имеет мелкозернистую метаморфическую структуру. Образец офикальцитовой пыли главным образом состоит из фаз лизардита (около 69 %) и кальцита (приблизительно 31 %) (рисунок 3.7).

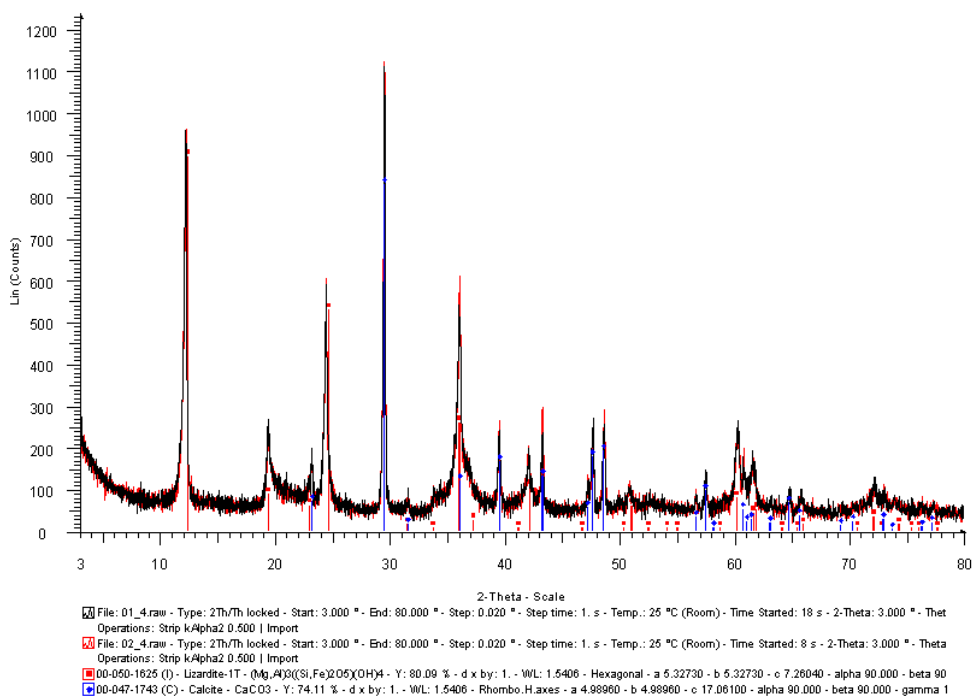


Рисунок 3.7 – Дифрактограмма образца офикальцитовой пыли

Дифрактограмма офикальцитовой пыли (рисунок 3.7) показывает амплитуду интенсивности в пределах трехсот пиков на протяжении всей частоты возникновения дифракционной картины, в отдельных случаях через закономерный шаг возникают высокие пики в пределах тысячной интенсивности, что указывает на равномерное распределение кристаллических структур лизардита и кальцита.

Образец мраморной пыли главным образом состоит из фазы кальцита, другие фазы – ниже предела обнаружения. Рисунок 3.8.

Мрамор – это метаморфическая горная порода, состоящая из кальцита CaCO_3 с примесями других минералов. Для пыли мраморизованного известняка (рисунок 3.8) характерны максимально низкие пики интенсивности в сравнении с другими исследуемыми образцами, кристаллическая структура высокого качества и состоит в основном из кальцита, пики прослеживаются при единичных примесях и не учитываются при среднем значении интенсивности отражения дифракционной картины мраморной пыли.

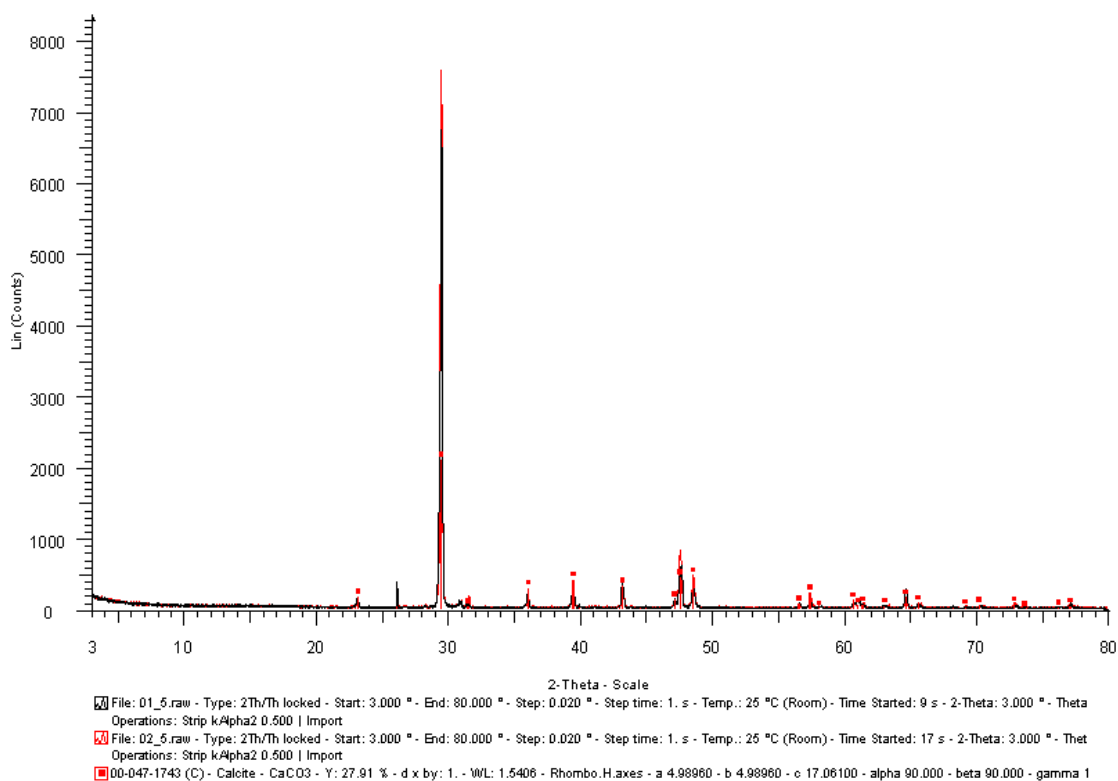


Рисунок 3.8 – Дифрактограмма образца мраморной пыли

Образец серпентинитовой пыли главным образом состоит из фазы лизардита, другие фазы – ниже предела обнаружения. Рисунок 3.9. Серпентинит – это плотная горная порода, образовавшаяся в результате изменения серпентинизации гипербазитов при метаморфизме магматических пород группы перидотита и пикрита, иногда также доломитов и доломитовых известняков.

Дифрактограмма пылевого образца серпентинита указывает на наличие более аморфной, подвижной кристаллической структуры, которая возникает при замещении одних структур другими, высокие пики единичны, в целом находятся на уровне трехсот пиков при изменении угла отражения. Анализ дифракционной картины пылевидной фракции серпентинита позволяет установить наличие однотипных кристаллических структур лизардита. Лизардит является одной из форм серпентина, и его присутствие в пылевидной фракции свидетельствует о специфической составляющей данного образца серпентинита.

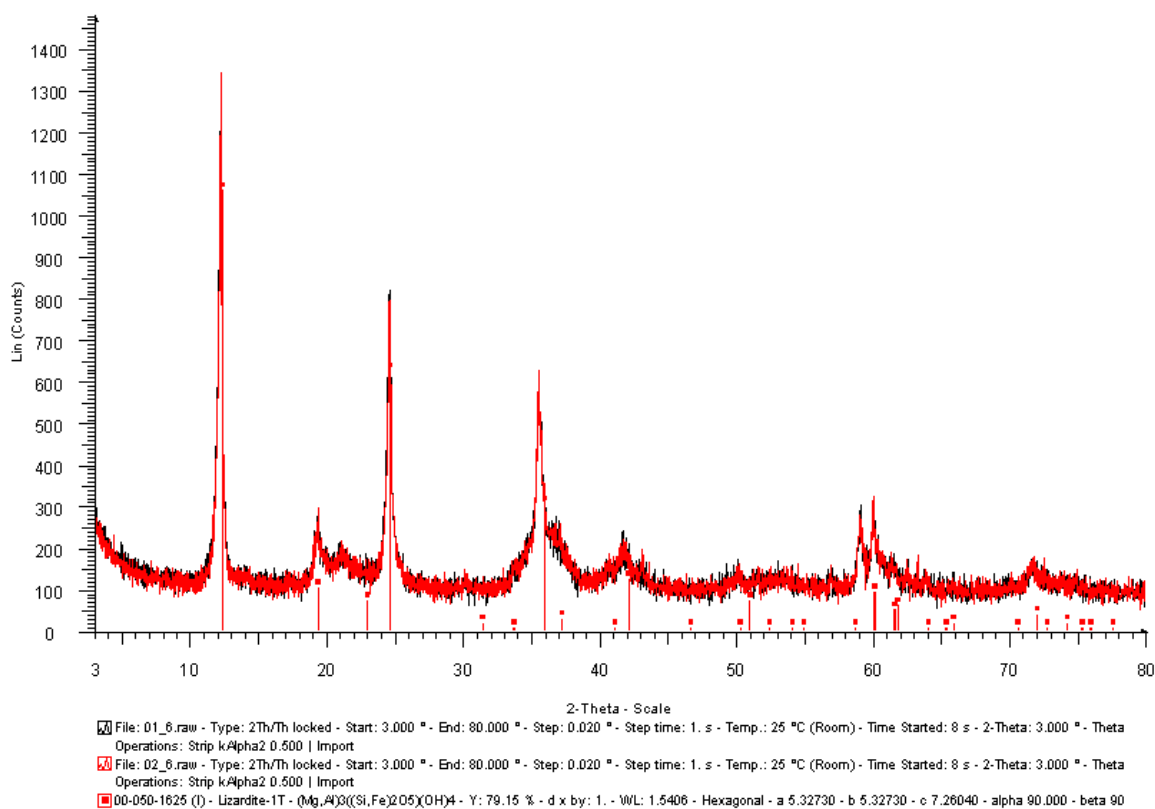


Рисунок 3.9 – Дифрактограмма образца серпентинитовой пыли

Рентгеновский метод фазового анализа основан на том, что для рентгеновских лучей кристаллическая решетка является дифракционной. Условием дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке является условие Вульфа-Брэгга:

$$2d\sin\theta = n\lambda,$$

Где d – расстояние между соседними кристаллографическими плоскостями, с атомами которых взаимодействуют рентгеновские лучи; θ – угол под которым наблюдается дифракция; n – порядок дифракционного максимума (порядок «отражения»); λ – длина волны монохроматических рентгеновских лучей, падающих на кристалл.

Полученные дифрактограммы демонстрируют зависимость интенсивности дифракционной картины от концентрации фаз в образцах. Результаты дифракционного анализа, представленные на рисунках 3.4–3.9, позволяют более детально изучить структурные особенности и состав образцов каменной пыли исследуемых в работе каменных материалов. На основе дифрактограмм можно сделать следующие выводы.

1. Чароитовая пыль (рисунок 3.4): равномерное распределение размеров пиков свидетельствует о высокой кристаллизации чароита.

2. Нефритовая пыль (рисунок 3.5): переменная интенсивность пиков указывает на сложную кристаллическую структуру нефритовой пыли, подтверждая наличие примесей и других минералов.

3. Гранитно-мигматитовая пыль (рисунок 3.6): высокая интенсивность пиков при разных углах дифракции говорит о высокой кристаллической структуре пыли. Резкие отклонения пиков могут указывать на высокую концентрацию различных кристаллических структур.

4. Офикальцитовая пыль (рисунок 3.7): равномерное распределение интенсивности пиков по всей дифрактограмме подтверждает равномерное распределение кристаллических структур лизардита и кальцита.

5. Мраморная пыль (рисунок 3.8): основной пик с высокой интенсивностью указывает на однородность структуры, главным образом состоящей из кальцита.

6. Серпентинитовая пыль (рисунок 3.9): ярко выраженные пики с высокой интенсивностью свидетельствуют об однородности кристаллической структуры серпентинитовой пыли, состоящей в основном из различных кристаллических структур лизардита.

Анализ дифрактограмм не только позволил определить структурные особенности пыли, но также предоставил информацию о ее качестве, примесях и взаимодействии с окружающей средой. Полученные результаты были применены для оценки возможных экологических последствий распространения пыли через воздушные потоки и последующим выпадением её вместе с осадками в водоёмы, на кроны деревьев, траву и почву. Результаты рентгеновских исследований структуры и состава каменной пыли могут быть использованы при подготовке данных для контроля и управления воздействием пыли на окружающую среду и здоровье человека, а также при разработке технологической системы автоматизации управления геоэкологическими рисками, описанных в разделе 4.2.

3.5. Особенности распространения пыли облицовочных и поделочных камней в атмосферном воздухе

Исследования каменной производственной пыли, которые включают анализ фракционного и дисперсного состава, выделение наночастиц, рентгенографический и дифракционный анализ, исследование элементного и химического состава с использованием масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и получение

изображений методом электронной микроскопии, дают детальную визуализацию процесса распространения пыли в атмосферном воздухе.

Ежегодно рассматриваемые объекты исследования выбрасывают в атмосферу значительные объемы производственной неорганической пыли, общий объем таких выбросов может достигать 120 т в год. Эта пыль затем оседает на растительности и водных акваториях, загрязняя тем самым окружающую среду.

Для оценки уровня загрязнения атмосферы вредными веществами применяют интегральные санитарно-гигиенические показатели, включая индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) (таблица 3.10). Индекс загрязнения атмосферы представляет собой комплексный показатель, который учитывает различные химические и физические параметры вредных веществ в атмосфере. Он позволяет оценить общее воздействие производственной пыли на окружающую среду и здоровье людей.

Проведение таких комплексных исследований имеет важное значение для понимания влияния производственной пыли на окружающую среду и для разработки мероприятий по снижению загрязнения и охране окружающей среды. Это также способствует определению возможных рисков и последствий для здоровья людей, проживающих и работающих вблизи данных объектов. Данная информация может быть использована при разработке регулирующих мер и стандартов для защиты окружающей среды и общественного здоровья [126].

Таблица 3.10 – Индекс загрязнения атмосферы на исследуемых предприятиях

Вещество	ПДКг, мг/м ³	Ангасольское месторождение гранитов и мигматитов	Карьер «Перевал» по добыче мраморизованного известняка	Алзагайское месторождение офиокальцита	Оспинское месторождение нефрита	Участок «Старый» месторождения «Сиреневый камень»
Производственная пыль	0,8	1,94	2,02	1,12	1,54	1,46
ИЗА		14,26	16,09	2,74	7,13	6,07
Характеристика загрязненности атмосферы		Сильнозагрязненная	Сильнозагрязненная	Слабозагрязненная	Загрязненная	Загрязненная

На рисунке 3.10 представлено ранжирование исследуемых предприятий по значению индекса загрязнения атмосферы, позволяющее сравнить их вклад в загрязнение и определить, какие объекты имеют наибольшее воздействие на окружающую среду. Эти данные являются важными для принятия решений о необходимости внедрения мер по снижению выбросов и защите окружающей среды. Такие меры могут включать

использование современных технологий и оборудования, разработку эффективных систем очистки и переработки пыли, а также строгий контроль за соответствием нормативам выбросов.

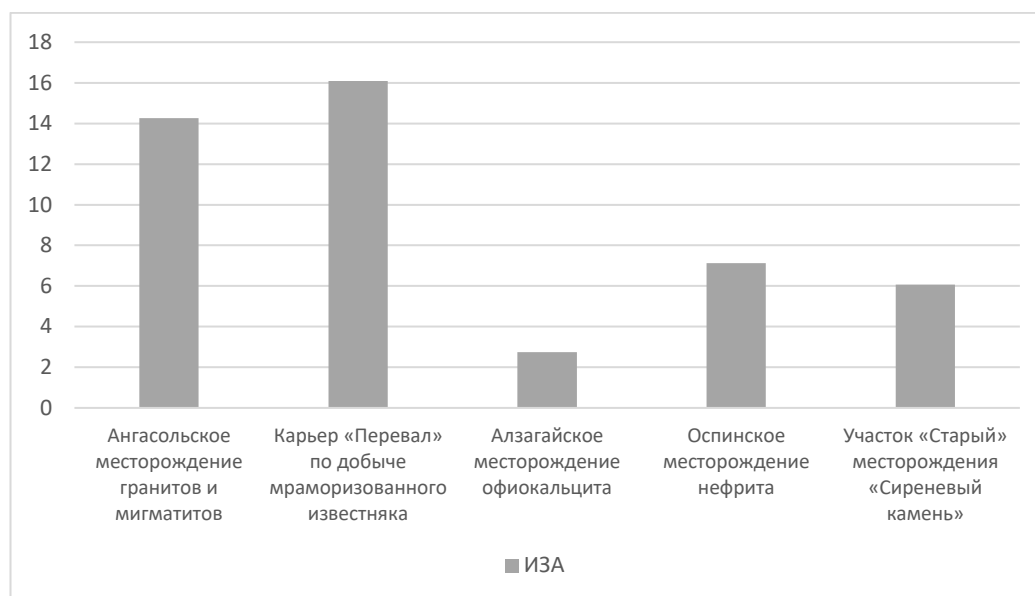


Рисунок 3.10 – Сравнительная диаграмма показателя ИЗА

Для выполнения расчетов и построения карт использовался программный комплекс Golden Software Surfer, который предоставляет широкие возможности анализа геоданных и создания высококачественных географических карт.

На рисунке 3.11 даны схемы с указанием зон распространения пыли для рассматриваемых месторождений, таких как Ангасольское месторождение гранитов и мигматитов, карьер «Перевал» по добыче мраморизованного известняка, Алзагайское месторождение офиокальцита, Оспинское месторождение нефрита и участок «Старый» месторождения «Сиреневый камень» по добыче чароита. Каждая из этих схем демонстрирует характерные особенности распределения пыли вокруг соответствующего месторождения.



Рисунок 3.11 – Графическое изображение зоны распространения пыли исследуемых месторождений

Общая карта зон распространения пыли для всех исследуемых объектов, которая объединяет информацию о концентрациях пыли на всех рассмотренных месторождениях, позволяет более полно оценить общий уровень экологического риска в регионе и выделить особо уязвимые участки, требующие пристального внимания и контроля. Результаты, представленные на карте, играют важную роль в разработке мер по снижению воздействия пылевых выбросов на окружающую среду и здоровье людей, а также в принятии решений об оптимальных местах размещения горнодобывающих объектов с минимальными экологическими последствиями.

Актуальность разработки и реализации мероприятий по снижению геоэкологического риска обусловлена растущим объемом горнодобывающих работ и расширением деятельности на карьерах. В их число должно входить внедрение эффективных мер по сокращению пылевых выбросов, а также повышение эффективности существующих систем пылеочистки и контроля за ситуацией с загрязнением воздуха.

Один из способов уменьшить дисперсию пыли и способствовать ее осаждению – использование специальных устройств и технологий, которые помогают комкованию и агрегации частиц пыли на источниках выбросов. Сокращение дисперсии пыли достигается

применением пылеулавливающего оборудования, увлажнением зоны выбросов или применением добавок, способствующих слипанию пылевых частиц.

Кроме того, организация мониторинговых наблюдений за качеством воздуха и загрязнением окружающей среды вблизи горнодобывающих предприятий крайне важна для своевременного выявления уровня загрязнения атмосферного воздуха и принятия соответствующих мер по снижению негативных явлений.

Внедрение эффективных методов сокращения пылевых выбросов на горнодобывающих предприятиях способствует созданию более благоприятных условий для окружающей среды, снижению геоэкологического риска и защите здоровья людей, проживающих вблизи данных объектов. Это важный шаг к обеспечению экологической устойчивости в различных областях горнодобывающей промышленности.

3.6. Гранулометрический состав и морфология каменной пыли

Фракции микрочастиц и наночастиц пыли гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита, выделенные методами мембранной фильтрации и седиментации, изучались с применением методов электронной микроскопии и лазерной дифракции. Гранулометрический состав фракций исследуемых горных пород представлен на рисунке 3.12, по которому видно, что размер частиц составляет от 50 до 300 нм.

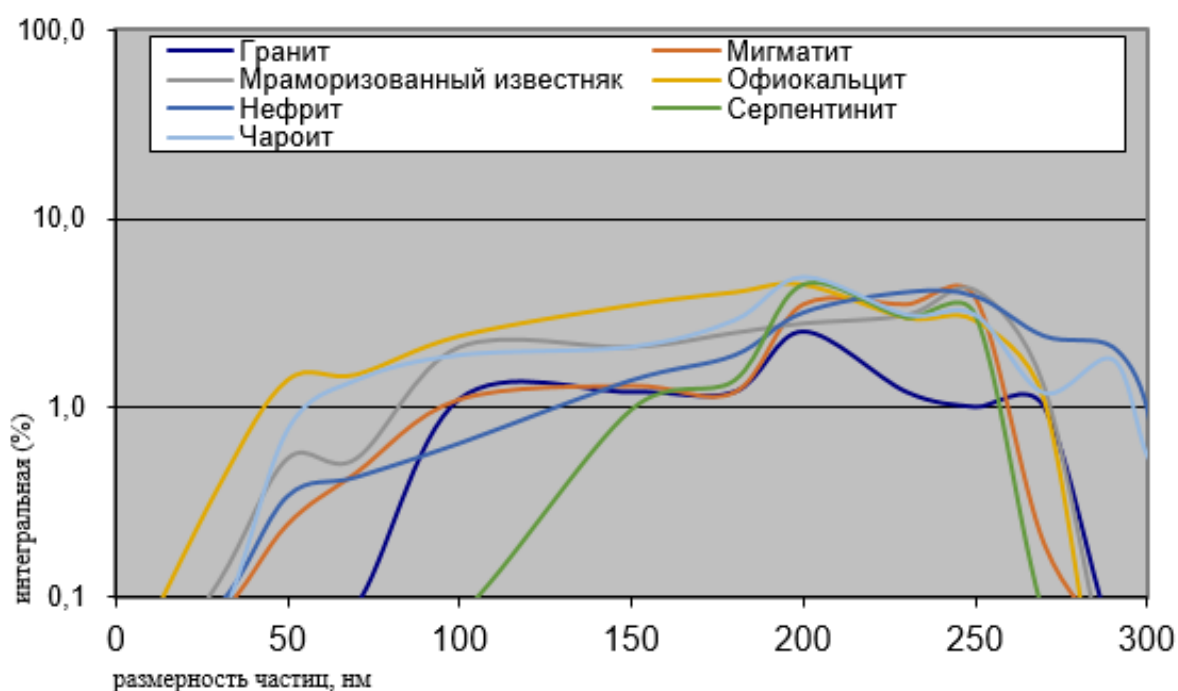


Рисунок 3.12 – Гранулометрический состав фракций частиц каменной пыли

Результаты изучения гранулометрического состава свидетельствуют, что в частицах каменной пыли гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита содержатся частицы размером, входящим в диапазон наноразмеров. В целом методом мембранной фильтрации можно выделить и меньшие по размеру фракции наночастиц. Более крупные частицы в основном удерживаются на поверхности фильтра, что позволяет априорно исключить их из оставшегося размерного состава частиц. Наночастицы каменной пыли, как и частицы вулканического пепла, почвы, пепла горения, состоят из твердых частиц. Они в результате естественных и антропогенных процессов постоянно перемещаются между атмосферой, гидросферой и педосферой [73; 79; 84; 85; 99; 125; 129], и их реакционная способность увеличивается с уменьшением размеров частиц [114], а удельная площадь поверхности наночастиц значительно превышает аналогичный показатель для микрочастиц. Следовательно, с учетом этих характеристик и данных по подвижности частиц, приведенных в разделе 3.6, становится очевидной их способность проникновения в живые организмы различных экосистем, что вызывает экологический риск [68; 89].

На рисунках 3.13–3.14 на примере гранита и чароита отображены форма и размер частиц.

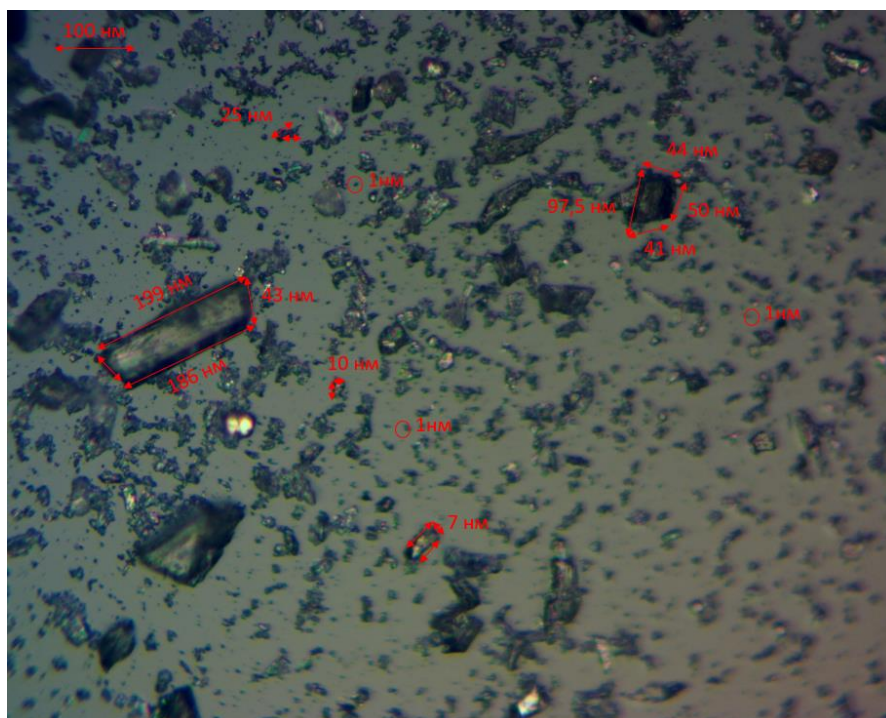


Рисунок 3.13 – Микрофотография фракций наночастиц и микрочастиц пыли гранита, отрезок – 100 нм, в проходящем свете

Как видно по микрофотографии (рисунок 3.13), в образцах пыли гранита 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 микро размеров для сравнения.

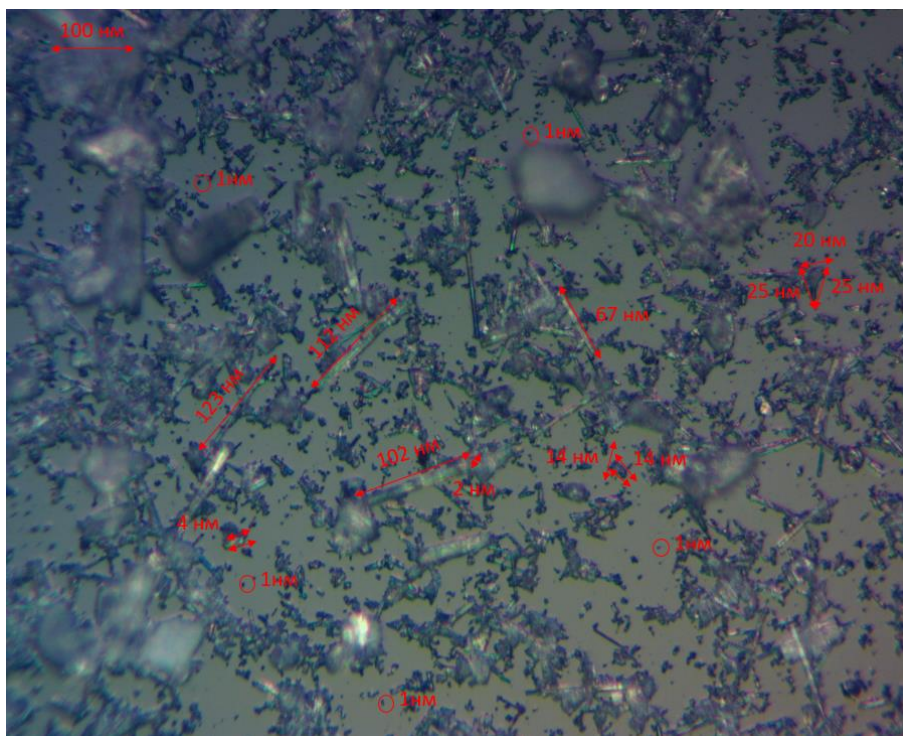


Рисунок 3.14 – Микрофотография фракций наночастиц и микро частиц пыли чароита, отрезок – 100 нм, в проходящем свете

На микрофотографии частиц пыли чароита (рисунок 3.14) 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 микро размеров для сравнения, а также отдельно обозначены игольчатые частицы с указанием их размеров.

Частицы каменной пыли размерностью, входящей в диапазон наночастиц, характеризуются определенной морфологией и структурой, которые определяют характер воздействия на живые организмы и экосистемы окружающей среды. Микрофотографии каменной пыли гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита изображены на рисунках Б1–Б5 приложения Б.

В целом частицы пыли гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита по форме представляют собой прямоугольно-

ориентированные тонкие пластинки, и игольчатые тонкие вытянутые по структуре пластинки с острыми краями характерны для чароита. Исследование каменной пыли проведено на поляризационном микроскопе «Микромед ПОЛАР 3», предназначенном для исследований объектов в проходящем свете – поляризованном и обыкновенном и в отраженном свете – поляризованном и обыкновенном, с камерой Tourcam uctos 14000 кра.

Как известно, частицы неправильной формы, типа игольчатой и прямоугольной, дольше сохраняются во взвешенном состоянии, в отличие от частиц сферической формы, которые намного быстрее оседают. В исследованиях В. А. Архиповой и И. М. Шереметьевой это подтверждается на примере частиц каменной пыли SiO₂, авторами также описано, как форма частиц пыли влияет на их поведение в атмосферном воздухе и чем это опасно для живых организмов, которые дышат воздухом, насыщенным этими твердыми частицами. Ссылаясь на данных авторов, мы предполагаем следующую градацию для частиц пыли гранита, мигматита, мраморированного известняка, нефрита, офиокальцита, серпентинита и чароита, представленную в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – 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 заболеваниями
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

Сравнительный анализ морфологических особенностей каменной пыли разного гранулометрического состава показал, что все частицы представляют потенциальную опасность для живых организмов, отличаясь лишь степенью влияния.

3.7. Экологические риски при загрязнении атмосферы каменной пылью

В данном исследовании были проанализированы крупнейшие в регионе месторождения каменного материала, которые разрабатываются открытым способом. Важно отметить, что уровень автоматизации производства на этих карьерах различен, на предприятиях постоянно проводятся мероприятия по усовершенствованию и модернизации технологии добычи, а также повышению уровня экологической безопасности.

В ходе исследования были выполнены расчеты показателя индекса загрязнения атмосферы для нескольких исследуемых предприятий, с помощью которых достигалась цель исследования, заключающаяся в определении уровня загрязнения атмосферы на указанных предприятиях, вызванного выбросами указанных экстрессоров. Эти загрязнители могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Использование данных геоинформационных технологий позволило создать карты зон распространения пыли, образующейся в результате деятельности карьеров, и определить площади, на которые оказывается воздействие загрязнителей разных концентраций. Применяемый подход дает возможность оценить экологический риск и определить наиболее критические участки. Таким образом, результаты исследования позволяют более осознанно подходить к вопросам охраны окружающей среды и разработке мер по снижению воздействия производственных выбросов на атмосферу и прилегающие территории.

Анализ данных позволил выявить, что месторождение мраморизованного известняка карьера «Перевал» является объектом с наивысшим индексом загрязнения атмосферы. Это предприятие вносит значительный вклад в загрязнение окружающей атмосферы, особенно посредством выбросов каменной пыли. Чем выше значение ИЗА, тем больше загрязнителей попадает в атмосферу и тем серьезнее их воздействие на окружающую среду.

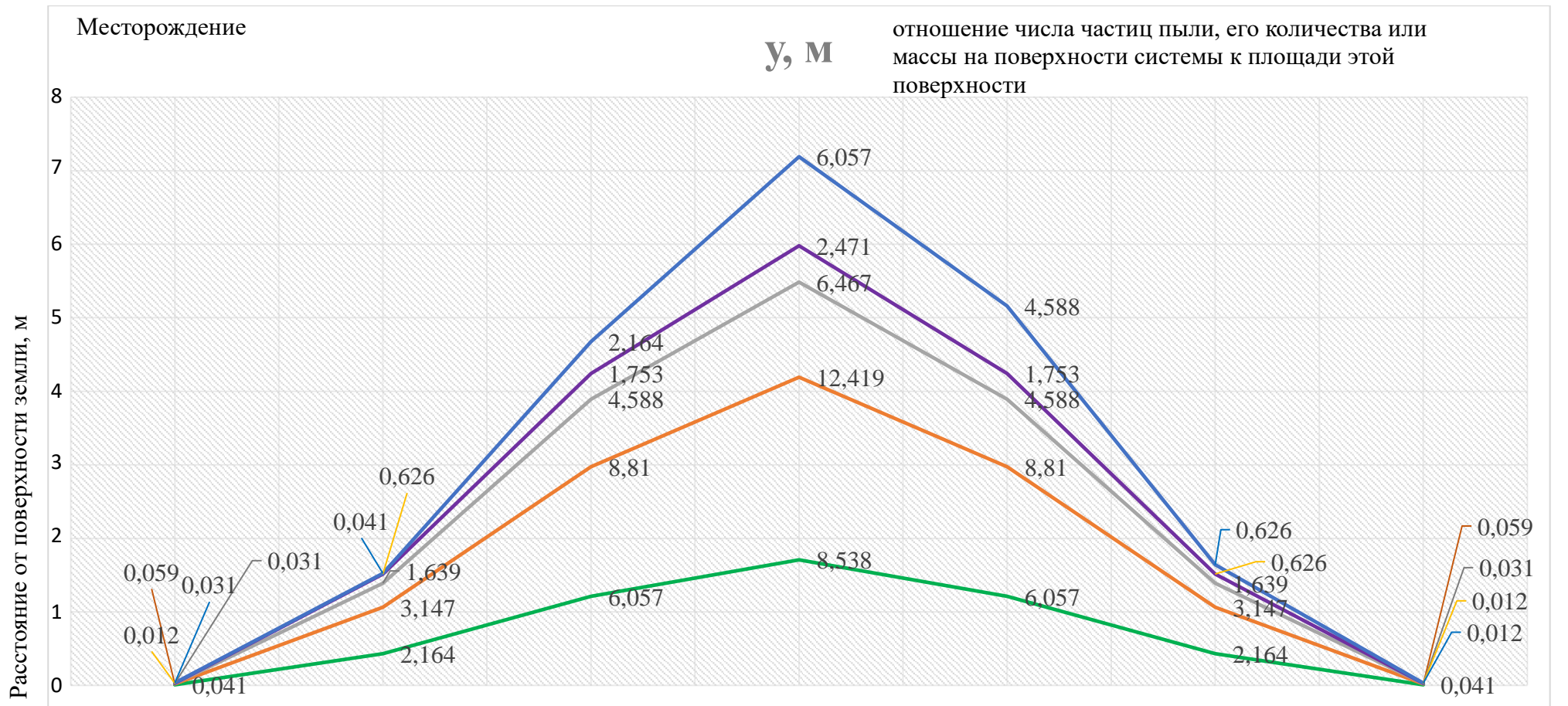
Основным фактором экологического влияния выбросов горнодобывающих предприятий на окружающую среду является формирование пылевого облака загрязненного воздуха (первичного, вторичного и т. п.). В целях экологической оценки данных предприятий проводится комплекс математических расчетов для различных видов экологического воздействия, оказываемого ими на атмосферу, которые позволяют оценить границы распространения экологической кризисной ситуации в окружающей среде.

Исследование процессов диффузии и распределения вредных веществ в атмосфере

включает в себя детальный анализ. Мы рассматриваем высоту выпуска и уровень предельно допустимых выбросов (ПДВ) для отдельных фиксированных источников, оказывающих негативное воздействие на атмосферный воздух, исходя из нормативов, утвержденных Приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 273 от 06.06.2017 г. «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух». Для изучения процессов рассеивания вредных веществ в атмосфере в районах пяти предприятий были выполнены расчеты для условий наличия конкретного источника загрязнения атмосферы.

Расчет показателя ИЗА выполнялся в следующей последовательности: определение расхода газовой смеси с учетом климатических особенностей; расчет поверхностных концентраций загрязняющих веществ по оси эмиссионного факела на некоторых расстояниях; приземные концентрации загрязняющих веществ. Последовательность расчетов приведена в приложении Е.

В целях настоящего исследования анализировался конкретный источник загрязнения атмосферы, охватывая оценку пяти конкретных объектов, с целью на предмет выявления процессов рассеивания вредных веществ в атмосфере. Результаты расчетов представлены на обобщенном графике (рисунок 3.15).



Приземные концентрации загрязняющих веществ

- Месторождение гранитов и мигматитов Ангасольское
- Месторождение мраморизованного известняка «Перевал»
- Месторождение офиокальцита Алзагайское
- Месторождение нефрита Оспинское
- Месторождение чаройта "Сиреневый камень", участок "Старый"

Рисунок 3.15 – Схема распределения поверхностных концентраций пыли в приземном слое атмосферного воздуха

Аналитическая модель для описания пространственного распределения концентрации опасных для окружающей среды веществ как в нестационарном, так и в стационарном случаях развития возможных неблагоприятных событий, связанных с выбросом опасных веществ, может быть разработана на основе общей теории механики сплошных сред, согласно которой опасное загрязняющее вещество (пыль) вместе с воздухом создает двухкомпонентную газовую систему. Концентрация загрязняющего атмосферу вещества определяется его плотностью $\rho_3(\vec{r}, t)$ в двухкомпонентной системе. Суммарная плотность системы

$$\rho_{\Sigma}(\vec{r}, t) = \rho_3(\vec{r}, t) + \rho_n(\vec{r}, t), \quad (3.2)$$

где ρ_n – плотность воздуха.

Загрязнение атмосферы в разных точках пространства в разные моменты времени полностью задается функцией $\rho_n(\vec{r}, t)$. Необходимо получить полную систему уравнений, решая которую можно найти $\rho_3(\vec{r}, t)$ при заданном начальном распределении концентрации загрязняющего вещества $\rho_3(\vec{r}, t = 0)$ и предельных условиях.

В двухкомпонентном газе загрязнение движется со скоростью $\vec{v}_3(\vec{r}, t)$, а воздух – со скоростью $\vec{v}_n(\vec{r}, t)$. Наряду со скоростями \vec{v}_3 и \vec{v}_n введем также конвективную (общую) скорость $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$ двухкомпонентного газа равенством

$$\rho_{\Sigma} \vec{V}_k = \rho_3 \vec{v}_3 + \rho_n \vec{v}_n. \quad (3.3)$$

Если двухкомпонентная смесь находится в покое, то $\vec{V}_k = 0$, тогда имеем

$$0 = \rho_3 \vec{v}_{3,д} + \rho_n \vec{v}_{n,д}, \quad (3.4)$$

где $\vec{v}_{3,д}$ и $\vec{v}_{n,д}$ – соответственно скорости движения загрязняющего вещества и воздуха в двухкомпонентной системе, которая в целом находится в состоянии покоя, потому что $\vec{V}_k = 0$.

Изменение концентраций компонентов в двухкомпонентной системе, находящейся в состоянии покоя, как известно, называется диффузией. Диффузия обусловлена встречным движением компонентов с соответствующими скоростями $\vec{v}_{3,д}$ и $\vec{v}_{n,д}$, которые не равны нулю.

Явление диффузии загрязняющего вещества определяется вектором диффузии

$$\vec{i}_3 = \rho_3 \vec{v}_{3,д}, \quad (3.5)$$

который определяет количество загрязнителя, переносимого диффузией в единицу времени сквозь единицу поверхности, перпендикулярную вектору $\vec{v}_{3,д}$. Аналогично вектор диффузии воздуха в двухкомпонентном газе определяется равенством:

$$\vec{i}_n = \rho_n \vec{v}_{n,д}. \quad (3.6)$$

При этом выполняется уравнение

$$\vec{i}_3 = \vec{i}_n. \quad (3.7)$$

Физической причиной диффузии является встречное тепловое движение молекул загрязнителя и молекул воздуха со средними скоростями $\vec{v}_{3,д}$ и $\vec{v}_{n,д}$.

Конвективная скорость движения двухкомпонентного газа \vec{V}_k и скорость диффузного движения в скоростях движения загрязнителя \vec{v}_3 и воздуха \vec{v}_n описывается равенствами

$$\vec{v}_3 = \vec{V}_k + \vec{v}_{3,д}, \quad (3.8)$$

$$\vec{v}_n = \vec{V}_k + \vec{v}_{n,д}. \quad (3.9)$$

Полная система уравнений, описывающая изменение концентрации загрязнителя в пространстве и времени, может быть получена следующим путем, начиная с закона сохранения массы загрязнителя. С этой целью рассматривается некоторый замкнутый объем V , ограничивающий замкнутую поверхность f . Масса загрязнителя в объеме V , очевидно, равна

$$M_3 = \int_V \rho_3(\vec{r}, t) d^3r \quad (3.10)$$

Изменение массы загрязнителя в замкнутом объеме V в единицу времени t равно

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_3 d^3r = - \oint_f \rho_3(\vec{r}, t) d^3r \quad (3.11)$$

Здесь первый интеграл по замкнутой поверхности f в правой части уравнения дает изменение массы загрязнителя в объеме V в единицу времени благодаря его движению через замкнутую поверхность f . Вторым интегралом в правой части уравнения дается изменение массы загрязнителя в объеме V в единицу времени из-за наличия в нем источников и выбросов загрязнителя, задаваемых функцией Q_3 .

Источники связаны с внешними выбросами загрязнителя в атмосферу и могут быть описаны функцией $Q_{дж}(\vec{r}, t)$. Функция $Q_{дж}(\vec{r}, t)$ задает массу загрязнителя, выбрасываемую внешними источниками загрязнения за единицу времени в единицу объема атмосферного воздуха, содержащего точку \vec{r} .

Выбросы, подобно источникам, можно описать функцией $Q_{см}(\vec{r}, t)$, а значит,

$$Q_3(\vec{r}, t) = Q_{дж}(\vec{r}, t) + Q_{см}(\vec{r}, t). \quad (3.12)$$

Исходя из теоремы Остроградского-Гаусса, интеграл по поверхности, содержащийся в правой части уравнения, превращаем в интеграл по объему.

Кроме того, считаем, что объем V не меняется со временем. Это позволяет дифференцировать по времени подынтегральное выражение в левой части уравнения. В конце концов получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V d^3r = - \int_V \text{div} \rho_3 \vec{v}_3 d^3r + \int_V Q_3 d^3r \quad (3.13)$$

Учитывая, что равенство выполняется для любого объема V , получим

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} d^3r = - \int_V \text{div} \rho_3 \vec{v}_3 d^3r + \int_V Q_3 d^3r \quad (3.14)$$

Движение двухкомпонентного газа как целого описывается уравнением Навье – Стокса

$$\rho_\Sigma \left\{ \frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V}_k \nabla) S \right\} = \partial_{ik} \frac{\partial V_{ki}}{\partial x_k} - \text{div} \vec{q} + \mu \text{div} \vec{v} \quad (3.15)$$

Закон сохранения энергии двухкомпонентного газа записывается в виде

$$\rho_\Sigma T \left\{ \frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V}_k \nabla) S \right\} = \sigma_{ik} \frac{\partial V_{ki}}{\partial x_k} - \text{div} \vec{q} + \mu \text{div} \vec{v} \quad (3.16)$$

где T и S – соответственно температура и энтропия двухкомпонентного газа.

Тензор вязкости y_{ik} , вектор потока тепла \vec{q} и химический потенциал м двухкомпонентного газа предусматриваются заданными.

Выражение для вектора диффузии \vec{i}_3 с записывается из простых феноменологических соображений. Будем считать, что в горизонтальной плоскости, совпадающей с плоскостью x, y , качества атмосферы не зависят от направления, но различные в вертикальном направлении, совпадающем с осью z . Тогда компоненты вектора диффузии \vec{i}_3 можно записать в виде:

$$i_{3x} = -D_{\Pi\rho\Sigma} \frac{\partial \rho_3}{\partial x \rho_\Sigma} - K_T \frac{\partial T}{\partial x} - K_p \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3.17)$$

Общее решение такой задачи в настоящее время получить невозможно. Развитие современных компьютерных технологий позволяет для каждого конкретного случая получить численное решение для функции $\rho_3(\vec{r}, t)$. Между тем несомненные преимущества имеют аналитические решения задачи о распространении загрязнения, которые можно получить в условиях наличия ряда предположений, существенно упрощающих уравнения.

Аналитические решения не только дают точное решение задачи при сделанном ряде предположений, они еще помогают качественно описать распространение загрязнений в общих случаях даже тогда, когда сделанные предположения не реализуются. Ниже приводится ряд таких аналитических решений.

Из решения данной задачи следует, что концентрация загрязнения экспоненциально уменьшается. За время t_{cm} концентрация в каждой точке уменьшается в e раз. Дальнейшее исследование решения удобно провести в модели простого начального условия, когда в начальный момент времени масса загрязнения M_0 находится в малом объеме, содержащемся в начале координат. Такое начальное условие аппроксимируется дельта-функцией с множителем M_0 , т. е.

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{M_0}{8(\pi D_{\Pi t})^{3/2}} e^{-\sigma_{cn} t} e^{-\frac{r^2}{4D_{\Pi t}}} \quad (3.18)$$

Согласно решению для определенного фиксированного момента времени t характерна область, в которой будет заметно количество оставшегося загрязнителя, она определяется размером L_c , при котором показатель второй экспоненты порядка единицы,

т. е. при этом во всех точках пространства уменьшения концентрации загрязнителя за счет распада определяется множителем $\rho_3(\vec{r}, t)$.

Уравнение (3.18) с заданными начальными и предельными условиями позволяет прогнозировать распределение концентрации загрязнителя в пространстве и во времени практически для всех возможных ситуаций. Ряд решений уравнения для определения коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r}, t)$ с учетом некоторых упрощающих предпосылок может быть приведен для изучаемых предприятий.

Коэффициент корреляции позволяет оценить степень линейной взаимосвязи между риском возникновения критического значения коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r}, t)$ и площадью зон превышения ПДК (таблица 3.10).

Уровень коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r}, t)$ является важным инструментом для оценки влияния предприятий на окружающую среду. Он позволяет сравнивать степень загрязнения различных предприятий и определять те, которые оказывают наибольшее воздействие на атмосферу. Такие исследования имеют важное значение для разработки и реализации мер по снижению выбросов и улучшению экологической обстановки.

На диаграмме ниже (рисунок 3.16) представлено ранжирование предприятий в зависимости от площади зон превышения предельно допустимых концентраций пыли в окружающей среде (исследования выполнены ранее автором). Этот анализ позволяет оценить масштаб и важность проблемы выбросов пыли на предприятиях и их влияние на окружающую среду.



Рисунок 3.16 – Ранжирование предприятий по площади зон превышения ПДК, м²

Как было определено ранее, месторождение мраморизованного известняка карьера «Перевал» стоит на первом месте по значению ИЗА среди исследуемых предприятий. Это означает, что оно оказывает наибольшее воздействие на окружающую атмосферу из числа всех изученных объектов. Производственные процессы на данном месторождении связаны с интенсивным выбросом указанных загрязнителей

Графическое представление ранжирования исследуемых предприятий по коэффициенту распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r}, t)$ позволяет наглядно оценить их воздействие на окружающую среду и сравнить их по степени влияния (рисунок 3.17, таблица 3.12). Предложенный подход помогает выявить наиболее критические объекты, которые требуют особого внимания и разработки для них мер по снижению воздействия на окружающую среду.

Таблица 3.12 – 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, м²	Коэффициент корреляции
Мраморизованный 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

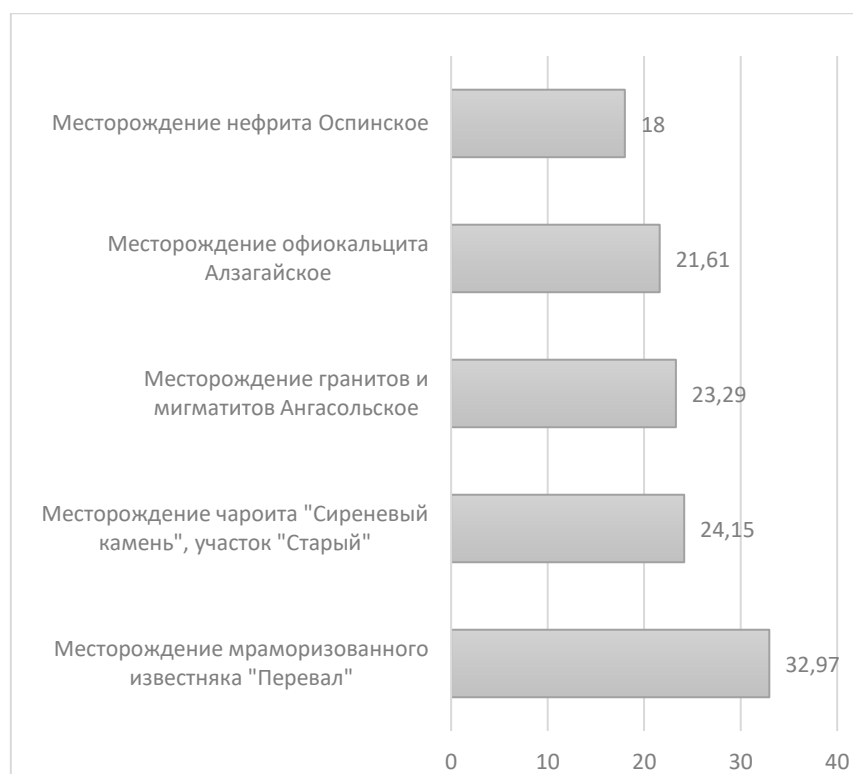


Рисунок 3.17 – Ранжирование горных предприятий по коэффициенту распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r}, t)$

Значение коэффициента корреляции показывает степень взаимосвязи между риском развития заболеваний легких (в частности, силикоза) и площадью зон превышения ПДК для каждой породы.

- Когда коэффициент корреляции близок к 1, это указывает на положительную линейную связь между риском критического значения коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r}, t)$ и площадью зон превышения ПДК. Например, для производственной пыли мраморизованного известняка коэффициент корреляции составляет 0,95, что свидетельствует о сильной положительной взаимосвязи между риском $\rho_3(\vec{r}, t)$ и площадью зон превышения ПДК.
- Когда коэффициент корреляции близок к -1 , это указывает на обратную линейную связь между риском критического значения коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов и площадью зон превышения ПДК. Например, для производственной пыли чароита на месторождении «Сиреневый камень», участок «Старый», коэффициент корреляции составляет $-0,75$, что свидетельствует об обратной зависимости между риском развития заболеваний и площадью зон превышения ПДК.

- Когда коэффициент корреляции близок к нулю, это указывает на отсутствие линейной связи между риском критического значения коэффициента распространения загрязнения атмосферы и площадью зон превышения ПДК. Например, для производственной пыли нефрита на месторождении «Оспинское» коэффициент корреляции составляет $-0,15$, что свидетельствует о слабой обратной взаимосвязи между риском критического $\rho_3(\vec{r}, t)$ и площадью зон превышения ПДК.

Таким образом, коэффициент корреляции позволяет оценить степень связи между риском критического значения коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов $\rho_3(\vec{r}, t)$ и площадью зон превышения ПДК для каждого вида производственной пыли породы.

Рассчитанные значения коэффициентов корреляции были проверены на значимость по критерию Стьюдента с 95%-ной надежностью. При выборке в 48 значений только одно значение коэффициента корреляции $-0,15$ показало отсутствие зависимости риска критического значения коэффициента распространения загрязнения атмосферы из выбросов от площади зон превышения ПДК, по всем остальным значениям связь между параметрами статистически значимая.

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. На рисунке 3.18 представлена диаграмма, на которой сравнивается степень риска возникновения критического уровня $\rho_3(\vec{r}, t)$. Для анализа выбираются различные типы пыли, которые образуются в процессе добычи и обработки минеральных материалов. Данные диаграммы позволяют сравнить различные типы пыли и определить те, которые представляют наибольший риск распространения на месторождениях. Это важно для принятия решений по внедрению мероприятий по пылеочистке и пылеподавлению, а также разработке более безопасных технологий добычи и обработки минеральных материалов. Для проведения анализа был рассчитан коэффициент корреляции между фактическим уровнем $\rho_3(\vec{r}, t)$ и площадью зон превышения ПДК для каждой из представленных пород. Коэффициент корреляции показывает степень взаимосвязи между этими двумя переменными.

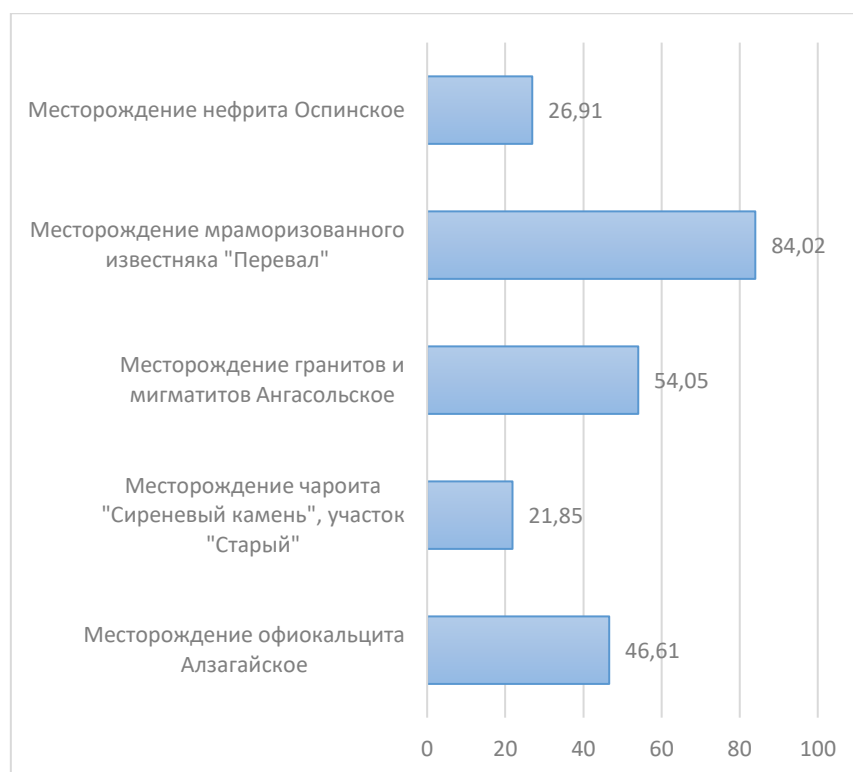


Рисунок 3.18 – Сравнительная диаграмма оценки ущерба атмосферному воздуху по уровню экологического риска

Результаты анализа показали, что риск достижения критического уровня $\rho_3(\vec{r}, t)$ и площадь зон превышения ПДК имеют различные значения для каждого типа производственной пыли породы. Наибольшее значение экологического риска (84,02) и площади зон превышения ПДК (381020) наблюдается для производственной пыли мраморизованного известняка на карьере «Перевал».

3.8. Экологический риск от ингаляционного воздействия каменной пыли

Оценка экологического риска, под которым понимается вероятность проявления неблагоприятных эффектов в состоянии здоровья человека, возникающих вследствие воздействия вредных факторов на окружающую среду, является ключевым при определении степени воздействия производственной пыли на человека. Для доказательства этого воздействия была проведена оценка экологического риска, возникающего вследствие ингаляционного воздействия каменной пыли на исследуемую в работе территорию работы карьеров.

Оценка риска, проведенная согласно методике US EPA (Агентства по охране окружающей среды, США), является стандартизированным подходом для оценки воздействия различных факторов на окружающую среду и здоровье населения. Эта

методика была рекомендована совместным постановлением Главного государственного санитарного врача РФ и Главного государственного инспектора РФ по охране природы для использования в Российской Федерации.

Процесс оценки риска включает четыре этапа, каждый из которых имеет свои особенности [88]:

1. Этап идентификации опасности: производится анализ риска на качественном уровне. Дается характеристика территории исследования, выявляются источники загрязнения окружающей среды, определяется, какие вещества и элементы будут оцениваться на предмет их воздействия на здоровье человека, идентифицируются проблемы в здоровье населения, которые могут быть связаны с данными воздействиями.
2. Этап оценки зависимости «Доза – ответ»: устанавливается связь между дозой воздействующего вещества и ответом организма живого существа на это воздействие. Понимание этой зависимости позволяет оценить, как изменение дозы влияет на биологические изменения, происходящие в организме отдельной особи и в популяции в целом.
3. Этап оценки экспозиции: определяется уровень экспозиции населения к опасным веществам. Экспозиция представляет собой количество вещества, которое попадает в организм человека в результате контакта с загрязненной окружающей средой.
4. Этап характеристики риска: проводится обобщенная оценка риска, основанная на данных предыдущих этапов. Включает количественную оценку вероятности возникновения негативных последствий для здоровья человека и окружающей среды.

В результате проведенной оценки риска можно определить уровень опасности и понять, какие факторы и в какой степени могут оказывать влияние на здоровье населения и окружающую среду. Полученные по итогам такой оценки сведения позволят разрабатывать меры по снижению риска и улучшению условий окружающей среды для общества (рисунок 3.19).

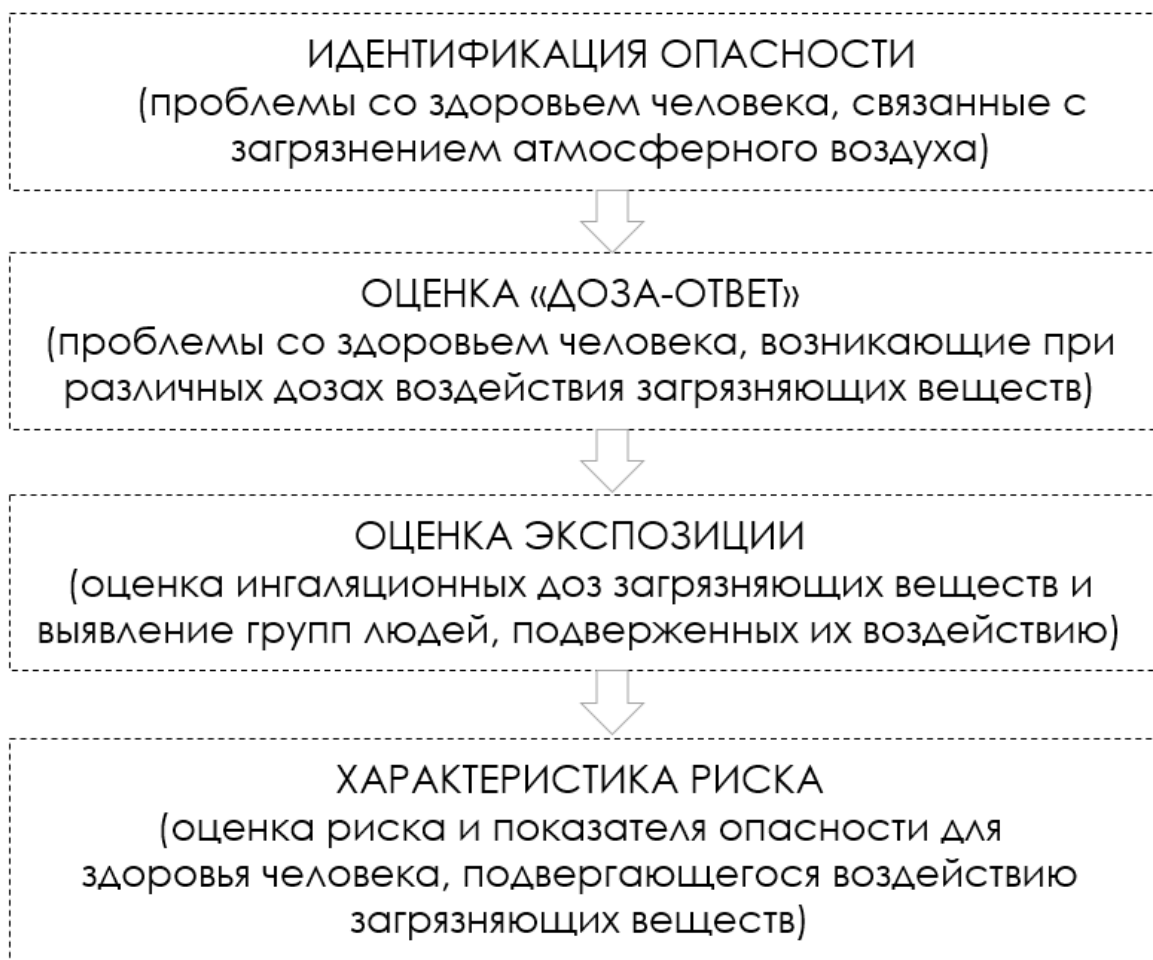


Рисунок 3.19 – Этапы оценки экологического риска

Оценка проводилась на основе допустимых для персонала концентраций загрязнителей по заданному значению допустимого риска. Для расчета допустимой концентрации производственной пыли, находящейся в атмосферном воздухе территорий присутствия карьеров по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней (гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, чароита, нефрита и серпентинита) и воздействующей на персонал и население, мы воспользовались модифицированной формулой (3.19). При оценке экологического риска для здоровья человека наиболее важным является учет вредных веществ в воздухе, при этом следует иметь в виду, что величина допустимой концентрации будет усреднена по длительности. Если считать, что количество рабочих дней в году равно 250, а полное время работы в рассматриваемых условиях составляет 40 лет, то уравнение (3.19) можно записать в следующем виде:

$$C_k = \frac{R_k}{10000} \cdot F_{rk} \cdot v_k, \quad (3.19)$$

где R_k – допустимый индивидуальный риск, вызываемый k -м веществом и устанавливаемый для всего рабочего стажа в рассматриваемых условиях.

С учетом допустимого индивидуального экологического риска для человека в объеме $0,1 \text{ мкг/м}^3$ производственной пыли, образующейся в процессе добычи и переработки облицовочных и поделочных камней, определялась среднесуточная доза каменной пыли для каждой породы, поступающей в человеческий организм, согласно методике US EPA при оценке экспозиции.

Среднесуточная концентрация производственной пыли определяется как средняя величина в пределах контура деления исследуемой территории и рассчитывается по формуле

$$I = \frac{(C \cdot IR \cdot ED \cdot EF)}{BW \cdot AT \cdot 365}, \quad (3.20)$$

где C – концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м^3 ;

IR – скорость поступления в организм (объем вдыхаемого воздуха в сутки), $\text{м}^3/\text{сут}$;

ED – продолжительность воздействия, лет;

EF – частота воздействия, дней/год;

BW – вес человека, кг;

AT – период усреднения экспозиции, лет;

365 – число дней в году.

Значения постоянных параметров, необходимых для оценки экспозиции (воздействия), приведены в Specific Exposure Factors Handbook (US EPA 2000 – Справочник факторов воздействия на детей), The Guidelines for Exposure Assessment (US EPA 1992 – Рекомендации по оценке воздействия) и др.

Для перевода I из $(\text{мг/кг} \cdot \text{сут})$ в $(\text{мг/м}^3 \cdot \text{сут})$ используется плотность воздуха ($P_{\text{возд.}}$, мг/м^3).

На основании проб пыли, отобранных гравиметрическим (весовым), седиментационным, воздушным и комбинированным способами отбора проб, была рассчитана среднесуточная концентрация производственной пыли для каждой породы, которая превышала допустимый индивидуальный экологический риск для здоровья человека. Результаты представлены в таблице 3.13 и на рисунке 3.20.

Таблица 3.13 – Показатели среднесуточной концентрации производственной пыли

Производственная пыль породы	Среднесуточная концентрация производственной пыли, мкг/м ³	Допустимый индивидуальный экологический риск для здоровья человека
Мигматит	0,74	0,1 мкг/м ³
Гранит	0,78	
Мраморизованный известняк	0,36	
Офиокальцит	0,24	
Нефрит	0,21	
Серпентинит	0,28	
Чароит	0,26	

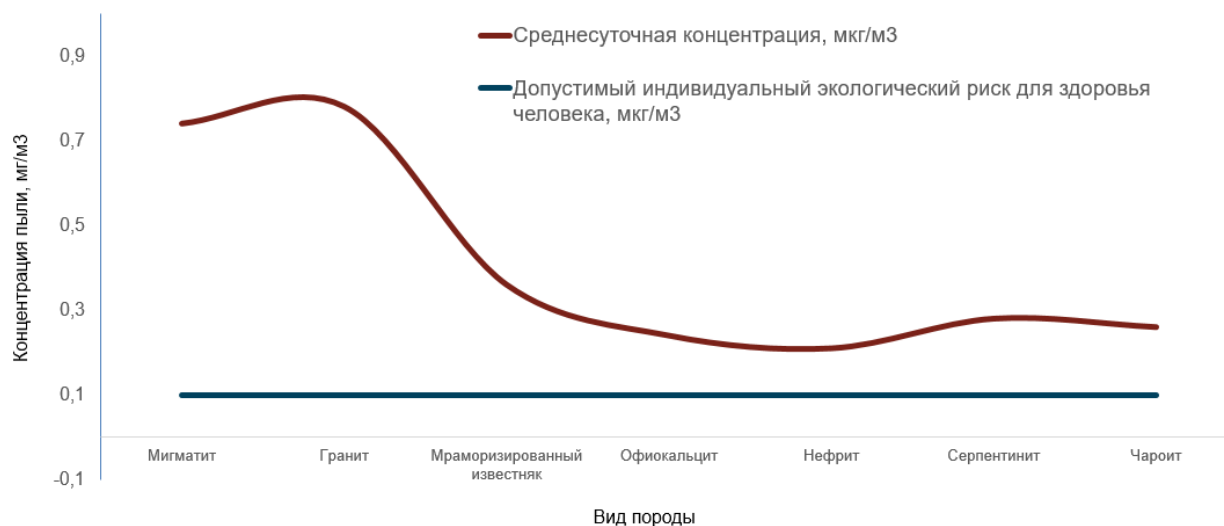


Рисунок 3.20 – Зависимость среднесуточных концентраций производственной пыли от длительности воздействия на организм человека

Данные, полученные по результатам оценки экологического риска для здоровья человека, подтверждают необходимость реализованного в настоящей работе детального исследования состава и качества производственной каменной пыли облицовочных и поделочных камней (гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита). Нашедшая подтверждение гипотеза о существовании высокого риска, возникающего вследствие ингаляционного воздействия каменной пыли, побуждает к разработке алгоритма управления экологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней и схемы управления экологическим

риском в целях сохранения здоровья человека, занятого на горнодобывающем производстве.

Выводы по главе

Установлено наличие частиц наноразмеров в пылевых фракциях горных пород гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чароита, содержание которых составляет от 1,6 до 2,1 % от общего объема пыли, образующейся на карьерах. Возможность разделения пылевидной фракции перечисленных горных пород показана с помощью метода мембранной фильтрации.

Экспериментальным методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в образцах каменной производственной пыли определено содержание в разных дозах тяжелых металлов, являющихся нарушителями нормальных метаболических функций живых организмов и способных накапливаться в растениях, тканях и органах животных и человека. Образцы исследуемой каменной пыли в наибольшей степени загрязнены никелем (содержание – 1581 ppm (г/т)), кобальтом (до 75 ppm (г/т)), медью (до 121 ppm (г/т)) и цинком (до 319 ppm (г/т)). В умеренной степени присутствует загрязнение оловом (до 6,6 ppm (г/т)), в исключительных случаях наблюдается загрязнение исследуемых образцов отдельными тяжелыми металлами. Так, чароитовая пыль загрязнена свинцом (до 6,6 ppm (г/т)), гранитная и мигматитная пыль загрязнена кобальтом (до 59 ppm (г/т)). Наименее загрязненной пылью являются мраморная и офиокальцитовая пыль (до 10,2 ppm (г/т)).

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: $Ni > Co > Zn > Cu > Cr > Pb > Sn > Tl$.

На основе фазового (рентгеноструктурного) анализа построены дифрактограммы исследуемых образцов, которые показывают зависимость интенсивности дифракционной картины от угла отражения 2θ . Это серия пиков, соответствующая определенным углам отражения, соответственно – расстояниям между атомными плоскостями. Для пыли чароита, который относится к группе силикатных пород – пироксенов, размеры пиков распределены равномерно, имеет разную интенсивность и высокую упорядоченность её кристаллической структуры, которая сохраняется в измельченном состоянии (состоянии пыли). Для пыли нефрита распределение пиков с частыми скачками по интенсивности характеризуют структуру как волокнисто-кристаллическую и подтверждают наличие в

данной пыли не только чистого нефрита, но и других минеральных и антропогенных примесей.

Для гранитно-мигматитовой пыли характерна низкая интенсивность пиков, что также указывает на наличие у гранитно-мигматитовой пыли различных кристаллических структур других минералов (амфиболы, роговая обманка, полевые шпаты, анортит, слюда, кварц). Дифрактограмма офиокальцитовой пыли указывает на равномерное распределение кристаллических структур лизардита и кальцита за счет чередования пиков различной интенсивности. Для пыли мраморизованного известняка характерна однородная структура минерала в сравнении с другими исследуемыми образцами, состоящая в основном из кальцита. Пики с малой интенсивностью при единичных примесях не учитываются при среднем значении интенсивности. Дифрактограмма пылевого образца серпентинита указывает на наличие более аморфной, подвижной кристаллической структуры, которая возникает при замещении одних структур другими, высокие пики единичны, в целом находятся на уровне трехсот пиков при изменении угла отражения.

На основе исследования каменной пыли методом электронной микроскопии определено, что частицы пыли гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита по форме представляют собой прямоугольно-ориентированные тонкие пластинки; игольчатые тонкие вытянутые по структуре пластинки с острыми краями – форма частиц пыли чаройта.

Проведена оценка экологического риска влияния производственной каменной пыли на компоненты окружающей среды, которая подтвердила обоснованность детального исследования производственной каменной пыли облицовочных и поделочных камней (гранита, мигматита, мраморизованного известняка, офиокальцита, нефрита, серпентинита, чаройта).

Глава 4. СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ КАМЕННОЙ ПЫЛИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

4.1. Алгоритм управления геоэкологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней

Для снижения геоэкологического риска для окружающей среды, усовершенствования процессов регулирования выбросов каменной пыли предлагается следующий алгоритм управления геоэкологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней (рисунок 4.1).

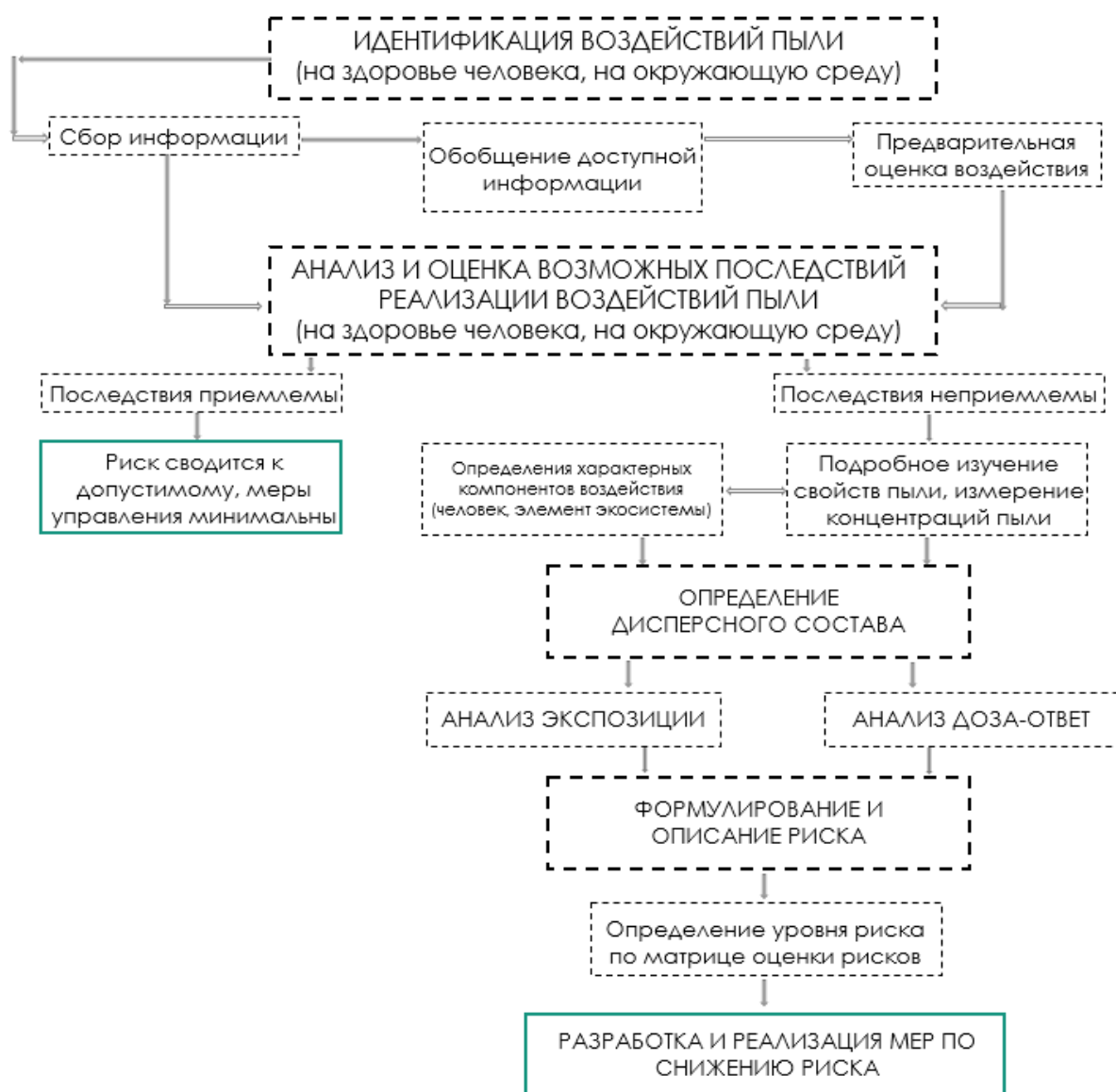


Рисунок 4.1 – Алгоритм управления геоэкологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней

В силу факта выявления в пыли пород облицовочных и поделочных камней частиц размерами 50 нм и менее, которые обладают высокой адсорбционной способностью с возможностью поглощения вредных примесей, возникает необходимость регулирования концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе с учетом их размеров. Исходя из этого, целесообразным является решение задач экологической безопасности с целью предотвращения отдаленных и предупреждения немедленных последствий. На основе алгоритма управления геоэкологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней была разработана схема управления геоэкологическим риском, связанным с распространением выбросов производственной каменной пыли на предприятиях по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней (рисунок 4.2).

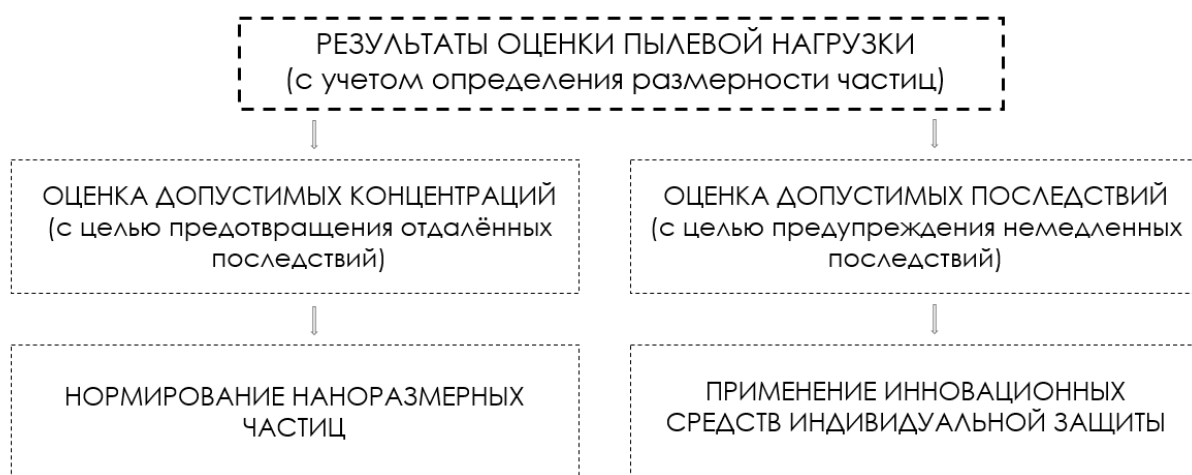


Рисунок 4.2 – Схема управления геоэкологическим риском, связанным с распространением выбросов каменной производственной пыли на предприятиях по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней

Предложенная схема в рамках проведенного исследования учитывает нормативы качества атмосферного воздуха для преобладающих загрязняющих веществ, в частности каменной пыли и ее дисперсного состава, а также частиц пыли, размеры фракций которых менее 2,5 мкм. При этом нормативы для каменной пыли учитывают не только воздействие на здоровье человека, но и экологические эффекты, т. е. есть включают в себя оценку влияния на различные экосистемы, которое состоит в воздействии на растительность, урожайность, животных, водные экосистемы и т. д. Это связано с тем, что экосистемы могут испытывать неблагоприятное влияние содержащихся в атмосферном воздухе загрязняющих веществ при меньшей их концентрации, в отличие от организма человека.

То есть нормативы учитывают первичное влияние на здоровье человека и вторичное влияние на экосистемы окружающей среды.

На основе гигиенических требований ГН 2.1.6.3492-17, действующих на протяжении последних 15 лет, и СанПиН 1.2.3685-21, вступивших в действие в 2021 г., предлагается уточнить систему мониторинга качества атмосферного воздуха по содержанию в нем частиц каменной пыли. Важность учета частиц пыли будет состоять в контроле параметров её размерности менее 2,5 мкм. Предлагается нормирование предельно допустимых концентраций каменной пыли по типу неорганической пыли и взвешенных частиц PM_{50NM} , PM_{10NM} (таблица 4.1).

Таблица 4.1. – Рекомендуемые предельно допустимые концентрации (ПДК) в атмосферном воздухе для каменной пыли (в том числе для взвешенных частиц)

Наименование вещества	Предельно допустимые концентрации, мг/м ³ (ПДК _{мр} / ПДК _{сс})		Лимитирующий показатель вредности		Класс опасности	
	СанПиН 1.2.3685-21	Предлагаемые	СанПиН 1.2.3685-21	Предлагаемые	СанПиН 1.2.3685-21	Предлагаемые
Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния, в %: более 70	0,15 / 0,05	не более 0,10 / 0,01	Резорб- тивный	Резорб- тивный	3	3
Взвешенные частицы PM_{10}	0,3 / 0,06	0,2 / 0,03	Резорб- тивный	Резорб- тивный	–	2
Взвешенные частицы $PM_{2,5}$	0,16 / 0,035	0,1 / 0,023	Резорб- тивный	Резорб- тивный	–	2
Взвешенные частицы PM_{50NM}	–	0,0035 / 0,0005	–	Резорб- тивный	–	2
Взвешенные частицы PM_{10NM}	–	0,0015 / 0,0001	–	Резорб- тивный	–	2

Предельно допустимые концентрации по неорганической пыли и взвешенным частицам $PM_{10мкм}$ – $PM_{10нм}$ предлагается снизить до уровней, предписанных международной системой стандартов на основании Директивы Европейской комиссии 2008/50/ЕС и Программы ExternE Clean Air For Europe.

Таким образом, установление целевых показателей качества атмосферного воздуха в рамках нормирования содержания каменной пыли предприятиями, занимающимися добычей облицовочных и поделочных камней, имеет основополагающей целью предотвращение или сокращение негативного воздействия загрязняющих веществ на

окружающую среду. Этот подход основан на общих методах и критериях, соответствующих не только стандартам качества Российской Федерации, но и мировым стандартам. Одним из основных преимуществ такого нормирования будет получение достоверной информации о качестве атмосферного воздуха, что позволит более эффективно контролировать его состав и поддерживать его на высоком уровне. Также население будет обеспечено доступом к информации о состоянии атмосферы, что способствует принятию информированных решений.

Особое внимание следует обратить на необходимость разработки экономических стимулов для рационального природопользования и применения мер по пылеподавлению. Это позволит стимулировать предприятия применять более эффективные и экологически безопасные методы добычи и обработки камней, что в свою очередь приведет к снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Предлагаемая система контроля выбросов взвешенных частиц и каменной пыли основана на фундаментальной концептуальной позиции, которая признает важность осуществления предварительных и надежных оценок реальной ситуации и определения приоритетов для принятия мер, направленных на максимальное снижение негативного воздействия. Такой подход позволяет систематически выявлять и анализировать распределение экологического риска и риска для здоровья человека, определять группы населения, которые подвергаются риску, и степень этого риска.

При таком контроле, если остаточный риск, т. е., риск, который остается после принятия всех возможных мер для снижения выбросов, превышает приемлемый уровень, предприятия обязаны в течение 1–5 лет разработать и внедрить улучшенные методы и технологии с целью дальнейшего снижения риска. Подразумевается, что предприятия не должны ограничиваться формированием отчетов о показателях предельно допустимых выбросов, которые могут оставаться неизменными десятилетиями, вместо этого им придается четкий стимул для непрерывного совершенствования своих технологий и методов с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

Данный подход предусматривает гибкий и адаптивный механизм регулирования, который стимулирует предприятия принимать ответственность за свой экологический след и внедрять инновационные технологии для достижения оптимальных результатов. Кроме того, такая система регулирования способствует повышению общественного доверия к деятельности предприятий, улучшению экологической обстановки и созданию благоприятных условий для устойчивого развития как на региональном, так и на глобальном уровне.

Таким образом, нормирование предельно допустимых концентраций в атмосферном воздухе в соответствии с предложенными в таблице 4.1 показателями становится необходимым элементом системы регулирования выбросов взвешенных частиц и каменной пыли. Однако для эффективного применения таких жестких критериев нормирования необходимо использовать методологию оценки риска, позволяющую более точно определить уровень риска и его соотношение с уровнем концентраций загрязняющих веществ в атмосфере.

С помощью предложенной методологии оценки риска будет возможно установить, насколько безопасным будет считаться уровень концентраций загрязняющих веществ для здоровья населения и рабочего персонала предприятия, а также степень негативного воздействия на окружающую среду и выработать меры, необходимые к реализации для снижения остаточного риска. Это даст возможность оценить эффективность новых методов регулирования выбросов и сравнить их с уже действующими. Кроме того, указанный подход способствует развитию экологической ответственности и осознанности бизнеса в частности и общества в целом, он открывает возможности для модернизации производства и повышения его геоэкологической безопасности и позволяет создать новую автоматизированную систему контроля пылевых выбросов горнодобывающих предприятий.

4.2. Техническая система автоматизации управления экологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней

Техническая система автоматизации управления экологическими рисками в области добычи облицовочных и поделочных камней представляет собой совокупность инструментов и методов, разработанных для эффективного контроля и управления возникающими угрозами окружающей среде на горнодобывающих предприятиях. В условиях стремительного развития горнодобывающего производства в регионах Российской Федерации обеспечение стратегического развития и сбалансированного учета интересов различных сторон становится особенно актуальным.

Одной из ключевых задач управления экологическими рисками в сфере добычи облицовочных и поделочных камней является предупреждение негативных последствий для окружающей среды и здоровья человека. При этом необходимо учитывать интересы населения, соответствующих государственных и региональных органов власти, а также общественных институций. Для эффективного функционирования технической системы автоматизации управления геоэкологическими рисками применяются современные инструменты управленческой деятельности. К таким инструментам можно отнести

различные аналитические и математические методы, системы мониторинга и диагностики, а также автоматизированные системы управления и контроля.

С помощью аналитических методов и системы мониторинга производится непрерывный контроль за состоянием окружающей среды на предприятии, что позволяет оперативно выявлять возможные риски и принимать меры по их предотвращению или снижению.

Математические модели и алгоритмы используются для прогнозирования возможных последствий различных действий и сценариев, что дает возможность принимать обоснованные управленческие решения и оптимизировать производственные процессы с учетом геоэкологической безопасности.

Автоматизированные системы управления и контроля обеспечивают более эффективное и своевременное реагирование на изменения в окружающей среде, оперативное применение необходимых мер для предотвращения возникновения геоэкологических рисков и минимизации их воздействия.

Таким образом, техническая система автоматизации управления геоэкологическими рисками при добыче и обработке облицовочных и поделочных камней является важным инструментом обеспечения устойчивого и безопасного развития горнодобывающих предприятий, а также сбалансированного учета интересов всех вовлеченных сторон. Она позволяет предупреждать и минимизировать негативные воздействия на окружающую среду и способствует сохранению природных ресурсов и здоровья людей.

Для планирования мер предупреждения и управления имеющимися геоэкологическими рисками в сфере добычи и обработки облицовочных и поделочных камней рекомендуется использовать модели прогнозирования, которые основываются на анализе статистических данных и данных наблюдений. Это позволяет более точно оценивать вероятность возникновения рисков и разрабатывать эффективные меры и программы предупреждения.

В настоящее время становится явной необходимостью внесения предложений по совершенствованию программ мониторинга и проведения глубоких исследований, а также внедрения предупредительных программ, направленных на противостояние возникновению и развитию наиболее опасных и неблагоприятных заболеваний.

Одной из стратегически важных задач регулирования экологических рисков в сфере добычи и обработки облицовочных и поделочных камней является исследование, обоснование, создание и внедрение новаторских методов институционального развития. В решение этой задачи включается также комплексное стратегическое планирование и

прогнозирование динамики геоэкологических рисков. Однако, несмотря на имеющуюся научную базу экологических показателей промышленных предприятий и форсайт-технологии развития экологического управления, предложений по использованию технологии форсайт на горнодобывающих предприятиях до сих пор озвучено не было.

Тем временем форсайт-технология может стать ценным инструментом, способствующим повышению достоверности прогнозирования и планированию мер по управлению геоэкологическими рисками. Она позволит более точно определять возможные сценарии развития рисков и принимать адекватные меры заблаговременно. Применение форсайт-технологии способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду и поддерживает устойчивое развитие горнодобывающих предприятий с учетом экологических интересов общества.

Форсайт-технологии, являясь наиболее эффективным методом определения стратегии развития и выделения инновационно-технологических приоритетов, активно применяются в разных сферах экономики зарубежных стран.

Форсайт (от англ. foresight – взгляд на будущее, предсказание) – это современная концептуально-методологическая поддержка процесса прогнозирования, позволяющая учитывать долгосрочные культурные, политические, экономические и социальные последствия внедрения технологий в соответствующей сфере.

Форсайт – это сценарное прогнозирование социально-экономического развития или возможные варианты развития национальной экономики, отраслей, общества в десяти-, двадцатилетней перспективе (UNIDO – United Nations Industrial Development Organization – Организация Объединенных Наций по промышленному развитию).

Планирование и прогнозирование долгосрочного стратегического развития национальной отрасли является важной задачей, которая требует продуманного и обоснованного решения. Прогнозы, сформулированные в процессе разработки проектов стратегического развития, предусматривают значительный временной интервал между принятием управленческих решений и достижением планируемых изменений, обусловленный сложностью реализации стратегических проектов и процессов, а также влиянием множества факторов на результаты развития отрасли.

Программой развития промышленной инфраструктуры на определенной территории должны быть предусмотрены долгосрочные расчеты потребления медицинских услуг, при планировании строительства заводов, предприятий и производств должны быть учтены возможные потребности жителей близлежащих к производству населенных пунктов и сотрудников предприятий в медицинских услугах.

Геоэкологические риски, связанные с добычей и обработкой облицовочных и поделочных камней, для окружающей среды должны быть предусмотрены программами планирования и внедрения соответствующих мероприятий и программами предупреждения рисков, разработанными на основе долгосрочных прогнозов и анализа данных.

Таким образом, осознание долгосрочных перспектив и прогнозов становится важным аспектом принятия управленческих решений, направленных на обеспечение устойчивого развития национальной отрасли и минимизации негативных воздействий на здоровье населения и состояние окружающей среды. Внедрение современных инструментов управления геоэкологическими рисками, а также применение аналитических методов прогнозирования помогают выстраивать эффективные стратегии развития и достижения долгосрочных целей отрасли.

Инструментальное обеспечение методологии форсайт в рассматриваемой области представлено в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Инструментальное обеспечение методологии форсайт в сфере анализа экологических рисков

Квалификационные признаки	Компонент
Системное обеспечение методологии форсайт	<ul style="list-style-type: none"> - цели - принципы -задачи - функции
Многопараметрические инструменты методологии форсайт	<ul style="list-style-type: none"> - параметры - критерии - ограничения - индикаторы
Инструменты методического направления методологии форсайт	<ul style="list-style-type: none"> - экспертные панели - сканирование - метод слабых сигналов - оценка часовых рядов - экстраполяция тренда - исследование перекрестного взаимодействия - мониторинг
Программно-целевые инструменты методологии	<ul style="list-style-type: none"> - мультикритериальная оценка - мультивариативное позиционирование

Квалификационные признаки	Компонент
форсайт	<ul style="list-style-type: none"> - прогнозирование - моделирование

Методология форсайт использует системный подход к изучению будущего, основанный на комплексном анализе данных и трендов, что помогает предсказывать возможные сценарии развития и риски.

Методология форсайт позволяет исследовать различные варианты развития с учетом разнообразных факторов, таких как технологические инновации, изменения в экономической ситуации, социокультурные тренды, экологические риски и другие влияющие факторы. Это дает возможность предвидеть потенциальные вызовы и перспективы для отрасли, а также выстраивать стратегии для адаптации к изменяющимся условиям.

Проведение форсайт-анализа применительно к отрасли добычи и обработки облицовочных и поделочных камней может помочь выявить потенциальные проблемы и геоэкологические риски, а также предложить меры по их предотвращению или снижению. Например, при разработке новых месторождений или внедрении новых технологий применение форсайт-методологии позволит оценить возможные геоэкологические последствия и определить необходимые меры для минимизации отрицательных воздействий на окружающую среду.

Форсайт-технологии также способствуют выявлению новых возможностей и инновационных идей, которые могут способствовать развитию отрасли и укреплению ее конкурентоспособности. Предвидение технологических тенденций и потребительских предпочтений поможет предприятиям добычи облицовочных и поделочных камней адаптироваться к меняющимся требованиям рынка и быть на шаг впереди конкурентов.

Таким образом, методология форсайт играет ключевую роль в стратегическом развитии отрасли добычи и обработки облицовочных и поделочных камней, обеспечивая информированные решения, устойчивость и инновационное развитие. Ее применение позволяет предсказывать будущие тенденции и риски, что способствует успешному развитию и преодолению вызовов, стоящих перед отраслью.

Для разработки моделей прогноза геоэкологических рисков на исследуемых предприятиях: месторождение офиокальцита Алзагайское; месторождение чароита «Сиреневый камень», участок «Старый»; месторождение гранитов и мигматитов Ангасольское; месторождение мраморизованного известняка «Перевал» и месторождение

нефрита Оспинское были проведены предварительные расчеты и отобраны наиболее информативные показатели, характеризующие состояние окружающей среды.

Для прогноза рисков на год, используя метод нечеткой логики, был применен нечеткий логический вывод на основе нечеткой базы данных Такаги – Сугено. Этот метод позволяет учитывать неопределенность и нечеткость данных, что важно при анализе геоэкологических рисков, когда информация может быть неполной или неточной. Для каждого месторождения были определены ключевые показатели, такие как выбросы различных загрязняющих веществ, площадь зон превышения предельно допустимых концентраций, интенсивность добычи и другие факторы, которые могут оказывать воздействие на окружающую среду. Для построения моделей прогноза были использованы исходные данные и данные статистических наблюдений, которые были обработаны с помощью математических методов нечеткой логики. Нечеткие правила и параметры моделей были определены на основе экспертных оценок и анализа исторических данных.

После построения моделей прогноза были проведены соответствующие вычисления и анализ результатов. Модели позволяют оценить вероятность возникновения различных экологических рисков на предприятиях в течение года, а также определить факторы, которые оказывают наибольшее влияние на уровень риска. Эти прогнозы могут быть использованы предприятиями для разработки и реализации мероприятий по снижению рисков и защите окружающей среды. Таким образом, применение методов нечеткой логики и построение моделей прогноза являются важными инструментами для управления экологическими рисками и обеспечения устойчивого развития отрасли добычи и обработки облицовочных и поделочных камней.

На рисунке 4.3 приведена схема процесса предварительного анализа данных и выбора информативных показателей для разработки модели фортсайта. Были проанализированы лабораторные и полученные инструментально показатели, которые определены в данном исследовании.

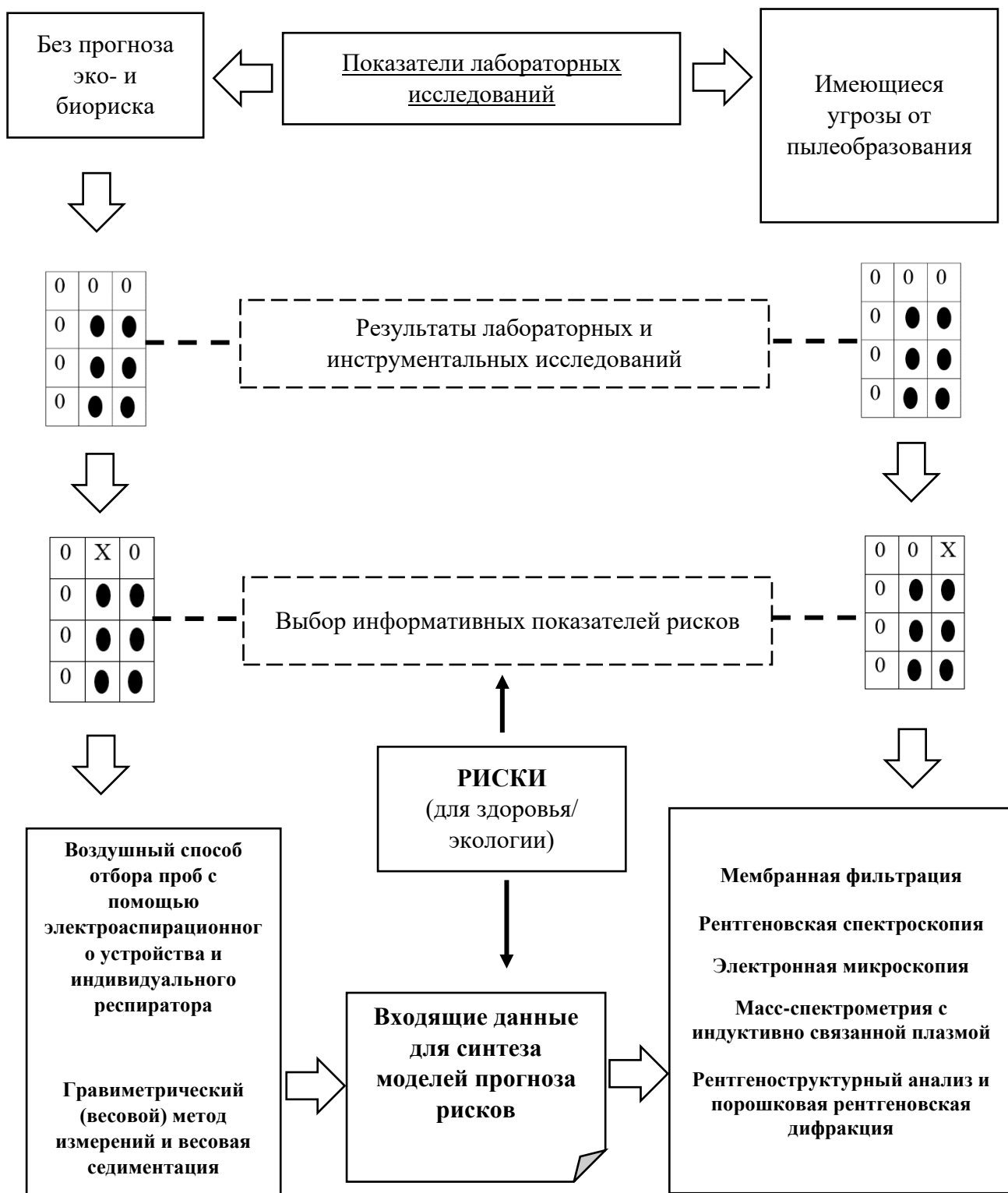


Рисунок 4.3 – Схема процесса предварительной обработки данных для синтеза моделей форсайт

Важно отметить, что входными данными для модели форсайт по расчету влияния размера наночастиц пыли по объектам (месторождениям) будут являться четыре группы переменных (как показано на рисунке 4.3):

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.

Результаты лабораторных и инструментальных исследований и список информативных показателей рисков образуют перекрестные матрицы, как показано на рисунке 4.3. Обобщенная схема процесса синтеза моделей прогноза рисков приведена на рисунке 4.4. Отобранные информативные показатели создают матрицу обучающих данных размерностью $(n + 1) \times m$, где n – количество колонок показателей, а m – количество строк наборов данных, описывающих состояние экологических рисков.

В последнем столбце (Y) размещены реальные сроки наступления рисков, где 0 – угроза жизни, а 1 – угроза экосистеме. Таким образом, в матрице обучающих данных компактно соединены наборы входных обучающих и эталонных данных.

С помощью субтрактивной кластеризации входной набор данных делится на отдельные кластеры, каждому из которых ставится в соответствие одно нечеткое правило, а соответствующие функции принадлежности аппроксимируются функциями Гаусса с координатами максимумов в центрах этих кластеров. Линейные функции вывода синтезируются с использованием входных обучающих и эталонных данных. Набор нечетких правил, параметров функций принадлежности формируют формализованную нечеткую модель прогноза сроков наступления рисков.

Рисунок 4.4 описывает процесс синтеза моделей прогноза рисков на основе результатов лабораторных и инструментальных исследований. Перекрестные матрицы и информативные показатели рисков: результаты лабораторных и инструментальных исследований, включая данные о размерах наночастиц пыли и других параметрах,

формируют перекрестные матрицы. Эти матрицы отражают взаимосвязи между различными показателями рисков.

1. Матрица обучающих данных: выделенные информативные показатели рисков создают матрицу обучающих данных. Эта матрица используется для обучения модели прогноза рисков.
2. Синтез моделей прогноза рисков: с использованием субтрактивной кластеризации входной набор данных делится на отдельные кластеры, каждому из которых ставится в соответствие нечеткое правило. Эти правила и функции принадлежности аппроксимируются функциями Гаусса. Линейные функции вывода затем синтезируются с использованием входных обучающих и эталонных данных.
3. Циклическая настройка нечеткой модели: процессы «А» и «Б» описывают циклическую настройку нечеткой модели. Процедура «А» отвечает за изменение параметров функций принадлежности и вывода для минимизации погрешности прогноза. Процедура «Б» изменяет параметры алгоритма кластеризации, что в свою очередь минимизирует количество нечетких правил.
4. Отладка и использование модели: синтезированная нечеткая модель загружается в машину нечеткого логического вывода и тестируется на входных обучающих данных. Результаты сравниваются с исходными эталонными данными для расчета погрешности прогноза. Модель подвергается циклической настройке до достижения оптимальных значений.

Таким образом, описанный процесс синтеза моделей прогноза рисков использует данные из лабораторных исследований, формирует матрицу обучающих данных и синтезирует нечеткую модель для прогноза рисков, включая влияние размера наночастиц пыли.

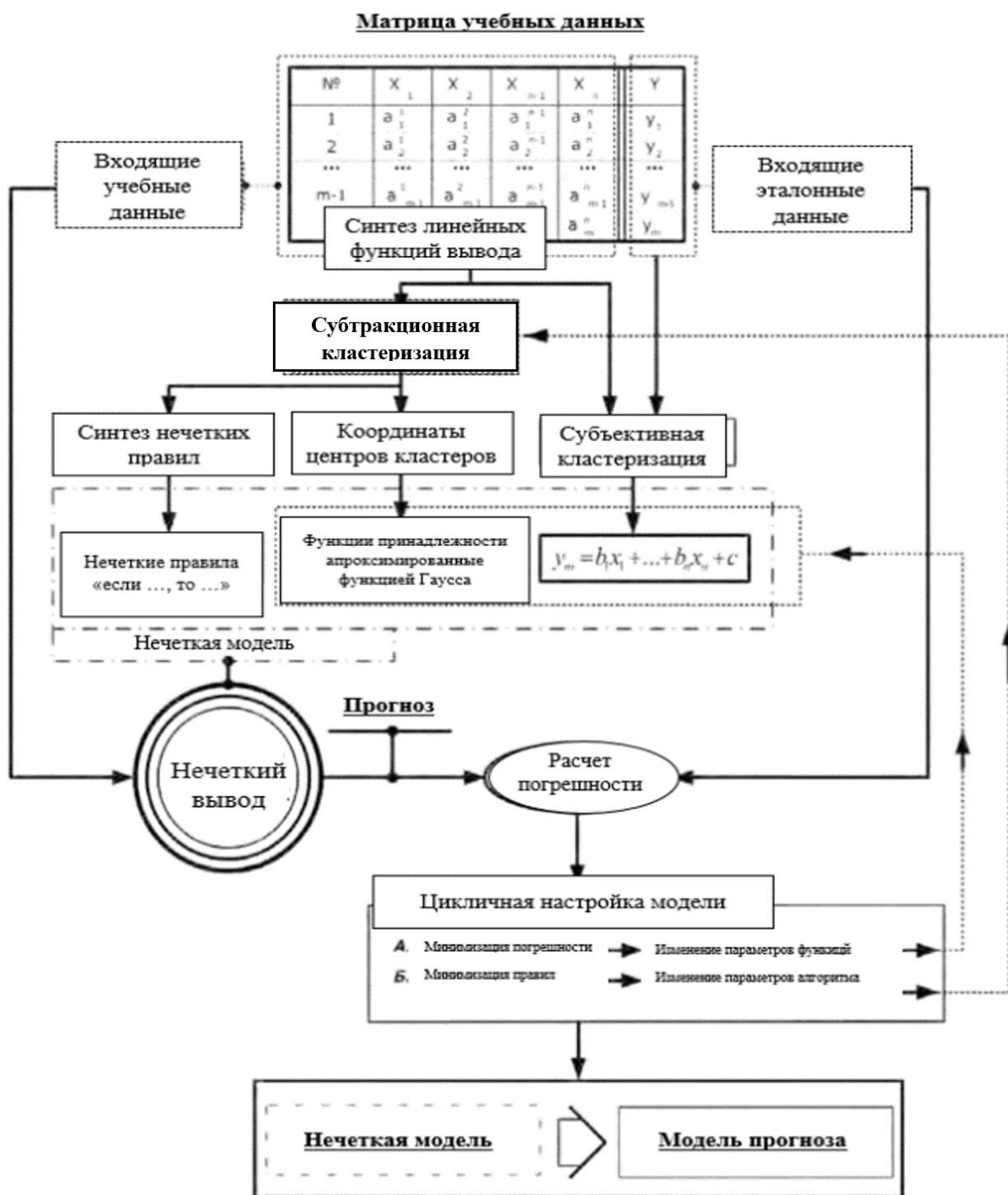


Рисунок 4.4 – Обобщенная схема процесса синтеза прогнозных моделей с использованием нечеткой логики

Сформулируем математические формулы для каждого из пяти этапов:

1. Перекрестные матрицы и информативные показатели рисков.
 - Пусть R – матрица результатов лабораторных и инструментальных исследований, где r_{ij} представляет собой значение параметра j на объекте i .
 - Матрицы взаимосвязей между показателями рисков будут представлены как S_k , где S_k – матрица взаимосвязей для k -го параметра риска.

- Итак, матрица общих взаимосвязей может быть выражена как сумма всех матриц: $C_{\text{общ}} = \sum_k C_k$.
2. Матрица обучающих данных.
 - Обозначим I как список выбранных информативных показателей рисков, где i – индекс показателя.
 - Матрица обучающих данных X будет содержать данные только для выбранных информативных показателей: $X_{ij} = r_{ij}$, если i входит в I , иначе $X_{ij} = 0$.
 3. Синтез моделей прогноза рисков.
 - Пусть Y – выходные данные прогноза рисков.
 - Результат субтрактивной кластеризации можно представить как функцию $F_{\text{кластеризации}}(X)$, где F возвращает кластеры.
 - Функции принадлежности $F_{\text{принадлежности}}$ аппроксимируются функциями Гаусса.
 - Линейные функции вывода синтезируются с использованием входных обучающих и эталонных данных: $Y = F_{\text{вывода}}(X)$.
 4. Циклическая настройка нечеткой модели.
 - Процедура «А»:

Argmin_{θ} Погрешность ($F_{\text{кластеризации}}(X)$, $F_{\text{принадлежности}}(\theta)$, $F_{\text{вывода}}(X)$), где θ – параметры функций принадлежности и вывода.
 - Процедура «Б»:

$B = \text{argmin}_{\alpha}$ Количество правил ($F_{\text{кластеризации}}(X)$, $F_{\text{принадлежности}}(\alpha)$, $F_{\text{вывода}}(X)$), где α – параметры алгоритма кластеризации.
 5. Отладка и использование модели.
 - Загружаем синтезированную нечеткую модель $F_{\text{отладки}}$ в машину нечеткого логического вывода.
 - Тестируем модель на входных обучающих данных: $Y_{\text{прогноз}} = F_{\text{отладки}}(X)$.
 - Сравниваем результаты прогноза с исходными эталонными данными:

Погрешность = Сравнение($Y_{\text{прогноз}}$, $Y_{\text{эталон}}$).

Производим циклическую настройку до достижения оптимальных значений.

Для отладки синтезированной модели она загружается в стандартную машину нечеткого логического вывода, далее на вход машины подаются входные обучающие данные, а на выходе машины получают прогноз. Результат прогноза сравнивают со значениями исходных эталонных данных (реальным сроком наступления риска в процентном соотношении) и рассчитывают погрешность прогнозирования.

Далее производится циклическая настройка нечеткой модели, которая состоит из двух последовательных процедур. Процедура «А»: изменение значений параметров функций принадлежности и вывода обеспечивает минимизацию значения погрешности. Процедура «Б»: путем изменения параметров алгоритма кластеризации, что в свою очередь изменяет количество кластеров и нечетких правил, обеспечивает минимизацию количества нечетких правил. Процедура «А» повторяется до тех пор, пока значение погрешности прогноза не достигнет своего минимального значения. Процедура «Б» повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное количество нечетких правил. После каждого цикла процедуры «Б» производится необходимое количество (для поиска минимального значения погрешности) процедур «А», при этом если при уменьшении количества нечетких правил погрешность прогноза увеличивается более чем на 1 %, то процедуру «Б» останавливают преждевременно. После процедуры отладки полученная нечеткая модель может быть использована в качестве прогнозной модели.

Таким образом, приведенные примеры демонстрируют возможности разработанных моделей прогноза и перспективы их программной реализации в целях контроля природоохранных мероприятий для горнодобывающей промышленности на примере добычи облицовочных и поделочных камней. Перспективой дальнейших исследований является усовершенствование разработанных моделей прогноза на основе расширения границ значений показателей.

Выводы по главе

Разработана система контроля выбросов каменной производственной пыли на предприятиях по добыче и обработке облицовочных и поделочных камней на основе создания таблицы нормирования размеров наночастиц. Для разработки автоматизированной системы контроля предлагается установить более жесткое нормирование предельно допустимых концентраций каменной пыли по типу неорганической пыли и взвешенных частиц PM_{50nm} , PM_{10nm} . На основании полученных лабораторных данных представлена модель нечеткой логики для прогнозирования экологических рисков в зависимости от лабораторных показателей измерения каменной пыли.

Разработаны алгоритм и математическая модель с применением методов нечеткой логики и форсайт для управления геоэкологическими рисками в отрасли добычи и обработки облицовочных и поделочных камней.

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 проведенных 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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров, В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий: автореф. дис. д-р техн. наук: 05.26.01 / Азаров Валерий Николаевич. - Ростов-на-Дону, 2004. – 48 с.
2. 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.
3. Алексеенко, В. А. Геохимия окружающей среды: учеб. пособие для вузов / В. А. Алексеенко, С.А. Бузмаков., М.С. Панин. - Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т., 2013.- 359 с.
4. Боголюбов, С. А. Новый Федеральный закон «Об охране окружающей среды» / С.А. Боголюбов //Экологическое право. – 2002. – №. 2. – С. 19.
5. Бузмаков, С.А. Антропогенная трансформация природной среды / С.А. Бузмаков //Географический вестник. – 2012. – №. 4 (23). – С.46-50.
6. Бурыкин, А.М. Некоторые теоретические и практические вопросы рекультивации техногенных ландшафтов / А.М. Бурыкин, А.И. Стифеев //Основные способы восстановления земель нарушенных горной промышленностью КМА: сб. науч. тр. – Белгород: БСХИ. - 1989. - С. 4-16.
7. Васильева, О.С. Пневмокониозы / О.С. Васильева //Русский медицинский журнал. – 2010. - №24. - С. 1441-1448.
8. Вернадский, В.И. Живое вещество / В.И. Вернадский. - М.: Наука, 1978. – 360 с.
9. Веттерген, В.Я. Изменение структуры гетерогенного твердого тела (гранита) под воздействием ударной волны / В.Я. Веттерген, И.П. Щербаков //Физика твердого тела. – 2016. - Т.58. - №4. - С.681-684.
10. Виноградов, Ю.И. К вопросу об образовании «отсева» при добыче гранитного щебня/ Ю.И. Виноградов, С.В. Хохлов //Взрывное дело. - 2015. - №113-70. - С. 118-125.
11. Гаспарьян, Н.А. Пылеподавление на основе использования фазовых переходов влаги при ведении открытых горных работ: дис. канд. техн. наук: 05.26.01 / Гаспарьян Никита Александрович, - Санкт-Петербург, 2008. – 185 с.
12. Гельфанд Ф.М., Журавлеф В.П., Поелуев А.П., Рыжих Л.И. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах. – М.: Недра, 1975. – С. 288.
13. Гринберг, Л.М. Морфологическая диагностика основных пневмокониозов и (конио-) силикотуберкулеза / Л.М. Гринберг, Т.И. Казак, Ю.А. Кириллов //Проблемы туберкулеза и болезней легких. - 2004. - №5. - С. 42-51.

14. Еремин, Н.И. Неметаллические полезные ископаемые / Н.И. Еремин. - М.: МГУ, 2007. - 459 с.
15. Закон Российской Федерации от 21 февраля 1992 № 2395-1 «О недрах».
16. Зеньков, И. В. Щебеночные карьеры России из космоса. Горные работы и экология нарушенных земель: монография / И.В. Зеньков, А.А. Лукьянова, Ю.А. Анищенко, Е.М. Сычева, Е.В. Логинова, В.А. Миронкин, Е.Н. Касьянова // Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – 328 с.
17. Ибраев, С.А. Системный анализ биохимических изменений при формировании пневмофиброза от воздействия угольно-породной пыли / С.А. Ибраев //Сборник трудов «Современные проблемы профессиональных заболеваний бронхолегочной системы», Караганда. - 2001. - №5. - С. 125-133.
18. Иваненко, Н.В. Экологическая токсикология / Н.В. Иваненко, С.Г. Масленникова. - Набережные Челны: Изд-во ТИЗ, 2011. - 185 с.
19. Кальсин С.Н. Отчет о результатах геологоразведочных работ на Алзагайском месторождении офиокальцита с подсчетом запасов по состоянию на 01.08.1989 г. Иркутская область, РСФСР, гос.рег.№14-87-34/2, 1989, 529 с.
20. Кобылкин А.С., Кобылкин С.С. Распределение пыли различного дисперсного состава в горных выработках / Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых 12 Международная научная школа молодых ученых и специалистов. – 2015. – С. 376–381.
21. Корнилов, А.Г. Влияние флотационных технологий на состояние земельных ресурсов / А.Г. Корнилов, Л.Л. Новых, С.Н. Колмыков, Е.В. Кичигин, М.В. Листопад, И.А. Корнилов //Недропользование – XXI век. – 2012. – № 4.
22. Кравчук, Т.Н. Прогноз загрязнения подземных вод при разработке железорудных месторождений КМА методами численного моделирования» / Т.Н. Кравчук, С.В. Сергеев //Научные ведомости, серия Естественные науки. – 2012. - №15 (134), Выпуск 20. - С.168-172.
23. Крейтер, В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Ч.1. / В.М. Крейтер. - М.: Госгеолтехиздат, 1960. - 332 с.
24. Кузовлев А.А., Романовский А.З., Карасев А.Д. и др. Отчет по оперативному изменению состояния запасов нефрита на участке Окинский-2 (жилы №№ 40, 8 Оспинского месторождения) по состоянию на 01.01.2018 г. В МО «Окинский район» Республики Бурятия, N-47-XXXVI, 2018, 667 с.
25. Кутузов, Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 2. Взрывные работы в горном деле и промышленности: Учебник для вузов / Б.Н. Кутузов. – М.: Издательство «Горная книга», 2011. – 512 с.

26. Ливеншин, И. Ю. Методы оценки качества жизни (на примере населения Хабаровского края) / И.Ю. Ливеншин, В.Г. Шведов //Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. ВП Астафьева. – 2010. – №. 2. – С.158.
27. Лопатин, К.И. Проблемы геоэкологии: монография / К.И. Лопатин, С.А. Сладкопевцев. – Москва, 2008. – 260 с.
28. Мадаева М. Технологии снижения пылевого загрязнения окружающей среды полиметаллическими рудниками Северного Кавказа. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.36 - геоэкология (технические науки). – Грозненский нефтяно-технический институт имени М.Миллионщикова. – Грозный: 2021. – 145 с.
29. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Талалай А.Г. Техногенные месторождения: особенности исследований // Известия Уральского государственного горного университета. - № 3 (55). – 2019. – С. 58-62.
30. Милишникова, В.В. Проблема индивидуальной предрасположенности к профессиональному хроническому бронхиту (обзор литературы) / В.В. Милишникова, Л.П. Кузьмина, О.В. Мельникова //Медицина труда и промышленная экология. - 2002. - №1. - с. 21-26.
31. Мочалов, В.И. Анализ существующих способов и средств пылеподавления на хвостохранилищах железорудных горно-обогатительных комбинатов / В.И. Мочалов, С.В. Мосин //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – Т.6.
32. МУ 2.1.7.730-99 Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест МУ (Методические указания) от 05.02.1999 N2.1.7.730-99 Применяется с 05.04.1999.
33. Назаренко Н. В. Закономерности пространственного распределения карьеров ОПИ в Белгородской области и их воздействие на окружающую среду / Н.В. Назаренко //Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах: материалы IV Междунар. научн. конф. – 2010. – С. 11-14.
34. Назаренко Н. В. Особенности развития экзогенных геоморфологических процессов при разработке месторождений облицовочных и поделочных камней в Белгородской области / Н.В. Назаренко, Т.Н. Фурманова //Антропогенная геоморфология: наука и практика: материалы XXXII Пленума Геоморфологической комиссии РАН (г. Белгород, 25-29 сентября 2012 г.). – М.; Белгород: ИД «Белгород». - 2012.

35. Норейко, С.Б. Пневмокониозы / С.Б. Норейко, Е.В. Синякина, И.В. Поленова // Фельдшер и акушерка. – 1990. - №1. - С. 19-23.
36. Опарина, Т. А. Интеграция концепции промышленной экологии в управление отходами горнодобывающей промышленности / Т. А. Опарина, В. Ю. Конюхов // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения) : Материалы конференции Всероссийской научно-практической конференции, Иркутск, 26 ноября 2021 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2022. – С. 239-242.
37. Охрана природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения [Электронный ресурс]: ГОСТ 17.4.3.04-85: введ.01.07.86 Режим доступа: Справочная правовая система «Гарант». Разд. «Акты органов власти». Информ. банк. «Нормативно-техническая документация» (дата обращения: 24.01.2021).
38. Парфенов В.В. Отчет о результатах предварительной разведки месторождения Сиреневый камень по состоянию на 01.01.2000 г. Иркутская область, инв.№ 475840, 764 с.
39. Певзнер, М.Е. Горная экология: учебное пособие для вузов /М.Е. Певзнер. - М.: Московского государственного горного университета, 2003. - 395 с.
40. Першин, М.Н. Обеспыливание автомобильных дорог на горных предприятиях / М.Н. Першин //Воронеж, 2010.
41. Рафиков С.Ш., Сулейманов Р.А., Валеев Т.К., Рахматуллин Н.Р., Бактыбаева З.Б., Рахматуллина Л.Р. Влияние предприятий горнорудной промышленности на состояние окружающей среды и здоровье населения (обзор литературы) // Медицина труда и экология человека. - № 3 (27). - 2021. – С. 62-75.
42. Результаты ежегодной переоценки ESG Risk Rating. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://raex-rr.com/ESG/ESG_companies/ESG_rating_companies/2022.12/.
43. СанПиН 23-03-2003. Защита от шума. – М.: Госстрой России, 2004. – 15 с.
44. Семенов, В.В. Обоснование и разработка способа пылеподавления и нейтрализации вредных газов при массовых взрывах на карьерах: диссертация кандидата технических наук: 25.00.20 / Семенов Василий Васильевич. – М., 2008.
45. Славиковская, Ю.О. Сравнительная оценка техногенного воздействия на окружающую среду открытой и подземной геотехнологий / Ю.О. Славиковская //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №. 7.
46. Смирнов, В.И. Геология полезных ископаемых. 4 изд. / В.И. Смирнов. – М.: Недра, 1982. - 669 с.
47. Старостин, В.И. Геология полезных ископаемых. Учебник для высшей школы / В.И. Старостин, П.А. Игнатов. – М.: Академический проект, 2006. - 512 с.

48. Статистический сборник Федеральной службы государственной статистики «Россия в цифрах», 2019: Крат. стат. сб./Росстат- М., Р76 2019 - 549 с.
49. Субетто А.И. Управление экологическим риском в системе качества жизни: Ч.2. // Стандарты и качество. Экономика природопользования. – М.: ВИНТИ, 1999, №2. С. 9-19.
50. Ткачева, В.Н. Дифференциальная диагностика пневмокониозов с другими диффузно-диссеминированными заболеваниями легких / В.Н. Ткачева //Лечебное дело. - 2006. - №2 - С. 8-13.
51. Ткачук, К.К. Методы снижения загрязнения воздушной среды при разрушении горных пород / К.К. Ткачук //Научно-технический семинар по безопасности на открытых горных работах, Кривой рог. - 2000. - С. 14-15.
52. Фалько В.В. Основные направления в проблеме оценки экологического риска / В.В. Фалько // Вестник Сум ДУ. – 2007. - №1. – С.100-112.
53. Федеральная целевая программа «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 годы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации.
54. Филатов, С.С. Борьба с запыленностью и загазованностью карьеров / С.С. Филатов, М.М. Конорев, К.С. Подвысоцкий //Безопасность труда в промышленности, М.: Наука. – 1984.
55. Хенли Э.Дж., Кумамото Х., Надежность технических систем и оценка риска / Пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г.С. Деминой; под ред. В.С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984 – 582 с.
56. Цгоев, Т. Ф. Применение интегрального критерия к оценке экологической опасности горного производства / Т. Ф. Цгоев, Е. А. Гридев // Национальная Ассоциация Ученых. – 2022. – № 82-2. – С. 48-52.
57. Цгоев, Т. Ф. Применение интегрального критерия к оценке экологической опасности горного производства / Т. Ф. Цгоев, Е. А. Гридев // Эколого-экономическая безопасность горнопромышленных регионов: сборник научных статей. – Екатеринбург: Институт экономики Уральского отделения РАН, 2022. – С. 198-208.
58. Шуберт Л.А. Отчет о результатах геологоразведочных работ по доразведке месторождения Перевал с целью повышения качества цементных известняков и оценке новых направлений использования их доломитизированных разностей. гос.рег.№14-73-3/1, 14-96-48/1, 2001, 254 с.
59. Шувалов, Ю.В. Система пылеподавления и биопродуктивной рекультивации техногенных массивов на территории карьеров / Ю.В. Шувалов, С.А. Ильченкова, А.П.

Бульбашев, Н.А. Гаспарьян, Ю.Д. Смирнов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – №. 10.

60. Acosta, J.A. Heavy metal concentrations in particle size fractions from street dust of Murcia (Spain) as the basis for risk assessment / J.A. Acosta, Á. Faz, K. Kalbitz, B. Jansen, S. Martínez-Martínez // *Journal of Environmental Monitoring*. – 2011. – vol.13. – №.11. – pp.3087-3096.

61. Adachi, K. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust / K. Adachi, Y. Tainosho // *Environment international*. – 2004. –vol. 30. – №. 8. – pp. 1009-1017.

62. Agarwal, B.K. X-Ray Spectroscopy. Second ed. Schawlow A.L. et al. Berlin, Fermany: Springer Heidelberg, 1991. - 421 p.

63. Agarwal, N. Effect of Stone Dust On Some Geotechnical properties Of Soil / N. Agarwal // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. – 2015. - vol.12. - №1. - pp. 61-64.

64. Ahmad I., Khan M. I., Patil G. Nanotoxicity of Occupational Dust Generated in Granite Stone Saw Mill / I. Ahmad, M. I. Khan, G. Patil // *2011 International Conference on nanoscience, technology and societal implications – IEEE. Bhubaneswar*. – 2011. - vol.8. - pp. 1-6.

65. Aigbkhaode, A. Q. Knowledge and Practice of Occupational Safety among Quarry workers in a rural community in Edo State / A. Q. Aigbkhaode, E. C. Isah, A. R. Isara // *Journal of community medicine and primary health care*. – 2011. – vol. 23. – №. 1-2. – pp. 16-24.

66. Aleksandrova, A. Y. Features of overall and occupational morbidity rates among mine workers of marble and granite quarries of the Irkutsk Region / A. Y. Aleksandrova., S. S. Timofeeva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing. - 2020. –vol. 962. – №. 4. – pp. 042093.

67. Aleksandrova, A.Y. Specificity of the charoite dust influence on human respiratory tracks / A.Y. Aleksandrova. S.S. Timofeeva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing. - 2020. – vol.421. – №.6. – pp. 062011.

68. Auffan, M. Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective / M. Auffan, J. Rose, J.Y. Bottero, G. V. Lowry, J.P. Jolivet, M.R. Wiesner // *Nature nanotechnology*. - 2009. - vol.4. - №10. - pp.634-641.

69. Beauchemin, D. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Handbook / D. Beauchemin // *New-York: CRC Press LLC, 2005*. - 498 p.

70. Becklake, M.R. Fiber burden and asbestos-related lung disease: determinants of dose–response relationships / M.R. Becklake., B. W. Case // *American journal of respiratory and critical care medicine*. – 1994. – vol. 150. – №. 6. – pp. 1488-1492.

71. Begin R, Samet JM, Shaikh RA. Asbestos. In: Harber P, Schenker MB, Balmes JR, eds. Occupational and Environmental Respiratory Disease. St Louis, MO: Mosby. - 2011. - pp. 293-329.
72. Benhaddya, M.L. Human health risks associated with metals from urban soil and road dust in an oilfield area of Southeastern Algeria / M.L. Benhaddya, A. Boukhelkhal, Y. Halis, M. Hadjel //Archives of environmental contamination and toxicology. - 2016. - vol.70. - №3. - pp.556-571.
73. Brook, R.D. Particulate matter, air pollution, and blood pressure / R.D. Brook, S. Rajagopalan //Journal of the American Society of Hypertension. - 2009. - vol.3. - №5. - pp.332-350.
74. Buzea, C. Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity / C. Buzea, I.I. Pacheco, K. Robbie //Biointerphases. - 2007. - vol.2. - №4. - pp.MR17-MR71.
75. Cullinan, P. Pneumoconiosis / P. Cullinan, P. Reid //Primary Care Respiratory Journal. – 2013. – vol. 22. – №. 2. – pp. 249-252.
76. Dalmora, A.C. Chemical characterization, nano-particle mineralogy and particle size distribution of basalt dust wastes / A.C. Dalmora, C.G. Ramos, M.L.S. Oliveira, E.C. Teixeira, R.M. Kautzmann, S.R. Taffarel, I.A.S. de Brum, L.F.O. Silva //Science of the Total Environment. - 2016. - vol.539. – pp.560-565.
77. Dodson, R.F. Asbestos fiber length as related to potential pathogenicity: a critical review / R.F. Dodson, M.A.L. Atkinson, J.L. Levin // American journal of industrial medicine. – 2003. – vol. 44. – №. 3. – pp. 291-297.
78. Domingos, R.F. Characterizing Manufactured Nanoparticles in the Environment: Multimethod Determination of Particle Sizes / R.F. Domingos, M.A. Baalousha, Y. Ju-Nam, M.M. Reid, N. Tufenkji, J.R. Lead, G.G. Leppard, K.J. Wilkinson //Environmental science & technology. - 2009. - vol.43. - №19. - pp.7277-7284.
79. Dzierzanowski, K. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species / K. Dzierzanowski, R. Popek, H. Gawrońska, A. Saebø, S.W. Gawroński //International journal of phytoremediation. - 2011. - vol.13. - №10. - pp. 1037-1046.
80. Environmental risk assessment by risk matrix method / T. Radu, L. Balint, G.G. Istrate et al. / 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017. P. 395-402.
81. Ermolin M.S., Fedotov P.S. Rev. Anal. Chem, 2016, vol. 35, no. 4. pp. 185-186.

82. Ermolin, M.S., Fedotov P.S. Separation and characterization of environmental nano- and submicron particles / M.S. Ermolin, P.S. Fedotov //Reviews in Analytical Chemistry. – 2016. –vol. 35. – №. 4. – pp.185-199.

83. Faucher, S. Characterization of polymer-coated CdSe/ZnS quantum dots and investigation of their behaviour in soil solution at relevant concentration by asymmetric flow field-flow fractionation – multi angle light scattering – inductively coupled plasma - mass spectro / S. Faucher, G. Charron, E. Lützen, P. Le Coustumer, D. Schaumlöffel, Y. Sivry, G. Lespes //Analytica chimica acta. - 2018. - vol.1028. - pp.104-112.

84. Fuzzi, S. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs / S. Fuzzi, U. Baltensperger, K. Carslaw, S. Decesari, H. Denier van der Gon, M.C. Facchini, D. Fowler, I. Koren, B. Langford, U. Lohmann, E. Nemitz, S. Pandis, I. Riipinen, Y. Rudich, M. Schaap, J.G. Slowik, D.V. Spracklen, S. Gilardoni //Atmospheric chemistry and physics. - 2015. - vol.15. - №14. - pp.8217-8299.

85. Geng, H. Investigation of aged aerosols in size-resolved Asian dust storm particles transported from Beijing, China, to Incheon, Korea, using low- Z particle EPMA / H. Geng, H. Hwang, X. Liu, S. Dong, C.U. Ro //Atmospheric chemistry and physics. - 2014. - vol.14. - №7. - pp.3307-3323.

86. Gong, H. Jr. Respiratory responses to exposures with fine particulates and nitrogen dioxide in the elderly with and without COPD / H.Jr. Gong, W.S. Linn, K.W. Clark, K.R. Anderson., M.D. Geller., C. Sioutas //Inhalation toxicology. – 2005. – vol.17(3). - pp. 123-132.

87. Goodwin, S.S. Previously undetected silicosis in New Jersey decedents / S.S. Goodwin, M. Stanbury, M. L. Wang, E. Silbergeld, J. E Parker //American journal of industrial medicine. – 2003. – vol. 44. – №. 3. – pp. 304-311.

88. Guidelines for Neurotoxicity Risk Assessment US Environmental Protection Agency 1998. 210 p.

89. Guidelines for the use of the ILO international classification of the radiographs of pneumoconioses. Revised edition 2000. Intern. Lab. Office. Geneva. 43 p.

90. Hassan Zgheib. Concept of environmental risk management in the system of sustainable environmental economics // Proceedings of BSTU. Economics and management. 2018. Is. 5. No. 2. P. 111-115.

91. Hofman, J. Influence of tree crown characteristics on the local PM 10 distribution inside an urban street canyon in Antwerp (Belgium): A model and experimental approach / J. Hofman, H. Bartholomeus, S. Janssen, K. Calders, K. Wuyts, Van S. Wittenberghe, R. Samson // Urban For. Urban Green. - 2016. - vol.20. - pp.265-276.

92. Hsiao, I.L. Quantification and visualization of cellular uptake of TiO₂ and Ag nanoparticles: comparison of different ICP-MS techniques / I.L. Hsiao, F.S. Bierkandt, P. Reichardt, A. Luch, Y.J. Huang, N. Jakubowski, J. Tentschert, A. Haase //Journal of nanobiotechnology. - 2016. - vol.14. - №1. - pp.1-13.
93. Hu, X. Bioaccessibility and health risk of arsenic, mercury and other metals in urban street dusts from a mega-city, Nanjing, China / X. Hu, Y. Zhang, J. Luo, T. Wang, H. Lian, Z. Ding //Environmental Pollution. - 2011. - vol.159. - №5. - pp.1215-1221.
94. IEC 31010:2019 «Risk management – Risk assessment techniques» («Менеджмент риска – Методы оценки риска»). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/72140.html>.
95. Imoto, Y. Influence of solid-liquid separation method parameters employed in soil leaching tests on apparent metal concentration / Y. Imoto, T. Yasutaka, M. Someya, K. Higashino //Sci. Total Environ. - 2018. - vol.624. - pp.96-105.
96. ISO 14001:2015. «Environmental management systems – Requirements with guidance for use» («Системы экологического менеджмента – Требования и руководство по применению»). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/standard/60857.html>
97. Kadar, E. Colloidal stability of nanoparticles derived from simulated cloud-processed mineral dusts / E. Kadar, A. Fisher, B. Stolpe, S. Calabrese, J. Lead, E. Valsami-Jones, Z. Shi //Science of the total environment. - 2014. - vol.466. - pp.860-870.
98. Kato, H. Accurate Size and Size-Distribution Determination of Polystyrene Latex Nanoparticles in Aqueous Medium Using Dynamic Light Scattering and Asymmetrical Flow Field Flow Fractionation with Multi-Angle Light Scattering / H. Kato, A. Nakamura, K. Takahashi, S. Kinugasa //Nanomaterials. – 2012. –vol. 2. – №.1. – pp. 15-30.
99. Kelly, F.J. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter / F.J. Kelly, J.C. Fussell //Atmospheric environment. - 2012. - vol.60. - pp.504-526.
100. Keshavarzi, B. Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran / B. Keshavarzi, Z. Tazarvi, M.A. Rajabzadeh, A. Najmeddin //Atmospheric Environment. - 2015. - vol.119. - pp.1-10.
101. Klaine, S.J. Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects / S.J. Klaine, P.J.J. Alvarez, G.E. Batley, T.F. Fernandes, R.D. Handy, D.Y. Lyon, S. Mahendra, M.J. McLaughlin., J.R. Lead //Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal. – 2008. – vol. 27. - № 9. – pp.1825-1851.

102. Kvinikadze, M. Geocological assessment of the environment: An example from the territory of Georgia / M. Kvinikadze, D. Kuparadze, T. Kerestedjian, I. Sirbiladze // *Geochem Mineral Petrol.* – 2006. – vol. 44. – pp. 131-140.
103. Laborda, F. Single particle inductively coupled plasma mass spectrometry for the analysis of inorganic engineered nanoparticles in environmental samples / F. Laborda, E. Bolea, J. Jiménez-Lamana // *Trends in Environmental Analytical Chemistry.* - 2016. - vol.9. - pp.15–23.
104. Legal and economic methods as an environmental risk management mechanism / A.V. Voronina, N.B. Osipyan, M.A. Dmitrieva et al. // *Research journal of pharmaceutical, biological and chemical sciences.* 2018. Vol. 9. No. 6. P. 1671-1677.
105. Loosli, F. Analysis of engineered nanomaterials (Ag, CeO₂ and Fe₂O₃) in spiked surface waters at environmentally relevant particle concentrations / F. Loosli, J. Wang, M. Sikder, K. Afshinnia, M. Baalousha // *Science of the Total Environment.* - 2020. - vol.715. - pp.1-11.
106. Luo, P. Visualization and characterization of engineered nanoparticles in complex environmental and food matrices using atmospheric scanning electron microscopy / P. Luo, I. Morrison, A. Dudkiewicz, K. Tiede, E. Boyes, P. O'toole, S. Park, A.B.B. Boxall // *Journal of microscopy.* - 2013. - vol.250. - №1. - pp.32-41.
107. Lu, X. Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China / X. Lu, L. Wang, K. Lei, J. Huang, Y. Zhai // *Journal of hazardous materials.* - 2009. - vol.161. - № 2–3. - pp. 1058-1062.
108. Meermann, B. ICP-MS for the analysis at the nanoscale – a tutorial review / B. Meermann, V. Nischwitz // *Journal of analytical atomic spectrometry.* - 2018. - vol.33. - №9. - pp.1432-1468.
109. Muller, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River / G. Muller // *GeoJournal.* - 1969. - vol.2. - pp.108-118.
110. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Hazard Review: Health Effects of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica. Cincinnati, OH: NIOSH, 2002.
111. National Institute for Occupational Safety and Health. The Work-related Lung Disease Surveillance Report, 2002. Cincinnati, OH: NIOSH, 2003.
112. Niyungeko, C. Effect of biogas slurry application rate on colloidal phosphorus leaching in paddy soil: A column study / C.Niyungeko, X. Liang, C. Liu, Z. Liu, M. Sheteiwy, H. Zhang, J. Zhou, G. Tian // *Geoderma.* - 2018. - vol. 325. - pp.117-124.
113. Nowack, B. Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment / B. Nowack, T.D. Bucheli // *Environmental pollution.* - 2007. - vol.150. - № 1.- pp. 5-22.

114. Ray, P.C. Toxicity and Environmental Risks of Nanomaterials: Challenges and Future Needs / P.C. Ray, H. Yu, P.P. Fu //Journal of Environmental Science and Health Part C. - 2009. - vol.27. - №1. - pp.1-35.
115. Sangsawong, S. Field-flow fractionation: An efficient approach for matrix removal of soil extract for inductively coupled plasma optical emission spectrometry / S. Sangsawong, W. Waiyawat, J. Shiowatana, A. Siripinyanond //Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc. - 2011. - vol.66. - № 6. - pp.476-482.
116. Shi, Z. Formation of Iron Nanoparticles and Increase in Iron Reactivity in Mineral Dust during Simulated Cloud Processing / Z. Shi, M.D. Krom, S. Bonneville, A.R. Baker, T.D. Jickells, L.G. Benning // Environmental science & technology. - 2009. - vol.43. - № 17. - pp.6592-6596.
117. Steenland, K. Exposure–response analysis and risk assessment for silica and silicosis mortality in a pooled analysis of six cohorts / K. Steenland, M. Attfield, P. Boffetta, H. Checkoway, N. DeKlerk, R.S. Koskela //Occupational and environmental medicine. – 2002. – vol. 59. – №. 11. – pp. 723-728.
118. Sutherland, R.A. Lead in grain size fractions of road-deposited sediment / R.A. Sutherland //Environmental pollution. - 2003. - vol.121. - №2. - pp.229-237.
119. Tepe, N. Importance of nanoparticles and colloids from volcanic ash for riverine transport of trace elements to the ocean: Evidence from glacial-fed rivers after the 2010 eruption of Eyjafjallajkull Volcano, Iceland / N. Tepe, M. Bau // Science of the total environment. – 2014. - vol.488–489. - №1. - pp.243-251.
120. Tsai, C.J. Particle Collection Efficiency of Different Impactor Designs / C.J. Tsai, T.Y Lin // Separation Science and Technology. – 2000. –vol. 35. – №. 16. – pp. 2639-2650.
121. Tsao, T. Separation and identification of soil nanoparticles by conventional and synchrotron X-ray diffraction / T. Tsao, Y. Chen, H. Sheu, Y. Tzou, Y. Chou, M. Wang //Applied clay science. - 2013. - vol.85. - pp.1-7.
122. Wagner J., Chem B. Sc., Membrane Filtration Handbook. Practical Tips and Hints / J. Wagner, B. Sc. Chem //Second Edition, Revision, 2001, vol. 2, pp 189-193.
123. Wang, Q. Analysis of heavy metals in the re-suspended road dusts from different functional areas in Xi'an, China / Q. Wang, X. Lu, H. Pan //Environmental Science and Pollution Research. - 2016. - vol.23. - №19. - pp.19838-19846.
124. Wei, X. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China / X. Wei, B. Gao, P. Wang, H. Zhou, J. Lu //Ecotoxicology and environmental safety. - 2015. - vol.112. – pp.186-192.

125. Wik, A. Occurrence and effects of tire wear particles in the environment - A critical review and an initial risk assessment / A. Wik, G. Dave //Environmental pollution. - 2009. - vol.157. - №1. - pp.1-11.
126. Wilkinson, K.J. Environmental Colloids and Particles: Behaviour, Separation and Characterisation / K.J. Wilkinson, J.R. Lead. - San Francisco: John Wiley & Sons, 2007. 470 p.
127. Wong, O. The epidemiology of silica, silicosis and lung cancer: some recent findings and future challenges / O. Wong //Ann Epidemiol. - 2002. - vol. 12. - pp. 285-287.
128. Wu, S. Identification and quantification of titanium nanoparticles in surface water: A case study in Lake Taihu, China / S. Wu, S. Zhang, Y. Gong, L. Shi, B. Zhou //Journal of hazardous materials. - 2020. - vol.382. - pp.1-11.
129. Zanobetti, A. The effect of fine and coarse particulate air pollution on mortality: A national analysis / A. Zanobetti, J. Schwartz //Environmental health perspectives. - 2009. - vol.117. - №6. - pp.898-903.
130. Zheng, L. Distribution and health risk assessment of mercury in urban street dust from coal energy dominant Huainan City, China / L. Zheng, Q. Tang, J. Fan, X. Huang, C. Jiang, H. Cheng //Environmental Science and Pollution Research. - 2015. - vol.22. - № 12. - pp.9316-9322.
131. Yang, Y. Analysis of silver and gold nanoparticles in environmental water using single particle-inductively coupled plasma-mass spectrometry / Y. Yang, C.L. Long, H.P. Li, Q. Wang, Z.G. Yang //Science of the Total Environment. - 2016. - vol.563. - pp.996-1007.
132. Yıldırım, G. Heavy metal speciation in various grain sizes of industrially contaminated street dust using multivariate statistical analysis / G. Yıldırım, Ş. Tokaloğlu //Ecotoxicology and environmental safety. - 2016. - vol.124. - pp.369-376.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Зависимость концентрации тяжелых металлов от размера частиц для хрома (Cr), кобальта (Co), никеля (Ni), меди (Cu), цинка (Zn), олова (Sn), таллия (Tl) и свинца (Pb) на примере гранита, мигматита, офиокальцита, мраморизованного известняка, нефрита, чароита и серпентинита

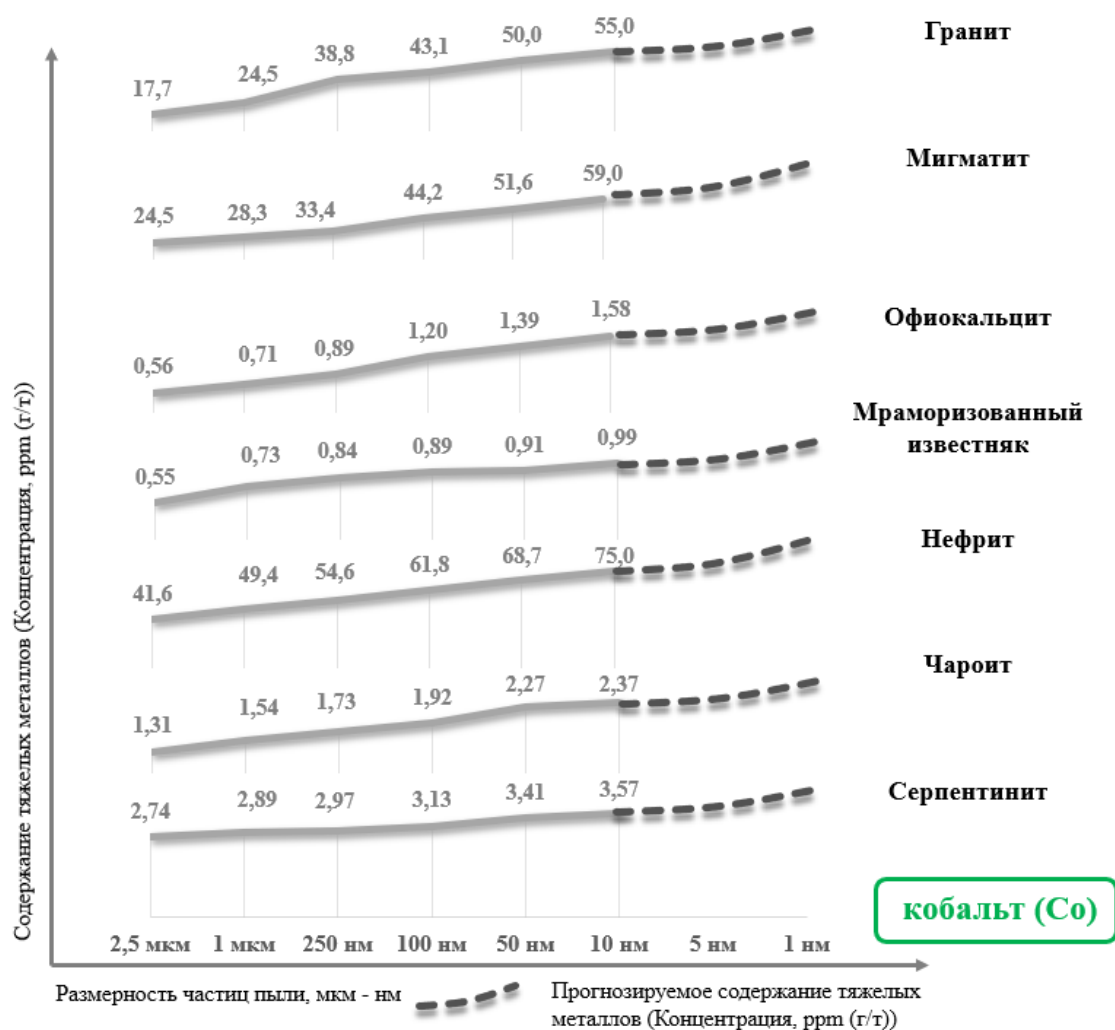


Рисунок А1 – Концентрации тяжелого металла кобальта (Co) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

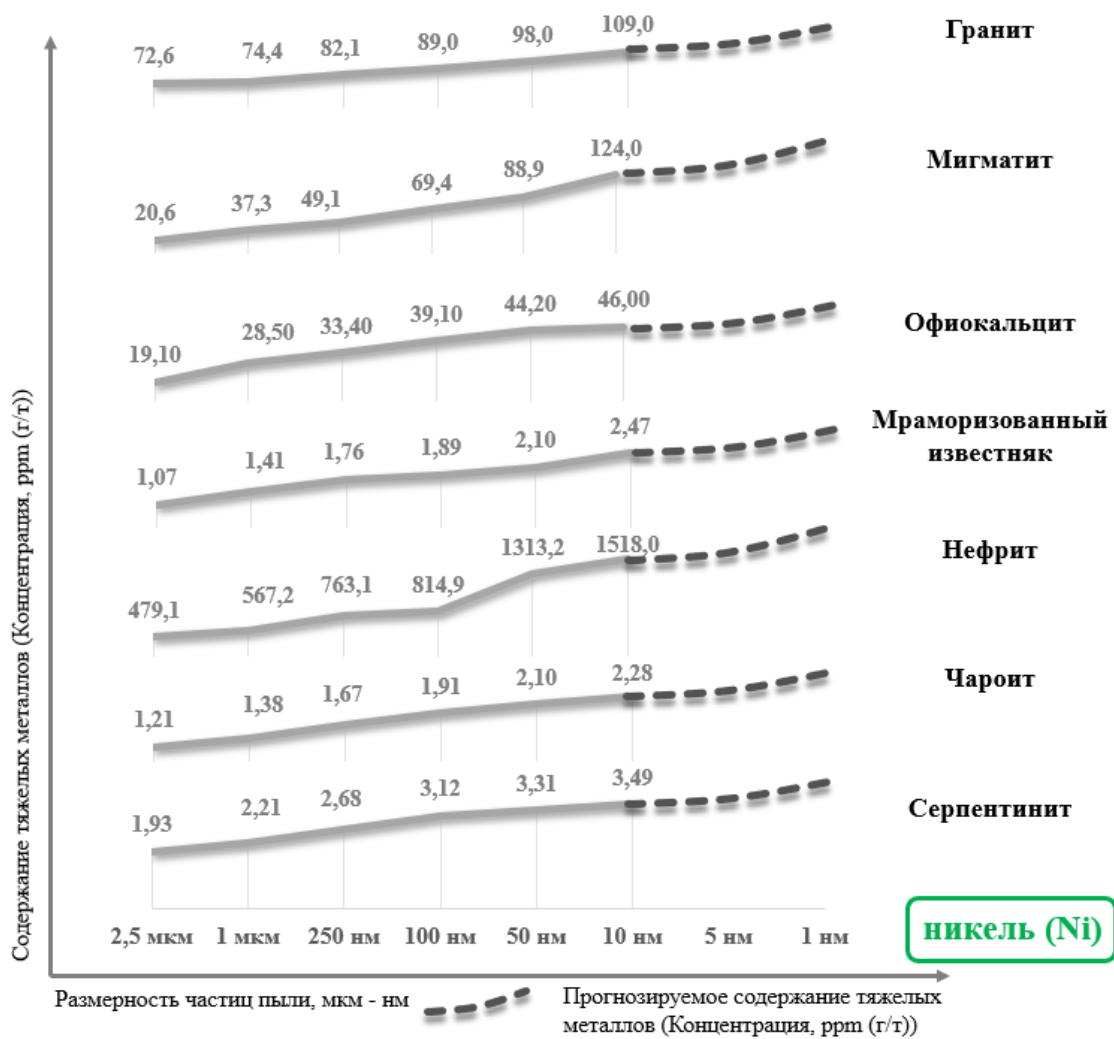


Рисунок А2 – Концентрации тяжелого металла никеля (Ni) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

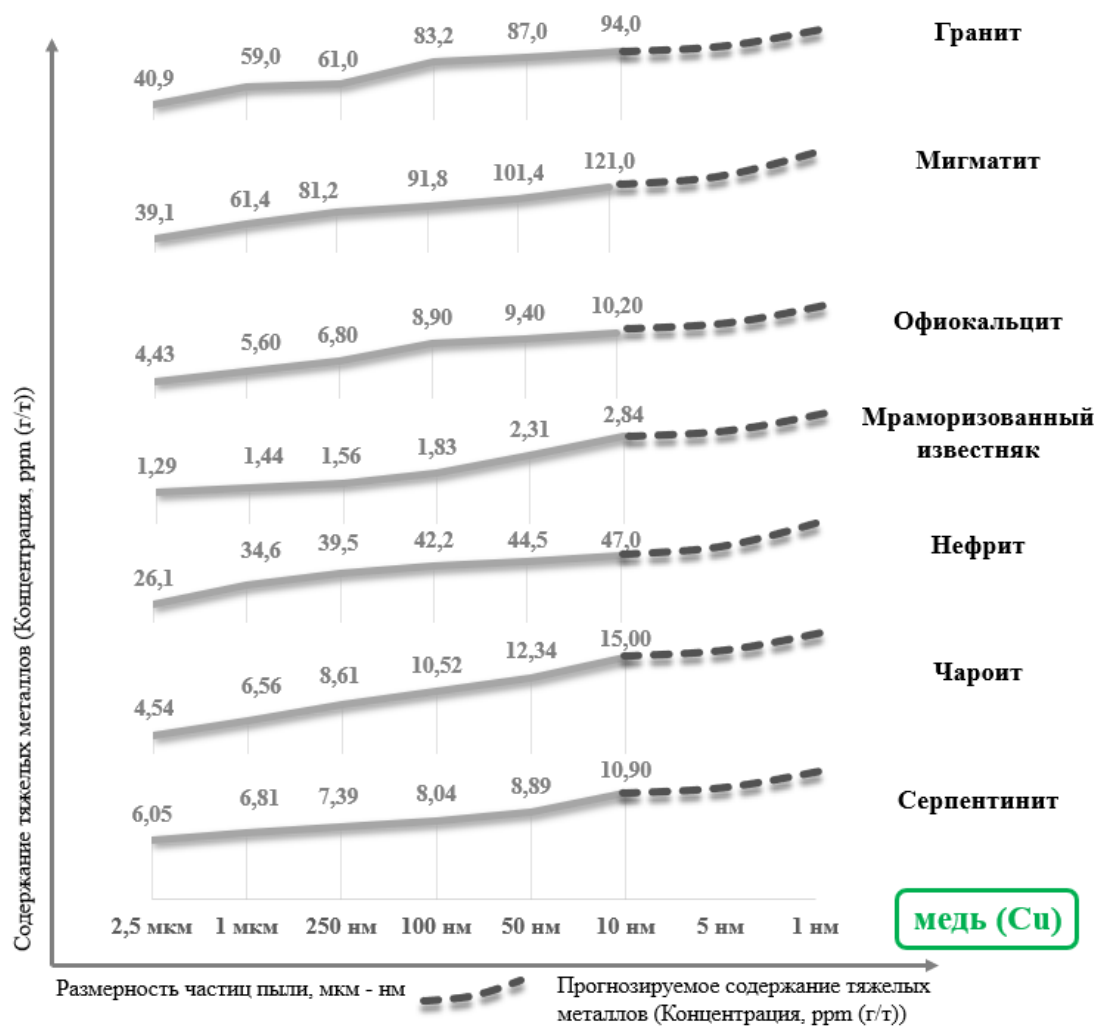


Рисунок А3 – Концентрации тяжелого металла меди (Cu) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

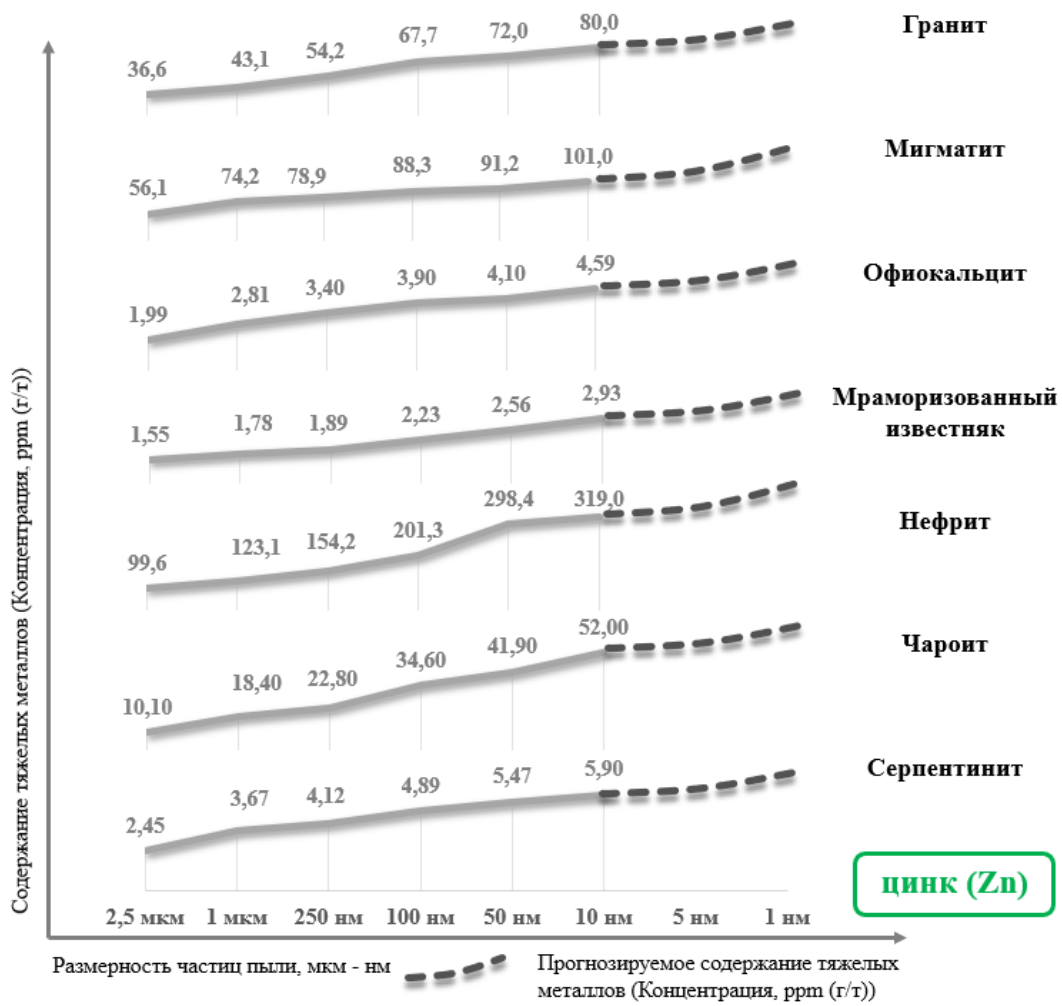


Рисунок А4 – Концентрации тяжелого металла цинка (Zn) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

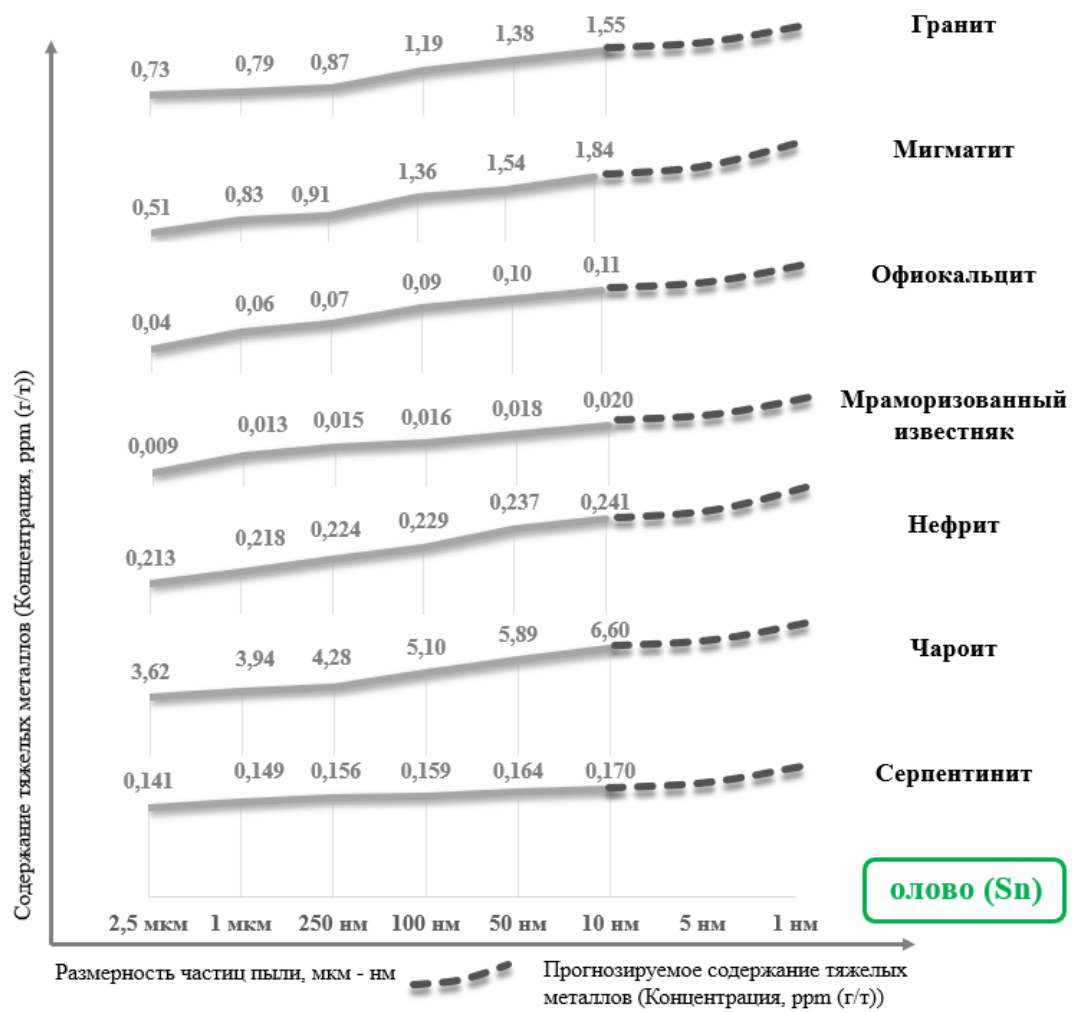


Рисунок А5 – Концентрации тяжелого металла олова (Sn) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

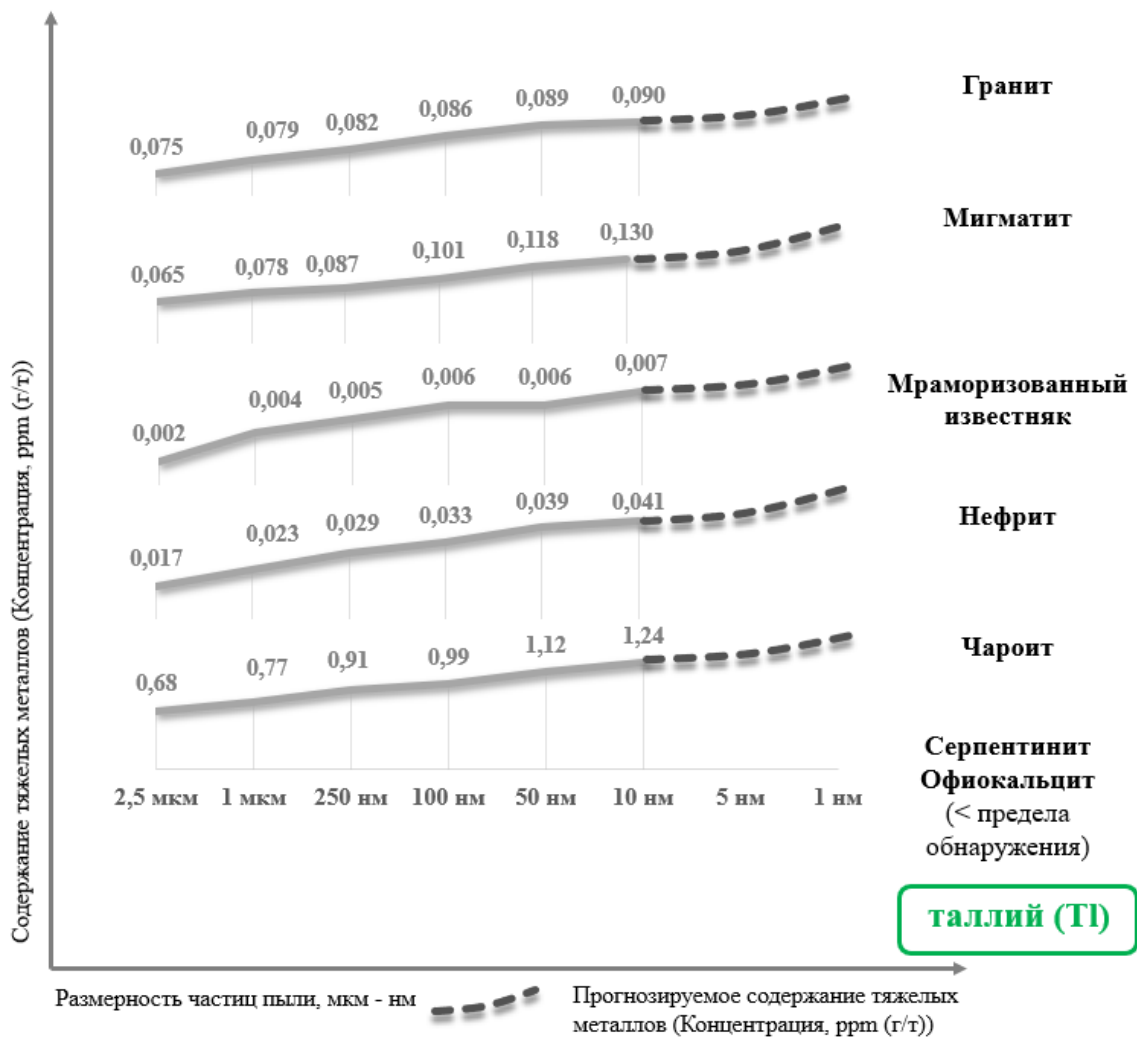


Рисунок А6 – Концентрации тяжелого металла таллия (Tl) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

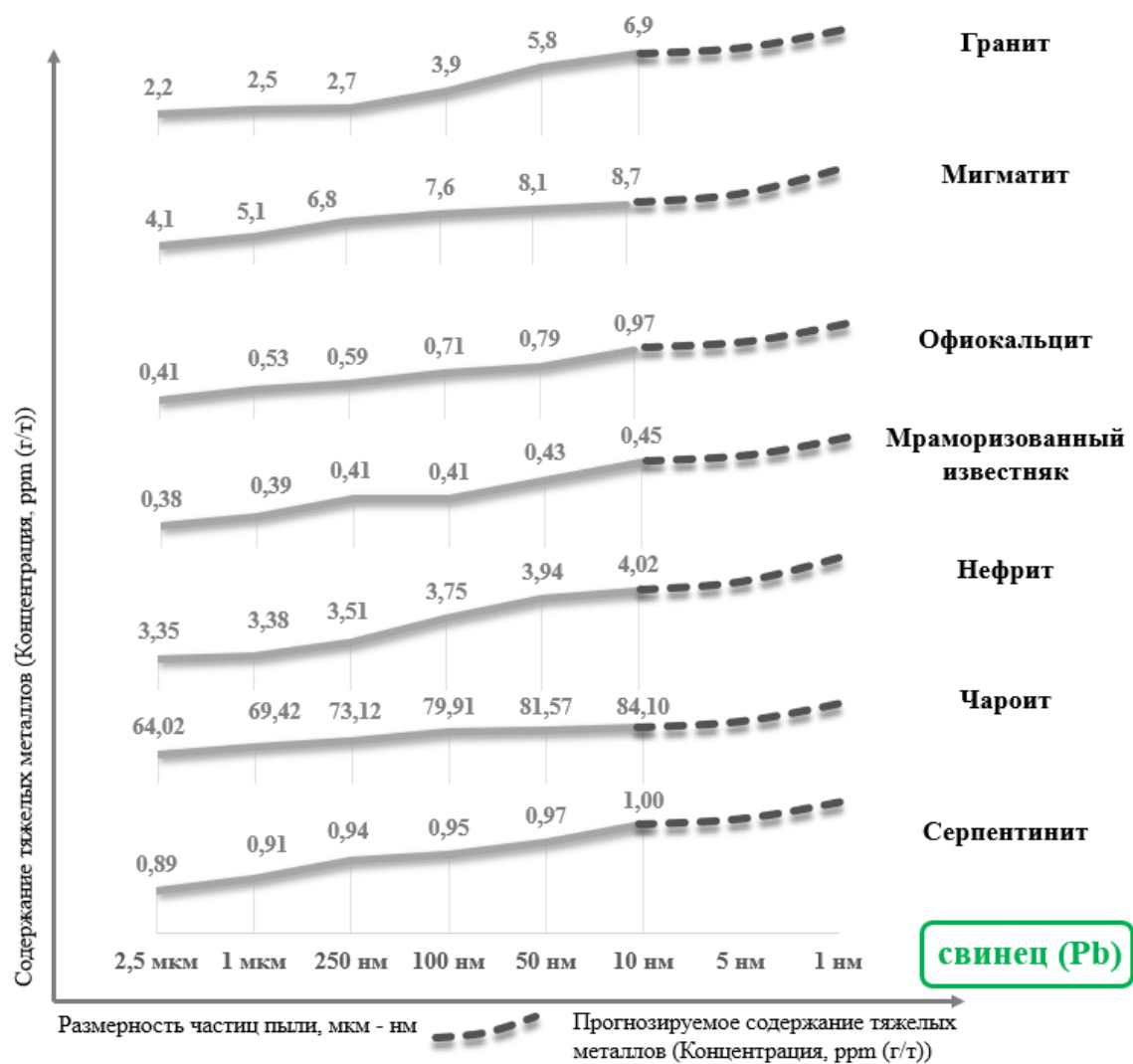


Рисунок А7 – Концентрации тяжелого металла свинца (Pb) в зависимости от размера частиц для исследуемых образцов

Микрофотография фракций наночастиц и микрочастиц пыли гранита, мигматита, офиокальцита, мраморизованного известняка, нефрита, чароита и серпентинита

Условные обозначения:

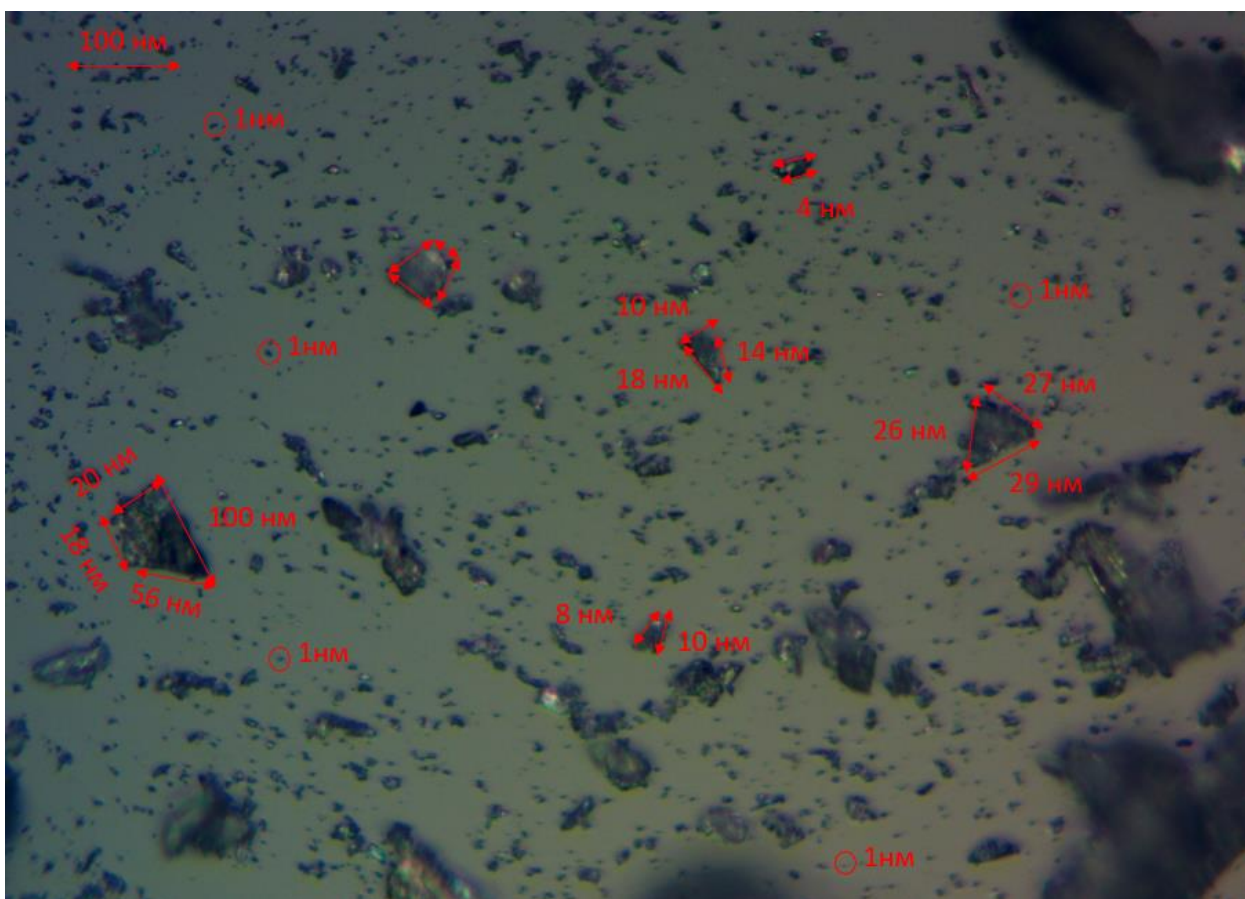
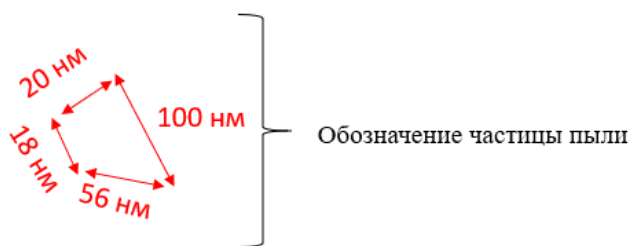


Рисунок Б1 – Микрофотография фракций наночастиц и микрочастиц пыли мигматита, отрезок – 100 нм, в проходящем свете

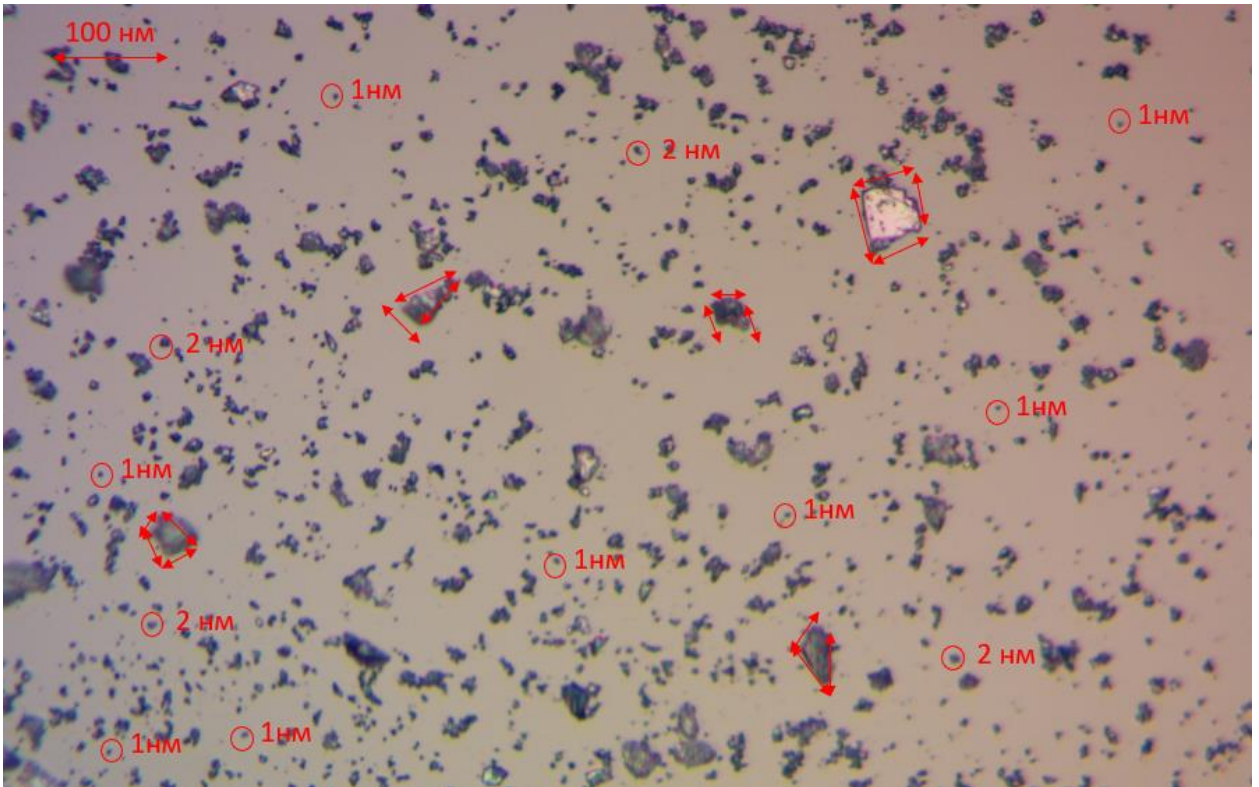


Рисунок Б2 – Микрофотография фракций наночастиц и микрочастиц пыли мраморизованного известняка, отрезок – 100 нм, в проходящем свете

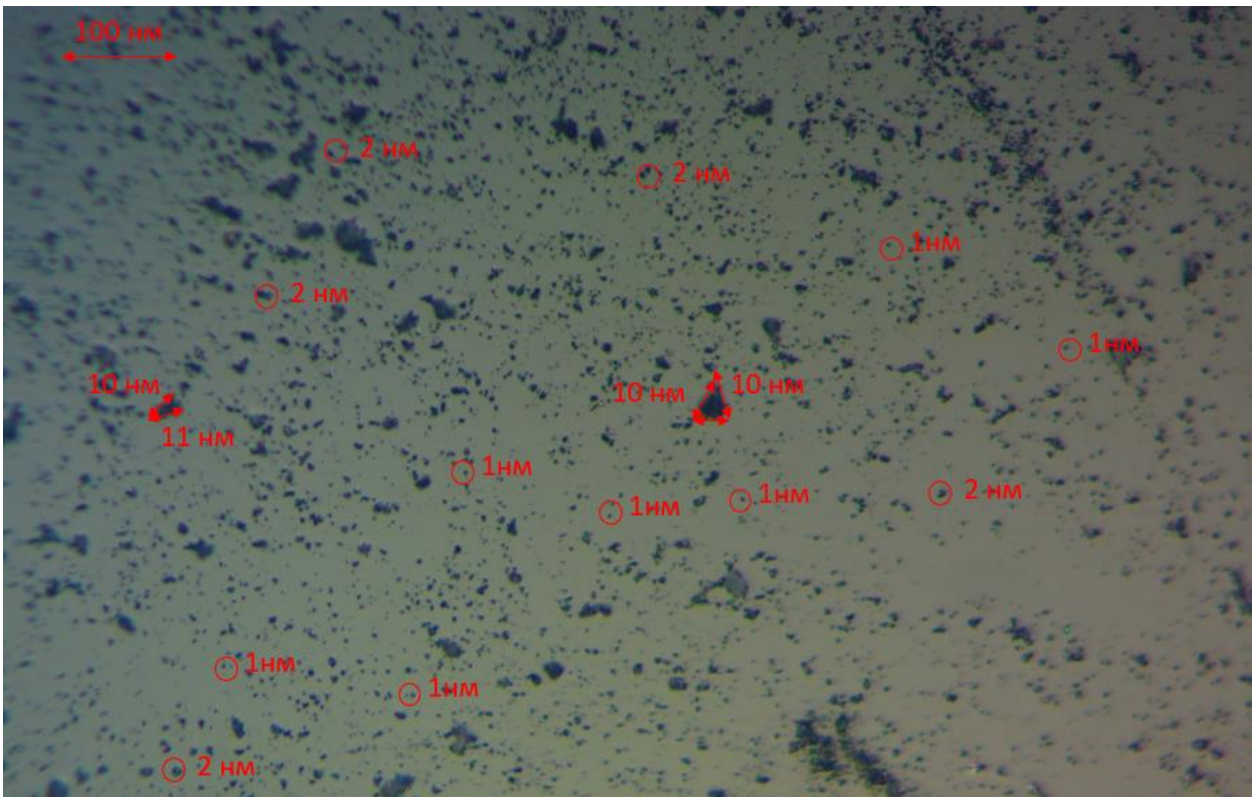


Рисунок Б3 – Микрофотография фракций наночастиц и микрочастиц пыли офиокальцита, отрезок – 100 нм, в проходящем свете

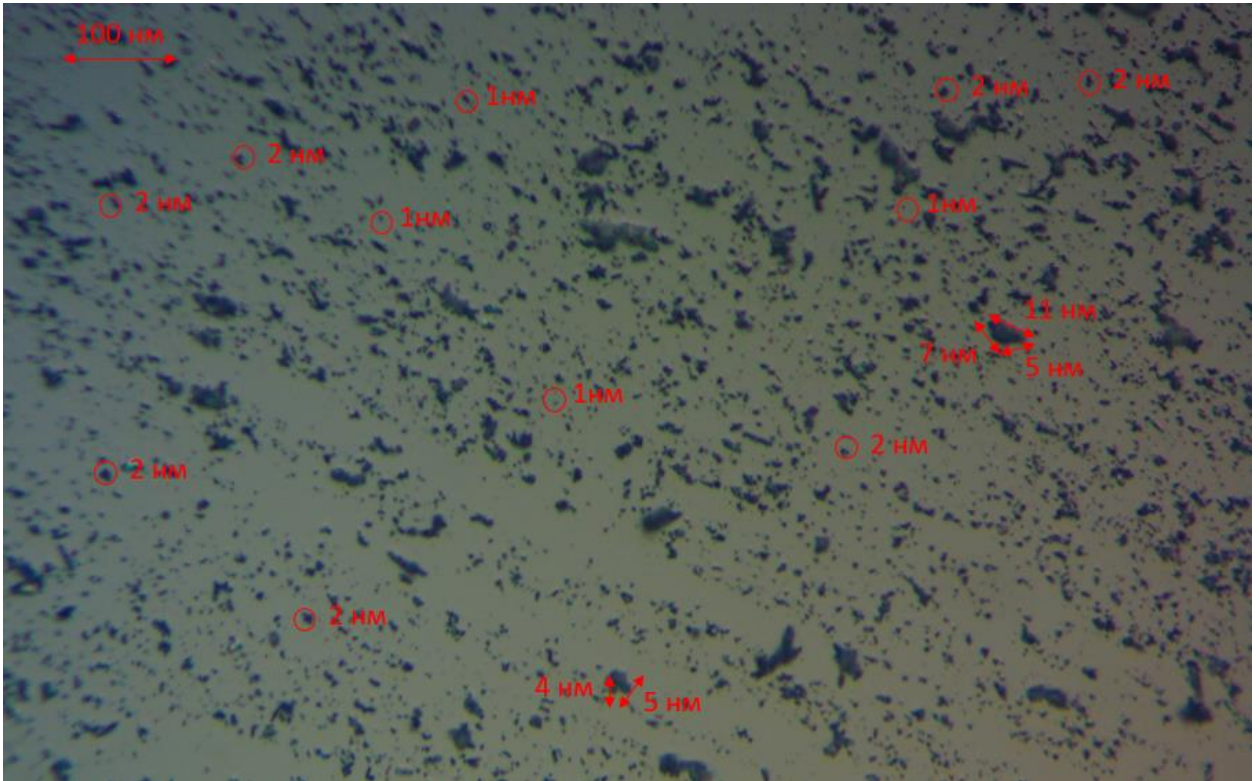


Рисунок Б4 – Микрофотография фракций наночастиц и микрочастиц пыли нефрита, отрезок – 100 нм, в проходящем свете

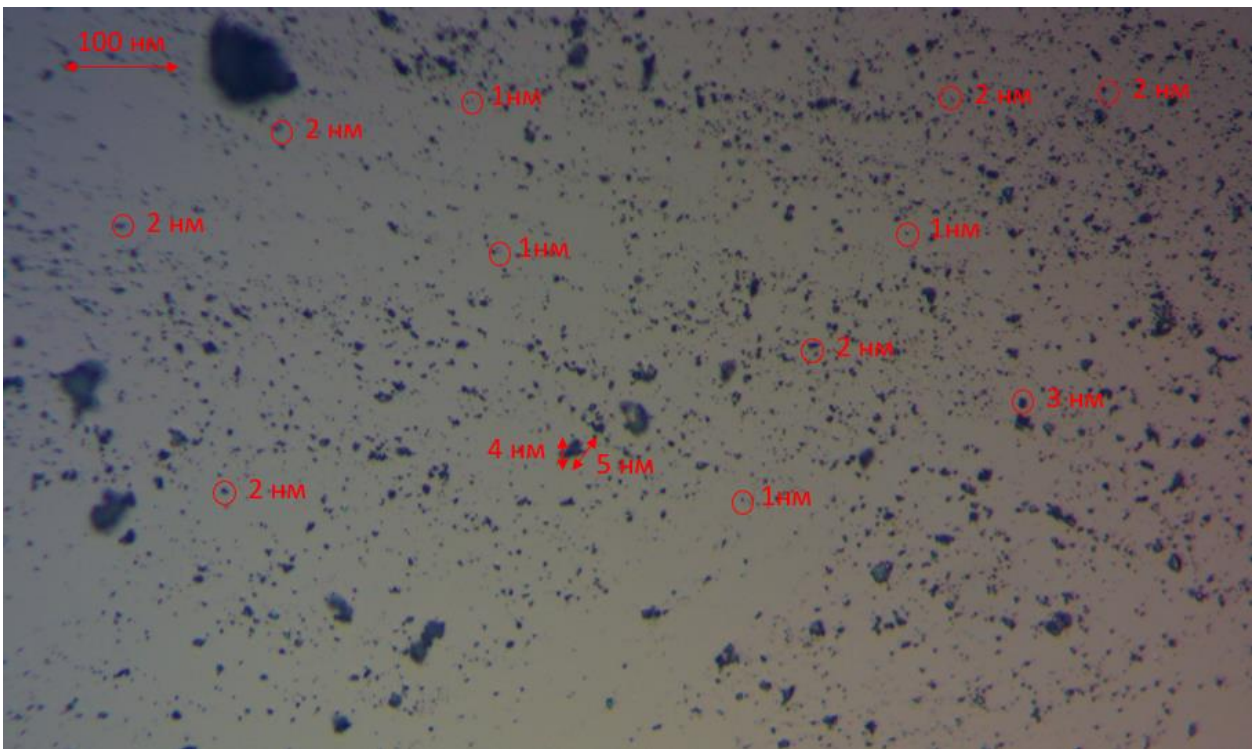


Рисунок Б5 – Микрофотография фракций наночастиц и микрочастиц пыли серпентинита, отрезок – 100 нм, в проходящем свете



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
В.В. Смирнов
« 17 » *сентября* 2022 г.

Справка

о внедрении результатов диссертационного исследования на соискание
ученой степени кандидата технических наук
Александровой Ангилины Юрьевны

Результаты диссертационного исследования Александровой Ангилины Юрьевны используются в учебном процессе студентов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», обучающихся по следующим направлениям подготовки:

- 20.03.01 и 20.04.01 «Техносферная безопасность», в рамках учебных дисциплин «Промышленная экология», «Промышленная санитария и гигиена труда».

Заведующая кафедрой
промышленной экологии и безопасности
жизнедеятельности, ИРНИТУ,
Д.т.н., профессор

С.С. Тимофеева.



**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

АКТ

о перспективном использовании результатов
диссертационной работы на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Александровой Ангелины Юрьевны

Регулирование экологического состояния окружающей среды, а именно качества атмосферного воздуха и усовершенствования условий разведки и добычи облицовочных и поделочных камней с точки зрения снижения экологических рисков является важной и актуальной задачей.

В диссертации представлены возможности, теоретические и практические инструменты по снижению экологических рисков в районах добычи и переработки облицовочных и поделочных камней, которые могут быть приняты к внедрению на территории Иркутской области.

Проведенные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что предложенные автором превентивные мероприятия по ужесточению нормирования выбросов каменной пыли с учетом наличия в ней тяжелых металлов и частиц, попадающих в диапазон нано-размеров, позволят усовершенствовать требования к недропользователям по улучшению качества атмосферного воздуха в районах их присутствия.

За счет получения информации по фракционному составу частиц выбрасываемой пыли на карьерах по добыче облицовочных и поделочных камней, обеспечится безопасность атмосферного воздуха и появится возможность оценить уровень остаточного риска для окружающей среды и сравнить эти показатели с таковыми же после внедрения новых методов регулирования выбросов.

Министр

Трофимова С.М.





ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«ИНК-СтройНефтеГаз»

Российская Федерация, 664007, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции ¼, офис Т1001, тел.+7 (3952) 211-352

e-mail: ink_sng@irkutskoil.ru

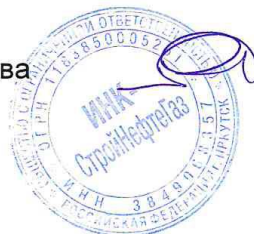
ИНН 3849068357/ КПП 384901001, ОГРН 1183850005261

21 января 2022 года

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Результаты диссертационной работы Александровой Ангелины Юрьевны на соискание ученой степени кандидата технических наук, приняты к внедрению и будут учтены при проектировании технологических объектов горнодобывающей и перерабатывающей промышленности компанией ООО «ИНК-СтройНефтеГаз» для регулирования выбросов каменной пыли при строительстве объектов нефтегазового комплекса.

Начальник службы
подготовки производства



Митрюков А.А.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«ИНК-СтройНефтеГаз»

Российская Федерация, 664007, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции ¼, офис Т1001, тел.+7 (3952) 211-352

e-mail: ink_sng@irkutskoil.ru

ИНН 3849068357/ КПП 384901001, ОГРН 1183850005261

Приложение к справке о внедрении от 21.01.2022

Результаты диссертационной работы Александровой А.Ю. были использованы компанией ООО «ИНК-СтройНефтеГаз» при выполнении условий пользования недрами к лицензии на пользование недрами раздела «Требования по рациональному использованию и охране недр по безопасному ведению работ, связанных с использованием недрами» на участках разработки грунтово-строительных материалов:

На карьере «Ичединский-3» по добыче гранита и производства щебня на территории Ичединского нефтяного месторождения.

Результаты диссертационной работы послужили основой для выполнения работ по отбору проб пыли на вышеупомянутых карьерах для проведения их дальнейшего анализа и уточнения пылевой нагрузки на территории данных карьеров (карта отбора проб на рисунке Д1).

Начальник службы
подготовки производства



Митрюков А.А.

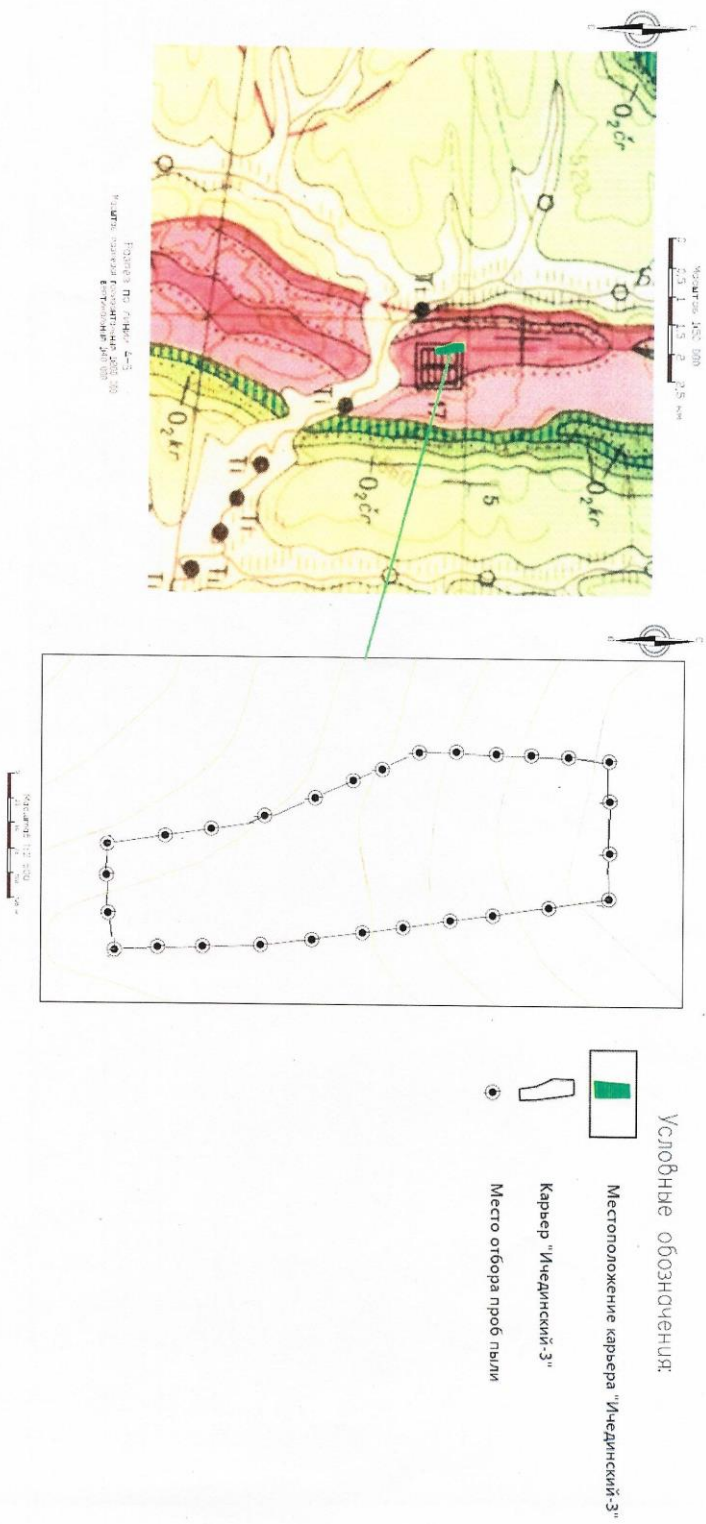


Рисунок Д1 – Карта отбора проб карьера «Ичединский-3»

Последовательность расчетов: определение расхода газовой смеси с учетом климатических особенностей; расчет поверхностных концентраций загрязняющих веществ по оси эмиссионного факела на некоторых расстояниях; приземные концентрации загрязняющих веществ

Последовательность расчетов приведена ниже.

1. Определить расход газовой смеси, м/с, безразмерные параметры и величину опасной скорости ветра* м/с, по формулам: V, f, v_M, m, n, d, U_M

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \omega_0, \quad (3.2)$$

$$f = 1000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}, \quad (3.3)$$

$$v_M = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V \cdot \Delta T}{H}}, \quad (3.4)$$

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}} \text{ у } f < 100$$

$$n = 0,532v_M^2 - 2,13v_M + 3,13 \text{ с и } f < 100 \text{ } v_M < 2$$

$$n = 1 \text{ с и } f < 100 \text{ } v_M \geq 2$$

$$d = 4,95v_M (1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ с и } f < 100 \text{ } v_M < 2$$

$$d = 7\sqrt{v_M} (1 + 0,28\sqrt[3]{f}) \text{ с и } f < 100 \text{ } v_M > 2$$

$$U_M = v_M \text{ с и } v_M \leq 2 \text{ } f < 100$$

$$U_M = v_M (1 + 0,12\sqrt[3]{f}) \text{ с и } v_M > 2 \text{ } f < 100$$

2. Поверхностные концентрации загрязняющих веществ, мг/м³, по оси эмиссионного факела, м, (на расстоянии,) по формуле

$$C_i = C_M \cdot S_i, \quad (3.5)$$

где C_M – безразмерный коэффициент, S_i , вычисляемый по формулам

$$S_i = 3(X_i / X_M)^4 - 8(X_i / X_M)^3 + 6(X_i / X_M)^2 \quad \text{y} \quad (X_i / X_M) < 1$$

$$S_i = \frac{1,13}{0,13(X_i / X_M)^2 + 1} \quad \text{y} \quad 1 < (X_i / X_M) \leq 8$$

$$S_i = \frac{2,55}{0,13(X_i / X_M)^2 + 9} \quad \text{y} \quad 8 < (X_i / X_M) \leq 24$$

Определим для каждого горнодобывающего предприятия поверхностные концентрации загрязняющих веществ, мг/м³. Сначала вычисляем коэффициенты t_y :

$$y1 := 50t_{y11} := \text{if} \left(Um \leq 5, \frac{Um \cdot y1^2}{Xm^2}, \frac{5y1^2}{Xm^2} \right) t_{y11} = 0,034$$

$$y2 := 100t_{y12} := \text{if} \left(Um \leq 5, \frac{Um \cdot y2^2}{Xm^2}, \frac{5y2^2}{Xm^2} \right) t_{y12} = 0,137$$

$$y3 := 200t_{y13} := \text{if} \left(Um \leq 5, \frac{Um \cdot y3^2}{Xm^2}, \frac{5y3^2}{Xm^2} \right) t_{y13} = 0,549$$

$$y4 := 300t_{y14} := \text{if} \left(Um \leq 5, \frac{Um \cdot y4^2}{Xm^2}, \frac{5y4^2}{Xm^2} \right) t_{y14} = 1,234$$

$$y5 := 400t_{y15} := \text{if} \left(Um \leq 5, \frac{Um \cdot y5^2}{Xm^2}, \frac{5y5^2}{Xm^2} \right) t_{y15} = 2,195$$

Затем определим значение S_2 :

$$S_{21} = \frac{1}{(1 + 5t_{y11} + 12,8t_{y11}^2 + 17t_{y11}^3 + 45,1t_{y11}^4)^2} \quad S_{21} = 0,709$$

$$S_{22} = \frac{1}{(1 + 5t_{y12} + 12,8t_{y12}^2 + 17t_{y12}^3 + 45,1t_{y12}^4)^2} \quad S_{22} = 0,253$$

$$S_{23} = \frac{1}{(1 + 5t_{y13} + 12,8t_{y13}^2 + 17t_{y13}^3 + 45,1t_{y13}^4)^2} \quad S_{23} = 4,763 \times 10^{-3}$$

$$S_{24} = \frac{1}{(1 + 5ty_{14} + 12,8ty_{14}^2 + 17ty_{14}^3 + 45,1ty_{14}^4)^2} S_{24} = 3,746 \times 10^{-5}$$

$$S_{25} = \frac{1}{(1 + 5ty_{15} + 12,8ty_{15}^2 + 17ty_{15}^3 + 45,1ty_{15}^4)^2} S_{25} = 5,923 \times 10^{-7}$$

Приземные концентрации загрязняющих веществ на расстоянии $Xm/2$

$$\frac{Xm}{2} = 204,842_m$$

$$C_{y01} := C_{i1} \cdot S_{21} C_{y01} = 6,057 \text{ мг/м}^3$$

$$C_{y02} := C_{i1} \cdot S_{22} C_{y02} = 2,164 \text{ мг/м}^3$$

$$C_{y03} := C_{i1} \cdot S_{23} C_{y03} = 0,041 \text{ мг/м}^3$$

$$C_{y04} := C_{i1} \cdot S_{24} C_{y04} = 3,199 \times 10^{-4} \text{ мг/м}^3$$

$$C_{y05} := C_{i1} \cdot S_{25} C_{y05} = 5,057 \times 10^{-6} \text{ мг/м}^3$$