

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Красилова Вера Алексеевна

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ПРИ ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЕЙ

2.6.12 Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник НУИЛ «Физико-химии углей»
Коссович Елена Леонидовна

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 Анализ современных представлений о составе угольной пыли и механизме ее образования в процессах добычи и переработки углей	10
1.1 Современные представления о механизме образования угольной пыли ..	12
1.2 Методы определения содержания угольной пыли в углях и объектах окружающей среды	15
1.2.1 Нормативные документы, регламентирующие расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.....	17
1.2.2 Определение содержания взвешенной пыли в угле	18
1.3 Угольная пыль как потенциальный источник загрязнения окружающей среды макро- и микроэлементами	21
Глава 2 Объекты и методы исследований	29
2.1 Объекты исследований	29
2.2. Методы исследований	35
2.2.1 Разработка метода оценки и контроля содержания и гранулометрического состава пыли в рядовых углях	37
2.2.1.1 Определение содержания взвешенной пыли	37
2.2.1.2 Определение гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции.....	41
2.2.2 Метод оценки форм нахождения потенциально опасных элементов в углях по данным фракционного анализа	50
Глава 3 Исследование влияния петрографического состава, стадии метаморфизма и окисленности углей на содержание в них пыли разного гранулометрического состава	52
Глава 4 Экспериментальные исследования распределения макро- и микроэлементов в рядовых углях и выделенной из них взвешенной пыли ...	65
4.1 Содержание макро- и микроэлементов в рядовых углях.....	65
4.2 Влияние окисленности углей на содержание в них макро- и микроэлементов.....	68
4.3 Содержание макро- и микроэлементов во взвешенной пыли, выделенной из рядовых углей	74
4.4 Определение коэффициентов концентрирования макро- и микроэлементов во взвешенной пыли	77
4.5 Оценка форм нахождения потенциально опасных элементов в углях.....	84

4.6. Прогноз концентрирования в угольной пыли потенциально опасных элементов	91
Глава 5 Рекомендации по применению полученных результатов	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методика измерений гранулометрического состава проб угольной пыли методом лазерной дифракции.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Документы о практическом использовании результатов диссертационного исследования.....	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Выделение в окружающую среду угольной пыли при добыче, хранении, транспортировке углей, а также при их перевалке на морских и речных терминалах является в настоящее время актуальной проблемой. Образование угольной пыли происходит в результате механического разрушения углей при геологических процессах, сопровождающих углеобразование, а также при добыче и переработке под влиянием механических воздействий.

В Российской Федерации в соответствии с санитарными правилами (СанПиН 1.2.3685) установлен перечень загрязняющих атмосферный воздух веществ, в который входят в том числе, пыль каменного угля и взвешенные частицы PM_{2,5} и PM₁₀. Пыль с размерами частиц менее 10 мкм (аэрозольная пыль) представляет наибольший интерес, т.к. способна длительное время находиться в атмосферном воздухе, оседать на почвы и попадать в водные объекты.

Ископаемые угли содержат в своем составе, помимо органического вещества, минеральные компоненты. В соответствии с СанПиН 1.2.3685, минеральные компоненты в составе взвешенных веществ самостоятельно не являются загрязнителями атмосферного воздуха. Однако, при рассеянии и оседании угольной пыли на почвы, растительность и водные объекты, входящие в ее состав макро- и микроэлементы могут приводить к загрязнению объектов окружающей среды.

Для расчета выбросов загрязняющих веществ (в том числе пыли каменного угля) в атмосферный воздух используют коэффициенты, учитывающие содержание в угле «пылевой» фракции и «частиц, способных переходить в аэрозоль». Эти коэффициенты имеют для всех углей фиксированные значения, что не позволяет ранжировать угольную продукцию и добываемые угли по «пылеемкости». Это в значительной степени связано с отсутствием надежных методов количественного

определения содержания в углях «частиц, способных переходить в аэрозоль», то есть пыли, способной переходить во взвешенное состояние, и доли в ней частиц PM10 и PM2,5. Следует также отметить, что в литературе практически отсутствует информация о перераспределении макро- и микроэлементов (в том числе, потенциально опасных) между углем и угольной пылью, что, в конечном итоге, не позволяет проводить обоснованные оценки источников загрязнения почв и других объектов окружающей среды на территориях, прилегающих к предприятиям по добыче и перевалке углей.

В связи с этим, актуальными являются исследования, направленные на обоснование и разработку методов, позволяющих оценивать содержание в добываемых углях и угольной продукции взвешенной пыли разного гранулометрического состава и концентрирование в ней потенциально опасных макро- и микроэлементов. Наличие такой надежной информации даст возможность перейти к достоверным расчетам удельных и валовых выбросов пыли в окружающую среду, оценивать риски загрязнения почв и водных объектов на территориях, прилегающих к горным предприятиям, а также планировать мероприятия, направленные на снижение выбросов загрязняющих веществ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда «Образование нано- и микроразмерной пыли при техногенных и природных воздействиях на угли разных генетических типов» (грант №18-77-10052-П) и в рамках Стратегического проекта «Технологии устойчивого развития» Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

Цель работы – разработка методических решений для контроля содержания и состава угольной пыли при добыче и переработке углей. Установление на основании разработанных методов влияния стадии метаморфизма, петрографического состава, окисленности и форм нахождения потенциально опасных элементов на количество и состав угольной пыли.

Идея работы заключается в обосновании методов оценки загрязнения окружающей среды угольной пылью при добыче и переработке углей.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Метод оценки и контроля содержания и состава пыли, образующейся в процессах добычи и переработки углей, основан на выделении и улавливании взвешенной пыли на специализированном испытательном стенде и определении ее гранулометрического состава с использованием лазерной дифракции в условиях, обеспечивающих достоверность и правильность результатов измерений.

2. Содержание в рядовых углях взвешенной пыли, в том числе с размерами частиц менее 10 мкм, характеризуется значительным разбросом значений для углей близких стадий метаморфизма и не зависит от их петрографического состава.

3. Для прогноза концентрирования в угольной пыли потенциально опасных элементов разработан метод, основанный на определении распределения потенциально опасных элементов (ПОЭ) в пробах разной плотности, полученных при фракционном анализе углей. Показано, что концентрирование в угольной пыли серы, фтора и ртути в значительной степени определяется формами нахождения этих элементов в исследованных углях.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: представительным объемом экспериментальных исследований, проведенных на пробах углей разных стадий метаморфизма, окисленности и петрографического состава, отобранных стандартными методами на месторождениях Российской Федерации; использованием стандартных методов и апробированных методик для оценки состава углей и угольной пыли; применением аттестованной в установленном порядке методики для определения гранулометрического состава угольной пыли; использованием современного

аналитического и испытательного оборудования с высокими метрологическими характеристиками.

Методы исследований.

Стандартные методы определения вещественного и химического состава углей и угольной пыли; выделение и улавливание взвешенной пыли на специализированном испытательном стенде; определение гранулометрического состава взвешенной пыли методом лазерной дифракции; инструментальные методы определения макро- и микроэлементов в рядовых углях и выделенной из них взвешенной пыли: атомно-абсорбционная спектрометрия с пиролитической приставкой для определения содержания ртути; потенциметрическое титрование с фтор-селективным электродом растворов для определения фтора; атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой для определения макро- и микроэлементов; метод фракционного анализа углей для определения в них форм нахождения элементов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлено, что окисленность рядовых углей неоднозначно влияет на содержание в них взвешенной пыли и частиц менее 10 мкм (PM10). Так, для рядовых углей средней стадии метаморфизма окисленность приводит к увеличению (по сравнению с углем вне зоны окисления) содержания пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм. Для рядовых углей высокой стадии метаморфизма содержание в окисленном угле пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм значительно ниже, чем для неокисленного;

- показано, что концентрирование таких элементов как Al, Fe, Ca, Mg, Na и K во взвешенной пыли, выделенной из рядовых углей, определяется повышением ее зольности по сравнению с углем. Концентрирование остальных макро- и микроэлементов, в том числе потенциально опасных, во взвешенной пыли, как правило, не связано с увеличением ее зольности по

сравнению с рядовыми углями и может определяться формами нахождения элементов в углях;

- установлено, что рядовые антрациты одного месторождения, имеющие близкий петрографический состав и стадию метаморфизма, существенно различаются по содержанию пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размерами менее 10 мкм.

Практическое значение и реализация результатов работы.

Разработана и аттестована «Методика измерений гранулометрического состава проб угольной пыли методом лазерной дифракции» (Свидетельство об аттестации методики измерений № 241.0032/RA.RU.311866/2022). Методика использована для разработки стандартного образца состава угля каменного Кузнецкого бассейна (УК-2 СО МИСиС) ГСО 12118-2023, в части аттестации дополнительной характеристики - объемной доли частиц с размером от 10 до 50 мкм. Методика и ГСО 12118-2023 используется ООО «Фритч Лабораторные приборы» для калибровки анализаторов размеров частиц и проведения измерений гранулометрического состава угольной пыли разного происхождения. Метод контроля содержания и гранулометрического состава пыли используется на АО «УК Кузбассразрезуголь» для выбора химических реагентов для пылеподавления и определения их оптимальных расходов.

Апробация работы.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы были представлены на научном симпозиуме «Ртуть в биосфере. Эколого-геохимические аспекты» (22-27 августа 2022 г., Иркутск), на XXIII международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (26-28 сентября 2022 г., Москва), на научных симпозиумах «Неделя Горняка» (НИТУ МИСИС, Москва, 2021-2023 гг.), на XXIV международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (25-29 сентября 2023 г., Москва), на научных семинарах НИТУ МИСИС.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 5 индексируемых в базе данных Scopus, 2 в базе данных RSCI, 3 в научных изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России и 4 публикации в сборниках конференций.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы из 103 источников и 2 приложений, содержит 32 рисунка и 21 таблицу.

Глава 1 Анализ современных представлений о составе угольной пыли и механизме ее образования в процессах добычи и переработки углей

Угольная промышленность является одной из ведущих отраслей, которая определяет экономическое развитие страны. Российская Федерация (РФ) является одним из мировых лидеров по производству и экспорту угля, занимая шестое место в мире по объемам угледобычи и третье место в мире по экспорту угля. Добыча угля в России динамично увеличивается, так за январь-июнь 2022 г. по данным Росстата она составила - 208,2 млн. т. (рисунок 1). По данным на 2022 год экспорт составляет 53,1% в общем объеме отгрузки российского угля [1].

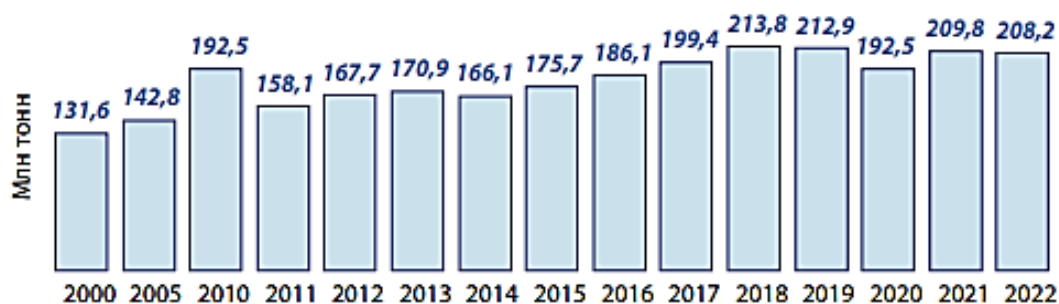


Рисунок 1 – Добыча угля в России в январе-июне 2000-2022 гг. по данным Росстата [1]

Процессы добычи, переработки и перевалки угля влекут за собой рост нагрузки на окружающую среду [2]. Все технологические процессы (добыча, переработка, транспортировка и перевалка) в угольной промышленности сопровождаются выделением угольной пыли, которая, поступая в атмосферный воздух, способна перемещаться на длительные расстояния, оседать на почвы и попадать в водные объекты. Эта проблема касается в первую очередь морских и речных терминалов, которые являются основным звеном в схеме экспортных поставок, но также не менее актуальна для угольных предприятий, где происходит непосредственно добыча и переработка сырья и прилегающих к ним территорий.

На угольных предприятиях, морских и речных терминалах угольная пыль выделяется в процессах перегрузки, а также вследствие ветровой эрозии с открытых штабелей угля. Крупными источниками пыления являются места выгрузки угля из вагонов и перегрузки в судно, пересыпные станции, а также станции дробления/грохочения [3]. В работе [4] авторы рассматривали пылевой фактор при транспортировке угля на примере портового комплекса. Было показано, что при транспортировке угля климатические условия (в первую очередь температура и ветер) оказывают значительное влияние на процессы выделения пыли. Авторы утверждают, что в зимний период (при температуре воздуха от -25°C до -42°C) происходит вымерзание влаги из угля, что сопровождается выделением в атмосферу в 3-5 раз больше пыли, чем в другое время года при технологических операциях по выгрузке угля и его транспортировке [4].

На сегодняшний день угольные предприятия активно разрабатывают меры по предотвращению выделения угольной пыли и способы оперативного контроля ее концентрации вблизи зон непосредственной добычи, перевалки и переработки углей, в том числе с созданием переносных приборов с анализаторами размеров, концентрации и вещественного состава частиц в воздухе рабочей зоны [5-7]. На морских и речных терминалах также внедряют мероприятия, направленные на снижение пыления углей. Для этого в портах используют целые комплексы пылеподавления на разных его технологических участках (различные устройства для орошения, туманные установки, специализированные форсунки, защитные экраны, пылеулавливающие сетки, рукавные пылеулавливатели, системы аспирации т.д.) [8-10].

Кроме неблагоприятного влияния угольной пыли на окружающую среду, она также негативно воздействует на здоровье рабочих [11-13]. В Руководстве по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса отмечено, что действие пыли на организм человека при вдыхании запыленного воздуха носит накопительный характер [14].

Пыль каменного угля внесена в перечень загрязняющих веществ в соответствии с санитарными правилами (СанПиН 1.2.3685) [15]. Для воздуха рабочей зоны установлены такие углеродосодержащие загрязняющие вещества как кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли от 10 до 70% (например: гранит, шамот, слюда-сырец, углеродная пыль); пыль растительного и животного происхождения: а) с примесью диоксида кремния от 2 до 10%; углерода пыли: а) коксы каменноугольные, пековые, нефтяные, сланцевые, б) антрацит с содержанием свободного диоксида кремния до 5%, в) другие ископаемые угли и углепородные пыли с содержанием свободного диоксида кремния до 5% [15].

Следует также отметить, что для почв и водных объектов в настоящее время отсутствуют маркерные вещества, относительно которых можно было бы судить о том, что причиной загрязнения этих объектов является именно угольная пыль. В значительной степени это связано с отсутствием информации о содержании в углях взвешенной угольной пыли и ее составе, особенно о содержании и формах нахождения в ней потенциально опасных элементов, нормированные концентрации которых (ПДК) в почвах и водах установлены в СанПиН 1.2.3685-21.

1.1 Современные представления о механизме образования угольной пыли

Угольная пыль образуется в результате разрушения углей при механических воздействиях, сопровождающих процессы их добычи и переработки. При этом способность углей к разрушению с образованием взвешенной угольной пыли (в том числе менее 10 и 2,5 мкм) в значительной степени определяется механическими свойствами углей [16]. Многочисленные исследования посвящены определению базовых механических свойств углей [16-20], которые могут влиять на процессы пылеобразования при добыче углей. К таким механическим свойствам относят: твердость, плотность и пористость угольного вещества [16], предел прочности на сжатие [17], дробимость по Хардгроуву [18-20] и др. Тесная

связь дробимости углей с количеством выделяемой в воздух пыли позволила ученым продолжить исследования, направленные на оценку взаимосвязей структурных особенностей углей и их склонности к пылеобразованию при механических воздействиях. В качестве характеристик использовали стадию метаморфизма [18,21,22] и петрографический состав углей [18,21,23]. В литературе приведена информация об определенном влиянии петрографического состава углей на их склонность к пылеобразованию, однако данные разных авторов весьма противоречивы [18,21,23]. Так, петрографический состав, в основном, определяет измельчаемость и количество частиц мелких классов, однако частицы таких размеров несопоставимы с размерами частиц пыли, способной находится в воздухе во взвешенном состоянии и перемещаться на длительные расстояния.

С другой стороны, количество пылевой фракции (с размерами менее 200 мкм), образующейся при разрушении углей, имеет тенденцию к увеличению со стадией метаморфизма [24-26], хотя и с достаточно большим разбросом данных для углей средней стадии метаморфизма [23].

Современные представления о взаимосвязи между механическими свойствами углей и их склонностью к разрушению с образованием тонкодисперсной пыли основаны на предположении, что зарождение и рост дефектов происходит прежде всего на нано- и микромасштабных уровнях [27,28]. На основании этих предположений, независимо друг от друга, авторы [29,30] предположили, что микро- и наноиндентирование углей как хрупких материалов приводит к их разрушению в зоне контакта с образованием ядра раздробленного материала. Процессы пылеобразования при разрушении угля предварительно изучались методом наноиндентирования авторами [31,32].

Согласно известным данным авторов Коссович Е. Л., Эпштейн С. А., Бородича Ф. М., Добряковой Н. Н. и Красиловой (Просиной) В. А., склонность углей к разрушению с образованием угольной пыли в значительной степени определяется неоднородностью механических свойств

угольного вещества, в том числе, его локальной жесткостью (модуль упругости). Так, при механических воздействиях наличие зон с аномальными свойствами (повышенной или пониженной жесткостью) может приводить к формированию концентраторов напряжений, вблизи которых возможно зарождение и развитие дефектов (разрушение) [33]. В работе [33] для качественной оценки неоднородности механических свойств был предложен метод картирования результатов автоматизированного наноиндентирования. Представленные в работе результаты показали, что анализ распределения механических свойств по данным наноиндентирования позволяет качественно выявлять способность углей к разрушению с образованием пыли и внезапным выбросам.

Как уже было отмечено ранее, что одной из причин склонности углей к разрушению с образованием пыли является неоднородность угольного вещества. Неоднородность структуры угольного вещества может проявляться в следующем:

- неоднородность механических свойств отдельных мацералов [23,34-40];
- неоднородность, связанная с наличием минеральных включений различной формы и размеров, значительно отличающихся по своим механическим свойствам от угольного вещества [35];
- неоднородность, связанная с генотипом по степени восстановленности витринита [41];
- неоднородность структуры витринита [42,43].

В настоящее время отсутствуют надежные способы оценки склонности углей к образованию пыли, так как отмеченные взаимосвязи в значительной степени противоречивы. При этом для качественной оценки неоднородности угольного вещества, идентификации потенциальных концентраторов напряжений (пор, минеральных включений и зон разупрочнений) а также, в первом приближении, оценки их размеров, может быть использован метод

построения карт распределения механических свойств углей, по данным автоматизированного наноиндентирования.

1.2 Методы определения содержания угольной пыли в углях и объектах окружающей среды

В Российской Федерации в соответствии с санитарными правилами (СанПиН 1.2.3685) [15] установлен перечень загрязняющих атмосферный воздух вещества, в который входят в том числе, пыль каменного угля и взвешенные частицы с размерами менее 10 и 2,5 мкм (PM10 и PM2,5), а также соответствующие им предельно допустимые концентрации (ПДК). Кроме этого, в соответствии с Приказом №59 от 28.01.2021 утверждена методика [44], в которой приведены соответствующие формулы для определения размера вреда и зафиксированы таксы для исчисления вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды. Одними из загрязняющих веществ, к которым применяются таксы в соответствии с методикой, являются пыль каменного угля, взвешенные частицы и взвешенные частицы PM10 и PM2,5.

Угольную пыль в атмосферном воздухе рабочей зоны принято оценивать по превышению ее концентрации относительно предельно-допустимых концентраций (ПДК) в зависимости от содержания в пыли свободного диоксида кремния. В многочисленных работах показано, что диоксид кремния в составе угольной пыли, приводит к глубокому внедрению в легкие человека и вызывает заболевание легочной системы, такое как пневмокониоз [27,45,46]. В Приложении 2 [47], установлен перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Следует обратить внимание, что в ГОСТ 12.1.005-88 среди перечня ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны не установлены такие загрязняющие вещества как пыль каменного угля и взвешенные частицы PM2,5 и PM10. В соответствии с СанПиН 1.2.3685 для воздуха рабочей зоны отмечены углеродосодержащие загрязняющие вещества и соответствующие им ПДК [15].

Для идентификации угольной пыли и определения ее концентрации в атмосферном воздухе существует методика [48] основанная на измерении массовой концентрации угольной пыли в воздухе гравиметрическим методом с использованием аэрозольных фильтров АФА-ВП-20-1, которые поглощают взвешенные частицы из пропущенного через фильтры объема воздуха. После кислотной минерализации фильтров АФА-ВП-20-1 определяют массу угольной пыли на волокнах ткани фильтра. Этот метод позволяет дифференцировать органическую пыль от неорганической, однако не может однозначно идентифицировать в ней уголь.

Для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха применяется ряд руководящих документов:

Руководящий документ 52.04.893-2020 устанавливает методику измерения массовой концентрации взвешенных веществ в атмосферном воздухе гравиметрическим методом. Суть методики заключается в определении массы уловленных частиц из атмосферного воздуха на фильтр из ткани ФПП и расчете концентрации взвешенных веществ в атмосферном воздухе на основе измеренной массы уловленных частиц и отобранного объема воздуха. Диапазон измерений от 0,15 до 10 мг/м³ (для весов специального класса точности) и от 0,3 до 10 мг/м³ (для весов высокого класса точности) при объеме пробы 3000 дм³ [49].

В руководящем документе РД 52.04.921-2022 предложена методика измерений массовой концентрации каменноугольной пыли в атмосферном воздухе фотометрическим методом. Диапазон измерений массовой концентрации каменноугольной пыли от 0,2 до 20 мг/м³ включительно. Суть методики состоит в улавливании каменноугольной пыли на фильтр АФА-ХП-10 с помощью аспиратора, после этого фильтр с уловленной каменноугольной пылью растворяют в диметилсульфоксиде/орто-ксилоле, полученную смесь нагревают в условиях ультразвукового диспергирования. Определение массы пыли каменного угля проводят фотометрическим методом по интенсивности окраски раствора, считая, что окрашенные

компоненты, экстрагируемые из каменноугольной пыли обусловлены битумными соединениями [50]. Однако к недостаткам настоящей методики можно отнести тот факт, что растворение каменноугольной пыли в указанных реагентах может быть достигнуто не для всего диапазона стадий метаморфизма каменных углей, аналогично растворению в диметилформамиде [41]. Так, для каменных углей низкой стадии метаморфизма возможно достичь максимальной степени растворения, тогда как с повышением ранга угля степень растворения понижается, что оказывает значительное влияние на интенсивность окраски раствора. Поэтому интенсивность окраски раствора будет зависеть не только от количества пыли, но и от стадии метаморфизма каменного угля и примесей в пыли других органических соединений.

Следует обратить внимание, что все вышеизложенные методики применяются только к атмосферному воздуху. При этом для почв и водных объектов в настоящее время отсутствуют нормативные документы, позволяющие оценивать их загрязнение пылью каменного угля и взвешенными частицами PM10 и PM2,5.

1.2.1 Нормативные документы, регламентирующие расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух

В Российской Федерации существует ряд методик и методических указаний, позволяющих рассчитывать удельные и массовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Расчет выбросов загрязняющих веществ проводят с учетом различных факторов, характеризующих соответствующие технологические процессы.

В методиках [51-53] по расчету выбросов загрязняющих веществ на предприятиях по добыче углей используют коэффициенты, учитывающие вид добычи и характеристики оборудования (тип оборудования, мощность, время работы, производительность и т.д.).

Для предприятий, где производится перевалка сыпучих материалов (в том числе углей), существуют методические указания по расчету выбросов

загрязняющих веществ в атмосферу [54,55]. При расчете выбросов загрязняющих веществ учитывают различные параметры: тип оборудования (перегружаемого устройства), высота пересыпки, метеорологические условия (скорость ветра), степень защищенности от внешних воздействий, влажность и крупность материала, а также его дисперсность. Для разных материалов предлагается учитывать массовую долю пылевой фракции (частицы с размерами менее 200 мкм) и долю частиц (в пылевой фракции), переходящих в аэрозоль (частицы крупностью менее 10 мкм - аэрозольная пыль). При этом, вводимые в расчет коэффициенты дисперсности материала (K_1 – доля частиц с размерами менее 200 мкм и K_2 – доля аэрозольной пыли в пылевой фракции) для всех углей фиксированы и составляют 0,03 и 0,02 соответственно. Такой подход не позволяет ранжировать угли и угольную продукцию по их способности к выделению пыли т.к. способность углей к пылеобразованию зависит от множества факторов: стадии метаморфизма [26,27], содержания влаги, петрографического состава [18], механических свойств [16] углей и т.д.

Использование при расчете выбросов фиксированных коэффициентов, отражающих угли как источники загрязняющих атмосферный воздух веществ, связано, прежде всего, с отсутствием надежных методов количественной оценки содержания в углях взвешенной пыли, в том числе частиц PM10, PM2,5.

1.2.2 Определение содержания взвешенной пыли в угле

В отечественной и зарубежной литературе опубликовано несколько работ, посвященных определению содержания в углях взвешенной пыли.

В зарубежной литературе регламентирован стандарт ISO 20905, в котором приведено описание теста Rio Tinto Dust Tumbler [56]. Этот тест позволяет измерять количество выделяющейся из угля пыли в зависимости от влажности воздуха. Тест Rio Tinto Dust Tumbler основан на улавливании угольной пыли, которая попадает в воздух во время перемешивания угля во вращающемся барабане при контролируемой температуре и влажности

воздуха. Угольную пыль с частицами до 150 мкм собирают в предварительно взвешенный фильтр-мешок. Метод применяют для оценки эффективности методов пылеподавления, а также для определения требований к влажности продукции при погрузочно-разгрузочных работах. Однако конструкционные особенности барабана и соотношение его объема и массы испытуемого угля не позволяют количественно выделить тонкодисперсную пыль с размерами частиц менее 50 мкм для ее дальнейшего изучения.

В работе отечественных ученых [57] представлена лабораторная установка по определению содержания общей аэрозольной и тонкодисперсной пыли в углях. Лабораторная установка состоит из вращающегося барабана с подсоединенной к нему силиконовой трубкой и аспиратора ПУ-3Э. В барабан помещают пробу угля и вращают его с постоянной скоростью (30 оборотов /мин) в течение 1 минуты, тем самым моделируя процесс перевалки. Одновременно включают аспиратор и прокачивают через барабан воздух в течение 1 минуты. Выделяющуюся взвешенную пыль собирали на фильтрах, закрепленных с помощью фильтродержателей на выходе из барабана. После проведения испытаний определяли массу осевшей на фильтрах пыли. Такой метод позволяет оценить общее количество выделившийся пыли, а также содержание частиц менее и более 10 мкм в условиях имитации перевалки. Однако, этот метод не позволяет обеспечить представительность пробы ввиду малой навески угля (10 граммов) и не дает возможности сконцентрировать необходимые объемы угольной пыли для проведения дальнейших исследований (определение гранулометрического состава и определение содержания макро-микроэлементов).

Кроме идентификации загрязняющих веществ и определения их концентрации в атмосферном воздухе важной задачей при исследовании угольной пыли является определение размера частиц (распределение частиц по размерам). Этот параметр напрямую влияет на скорость оседания частиц, их биологическую проницаемость и здоровье человека [58]. Также

информация о гранулометрическом составе угольной пыли может быть использована при расчете выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух [54].

Информация о гранулометрическом составе угольной пыли необходима для оценки ее негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Наибольший интерес представляют частицы с размером менее 10 мкм, т.к. частицы такого размера способны, длительное время находиться во взвешенном состоянии в атмосферном воздухе, перемещаться на достаточно большие расстояния, загрязнять растительность, почву и водные объекты [59,60].

Существуют различные методы определения гранулометрического состава тонкодисперсных материалов: ситовый, седиментационный, оптический и метод лазерной дифракции.

Суть ситового метода определения гранулометрического состава угольной пыли заключается в рассеивании материала на ситах с разным размером ячеек и определении выхода классов разной крупности в соответствии с ГОСТ 2093-82 [61]. Недостаток этого метода состоит в том, что минимальный размер ячеек сит по ГОСТ 2093 составляет 63 мкм. Это ограничивает определение гранулометрического состава более мелких классов.

С помощью седиментационного метода определяют относительное содержание частиц различных размеров по скорости их оседания в жидкости [62]. Этот метод отличается высокой точностью, однако характеризуется достаточно длительным временем анализа.

Метод оптической микроскопии позволяет определять форму и размеры частиц, а также их количественное содержание [63]. Однако метод оптической микроскопии является достаточно субъективным за счет неравномерного распределения частиц в аналитической пробе, что снижает точность результатов измерений.

Метод лазерной дифракции на сегодняшний день является самым востребованным при анализе тонкодисперсных материалов [64,65]. Этот метод позволяет оценить размеры частиц в широком диапазоне их значений и имеет высокую точность. Также немаловажным является автоматизация всех операций и экспрессность анализа.

В настоящее время уже существуют локальные методики по определению гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции [4,64], однако на сегодняшний момент не существует надежного методического обеспечения, которое регламентирует не только методику проведения измерений, но и способы отбора и подготовки проб угольной пыли разного происхождения, а также метрологические характеристики измерений.

1.3 Угольная пыль как потенциальный источник загрязнения окружающей среды макро- и микроэлементами

Помимо того, что угольная пыль сама по себе является загрязнителем окружающей среды и негативно влияет на здоровье человека, она может являться носителем различных минеральных компонентов. Минеральные компоненты находятся в угле как в виде прослоев и сростков разного размера, так и в органоминеральных формах (соединениях), которые крайне неравномерно распределены в угольной матрице [66]. Так, в многочисленных исследованиях [67,68] установлено, что в состав угольной пыли также входит ряд макро- и микроэлементов, которые являются потенциально опасными для здоровья человека, а также оказывают негативное воздействия на объекты окружающей среды [69-73].

В работах ученых [74,75] отмечены наиболее распространенные элементы в угольной пыли, такие как Al, Cr, Fe, K, Mg, Ni, Si, Ti, As, Be, Cd, Co, Cu, Hg, Li, Mn, Mo, Pb, Se, U, Th, V и Zn, среди которых авторы выделяют основные потенциально опасные элементы для здоровья человека: As, Hg, Cd, Pb и т.д.

В работе R.E. Masto и др. [76] были проведены исследования по определению элементного состава проб почвы, отобранных вблизи участков горных работ и проб угольной пыли. По результатам исследований выявлено, что пробы почвы обогащены кадмием (Cd). При этом содержание свинца (Sb) и меди (Cu) в угольной пыли превышало содержание этих элементов в пробах почвы, а среднее содержание мышьяка (As) было сопоставимо между пробами почвы и пробами угольной пыли. Содержание хрома (Cr) в почве примерно в 2 раза превышало его содержание в пыли. Было показано, что пробы пыли и почв не загрязнены ванадием (V). Среди всех анализируемых элементов отмечено высокое содержание цинка (Zn) как в пробах почвы, так и в пробах пыли.

В [77] авторы изучали элементный состав углей и проб почвы, отобранных вблизи угольных шахт. В работе показано, что концентрация потенциально опасных элементов в пробах угля ниже кларковых значений, за исключением Cr (хрома) и Ni (никеля). В пробах почвы, отобранных вблизи угольных шахт, были обнаружены хром (Cr), никель (Ni) и ртуть (Hg) в концентрациях выше предельных значений, регламентируемых для почв.

Alcindo Neckel и другие [78] проводили исследования по определению содержания потенциально опасных элементов в морских взвешенных отложениях в районе Карибского порта, где происходит перевалка углей. В пробах, отобранных в местах приближенных к порту, были обнаружены высокие концентрации Al, Fe, Si, K, Mg.

В вышеприведенных работах, авторы определяли содержание макро- и микроэлементов либо в угольной пыли, либо в пробах углей и почв, однако в работах отсутствует информация о перераспределении макро- и микроэлементов (в том числе, потенциально опасных) между углем и угольной пылью, что в конечном итоге, не позволяет проводить обоснованные оценки источников загрязнения почв и других объектов окружающей среды на территориях, прилегающих к предприятиям по добыче и перевалке углей. Также отсутствуют работы, в которых были бы

выявлены взаимосвязи содержания тех или иных элементов в углях и выделяющиеся из них пыли. Это в свою очередь не позволяет прогнозировать концентрирование ПОЭ в угольной пыли как в источнике загрязнения почв и водных объектов.

Для понимания закономерностей распределения и накопления макро- и микроэлементов в углях, в том числе для прогноза возможного экологического ущерба окружающей среде, следует учитывать формы нахождения в углях элементов. Изучение форм нахождения макро- и микроэлементов в углях на сегодняшний день остается достаточно сложной задачей.

Определение термина «формы нахождения элементов» было дано еще в 1921 г. В.И. Вернадским, он же выделил четыре различные формы нахождения химических элементов в земной коре [79]. Академик Л.В. Таусон, продолжая исследования В. И. Вернадского, предложил в общей массе минерального вещества горных пород различать минералы-концентраторы и минералы-носители того или иного элемента. В работе Покровского М.П. предложено определение «форма нахождения элемента – это характер вхождения химического элемента в систему» [80].

Изучением форм нахождения макро- и микроэлементов в углях занимались такие отечественные ученые как Кетрис М.П., Юдович Я.Э. Шпирт М.Я. и др. Известно, что формы нахождения макро- и микроэлементов в углях зависят от источников их накопления, величины концентрации и стадии метаморфизма органического вещества [81].

Для определения форм нахождения элементов в углях существуют различные методы, например, такие как сканирующая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, селективное выщелачивание различными реагентами, фракционный анализ, и др.

М.Я. Шпиртом был успешно применен метод фракционного анализа для изучения форм нахождения редких и редкоземельных элементов в угле. Суть метода заключается в последовательном разделении пробы угля в

тяжелых жидкостях для определения фракционного состава [82] и содержания элементов в отдельных фракциях.

По данным, полученным Шпиртом М.Я., в большинстве случаев концентраторами ртути и фтора являются высокоминерализованные (тяжелые) фракции углей (с плотностью $>1600 \text{ кг/м}^3$); также Шпирт М.Я. отметил, что в некоторых случаях, фракции с преобладающим содержанием органических веществ могут быть концентраторами ртути [66]. В [66] показано, что в углях соединения ртути ассоциируются со сфалеритом и с минералами глин. Концентратором фтора в угле, как правило, является минеральное вещество. Во фракциях с плотностью $>1600 \text{ кг/м}^3$ или 1700 кг/м^3 его концентрация изменяется от 2 до 4 раз по сравнению с углем, однако извлечение в эти фракции, как правило, меньше 50% [66].

Юдович Я.Э. и Кетрис М.П. в своей обзорной работе [83] изучали формы нахождения фтора в углях и показали, что фтор присутствует в углях в фосфатной (апатиты), силикатной (слюды), флюоритовой (флюорит) и органической формах. Отмечено, что хорошая корреляция фтора с зольностью может свидетельствовать о присутствии фтора в глинистом веществе. Авторы отметили, что органическая форма фтора связана не с самим угольным органическим веществом, а с золообразующими элементами сорбционной золы. Юдович Я.Э. и Кетрис М.П. предположили, что образование фтороносных углей в основном связано с факторами угленакопления и диагенеза [83].

По данным [84] показано, что концентратором ртути в углях являются, как правило, сульфиды, преимущественно пирит. В работе [85] авторы отмечают разнообразный характер распределения ртути в зависимости от плотности фракций для различных углей. Во многих углях носителем ртути могут быть легкие фракции (извлечение во фракцию более 50%), в которые одновременно переходит основное количество органического вещества исходных углей. Шпирт М.Я. объяснил этот факт тем, что концентратор

ртути (сульфиды железа) в исходном угле представлен высокодисперсными частицами размером менее 50-70 мкм [66].

Calkins W.H. еще в 1994 г. в своей работе [86] показал, что сера в угле может находиться как в неорганической так и в органической формах. Неорганическими формами обычно являются сульфиды и сульфаты, при этом пирит является основным носителем неорганической серы в большинстве углей. Органические структуры серы в углях в основном являются компонентами макромолекулярных структур угля и трудно отделяются, и анализируются без разрушения макромолекулярной структуры [86].

Удалов И.В. [87] изучал формы нахождения микроэлементов в каменных углях и антрацитах Северо-Восточного Донбасса вблизи ртутно-рудных тел. По полученным им данным было установлено, что в наиболее тяжелых фракциях угля (плотность 1750 – 1800 и более 1800 кг/м³) коэффициент сродства Hg с органическим веществом очень низкий, что позволяет отнести ее к минеральной части угля. [87].

В работе Dai Sh., Hower J.C., Finkelman R.B. и др. [88] было показано, что такие элементы как Ca, Mg, Fe, Al и Ti встречаются в углях в виде неминеральных форм. Отмечено, что концентрация органической серы сильно варьируется, от ~ 0,1% до ~ 12%. Авторы утверждают, что различия типов органических соединений серы в угле связано с рангом угля. Органически связанная ртуть обычно встречается в углях с низким содержанием серы в различных пропорциях - от нескольких, до десятков процентов. По полученным авторами данным мышьяк и ртуть могут присутствовать в угле в виде органических ассоциаций [88].

Многочисленные исследования Арбузова С.И. направлены на изучение форм нахождения редкоземельных элементов в углях и торфах. В работе [89] показано, что в углях разных марок и разной зольности (от 10 до 93%) торий содержится во фракции плотностью < 1600 кг/м³. Данные, полученные с помощью электронной микроскопии, позволили авторам сделать вывод, что

основной минеральной формой нахождения тория в зрелых каменных углях являются редкоземельные фосфаты. Арбузов С.И., Ильенок С.С. и др. установили, что изменение соотношения форм нахождения урана происходит в процессе углефикации в связи с изменением структуры органического вещества [90]. В работе [91] ученые показали, что при повышении стадии метаморфизма возрастает роль новообразованных минералов в накоплении. В процессе углефикации в направлении «торф–бурый уголь–каменный уголь–антрацит» одновременно с преобразованием органического вещества происходит изменение форм нахождения La, Ce, Sm, Eu, Yb, и Lu от преимущественно органических соединений до преимущественно минеральных. Среди минеральных форм редкоземельных элементов в углях преобладают разнообразные фосфаты (монацит, крандаллит, ксенотим, гойяцит, флюоренсит), встречаются карбонаты (бастнезит, паризит, синхизит) и минеральные фазы сложного состава [91].

Таким образом, анализируя все вышеизложенное, показано, что информация о формах нахождения элементов в угле может быть полезным инструментом для прогноза концентрирования потенциально опасных элементов в угле и угольной пыли.

Выводы:

1. Показано, что вопросы, связанные с оценкой негативного воздействия на окружающую среду таких загрязняющих веществ как пыль каменного угля, взвешенных частиц, взвешенных частиц с размером менее 2,5 мкм (PM_{2,5}) и менее 10 мкм (PM₁₀) являются серьезной актуальной проблемой в горной отрасли.

2. По актуальным отечественным и зарубежным источникам установлено, что склонность углей к образованию пыли (в том числе аэрозольной с размерами частиц менее 10 мкм) определяется в первую очередь механическими свойствами угольного вещества и степенью его неоднородности.

3. Отмечено, что методики и руководящие документы для определения содержания угольной пыли применяются только к атмосферному воздуху. При этом для почв и водных объектов в настоящее время отсутствуют нормативные документы, позволяющие оценивать их загрязнение пылью каменного угля и взвешенными частицами PM_{2,5} и PM₁₀.

4. В Российской Федерации регламентирован ряд различных отраслевых методик и методических рекомендаций, позволяющих рассчитывать удельные и массовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Однако, только в методических указаниях по перевалке сыпучих материалов (в том числе углей) при расчете выбросов учитываются коэффициенты, отражающие дисперсность материала. Эти коэффициенты для всех углей фиксированы, что не позволяет ранжировать угли и угольную продукцию по их способности к выделению пыли. Использование при расчете выбросов фиксированных коэффициентов, связано, прежде всего, с отсутствием надежных методов количественной оценки содержания в углях взвешенной пыли, в том числе частиц PM₁₀, PM_{2,5}.

5. Проведен анализ отечественных и зарубежных исследований по определению химического состава угольной пыли. Приведены наиболее распространенные макро- и микроэлементы в угольной пыли (в том числе потенциально опасные).

6. Установлено, что в литературе практически отсутствует информация о перераспределении макро- и микроэлементов (в том числе, потенциально опасных) между углем и угольной пылью, что в итоге, не позволяет проводить обоснованные оценки источников загрязнения почв и других объектов окружающей среды на территориях, прилегающих к предприятиям по добыче и перевалке углей.

7. Отмечено, что для почв и водных объектов в настоящее время отсутствуют маркерные вещества, относительно которых можно было бы судить о том, что причиной загрязнения этих объектов является именно

угольная пыль. В значительной степени это связано с отсутствием информации о содержании в углях взвешенной угольной пыли и ее составе, особенно о содержании и формах нахождения в ней потенциально опасных макро и микроэлементов (ПОЭ), нормированные концентрации которых (ПДК) в почвах и водах установлены в СанПиН 1.2.3685-21.

8. Показана возможность оценки форм нахождения элементов в угле методом фракционного анализа.

С учетом вышеизложенного разработка методических решений для контроля содержания и состава угольной пыли при добыче и переработке углей является актуальной.

На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи исследования для достижения цели работы:

1. Разработка метода оценки и контроля содержания и гранулометрического состава пыли, образующейся в процессах добычи и переработки углей;

2. Экспериментальные исследования влияния стадии метаморфизма, петрографического состава и окисленности рядовых углей на содержание в них взвешенной пыли, в том числе с размерами частиц менее 10 мкм;

3. Проведение экспериментальных работ по определению содержания макро- и микроэлементов в рядовых углях и выделенной из них взвешенной пыли;

4. Разработка метода определения форм нахождения потенциально опасных элементов в углях для прогноза их концентрирования в пыли;

5. Разработка рекомендаций по применению полученных результатов для оценки загрязнения окружающей среды при добыче и переработке углей.

Глава 2 Объекты и методы исследований

2.1 Объекты исследований

В качестве объектов исследования были выбраны рядовые угли Кузнецкого, Буреинского и Горловского угольных бассейнов Российской Федерации. Отбор проб проводили в соответствии с ГОСТ Р 59248-2020 [92]. Помимо этого, были отобраны пластовые пробы углей №№15,16 Буреинского угольного бассейна в соответствии с ГОСТ Р 59252 [93] для проведение фракционного анализа. Пробы углей средней стадии метаморфизма Кузнецкого бассейна №№3,6 и 8 были отобраны от сближенных пластов вне зоны окисления (№3 и 8) и в зоне окисления (№6). Пробы углей высокой стадии метаморфизма №№10 и 14 отобраны из одного пласта с участков вне зоны окисления (№10) и в зоне окисления (№14). В коллекции присутствуют антрациты №№15,16, отобранные из одного месторождения, но с разных его участков. Антрациты имеют близкий петрографический состав и одинаковую стадию метаморфизма. Перечень и наименование проб углей приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень и наименование проб

№ пробы	Наименование пробы
1	Каменный уголь (марка КС) Кузнецкий угольный бассейн
2	Каменный уголь (марка Т) Кузнецкий угольный бассейн
3	Каменный уголь (марка ДГ) Кузнецкий угольный бассейн
4	Каменный уголь (марка СС) Кузнецкий угольный бассейн
5	Каменный уголь (марка КО) Кузнецкий угольный бассейн
6	Каменный уголь (марка ДГ, окисленный) Кузнецкий угольный бассейн
7	Каменный уголь (марка КСН) Кузнецкий угольный бассейн
8	Каменный уголь (марка Д) Кузнецкий угольный бассейн
9	Каменный уголь (марка СС) Кузнецкий угольный бассейн
10	Каменный уголь (марка Т) Кузнецкий угольный бассейн
11	Антрацит (марка А) Горловский угольный бассейн
12	Антрацит (марка А) Горловский угольный бассейн
13	Каменный уголь (марка ГЖО) Кузнецкий угольный бассейн
14	Каменный уголь (марка Т, окисленный) Кузнецкий угольный бассейн
15	Каменный уголь (марка ГЖО) Буреинский угольный бассейн
16	Каменный уголь (марка ГЖО) Буреинский угольный бассейн

Показатели технического анализа проб углей приведены в таблице 2, а их петрографический состав и показатели, характеризующие окисленность, приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 2 – Показатели технического анализа углей

№ пробы	A^d , %	V^{daf} , %	S_t^d , %
1	14,2	24,2	0,19
2	22,2	15,1	0,21
3	13,9	39,4	0,35
4	5,4	20,4	0,12
5	12,7	25,3	0,29
6	20,2	37,2	0,37
7	19,8	24,9	0,15
8	11,1	37,3	0,21
9	20,7	24,8	0,18
10	13,8	15,4	0,31
11	7,5	2,2	0,14
12	10,7	3,9	0,31
13	30,9	35,1	0,56
14	19,2	23,8	0,26
15	40,2	38,1	0,26
16	38,3	38,2	0,28

Примечание: A^d – зольность на сухое состояние топлива; V^{daf} – выход летучих веществ на сухое беззольное состояние топлива; S_t^d – содержание общей серы на сухое состояние топлива.

Выбранные для исследования угли характеризуются широким диапазоном зольности (от 5,4 до 40,2%). Минимальный выход летучих веществ зафиксирован для антрацитов (№№11 и 12), а максимальный – для угля №3 (39,4%). Повышенное содержание серы характерно только для пробы каменного угля №13 (0,56%).

Таблица 3 – Петрографический состав углей

№ пробы	Петрографический состав, % об.				$R_{o,r}$, %
	Vt	Sv	I	L	
1	37	11	52	0	1,11
2	53	12	35	0	1,89
3	57	4	35	4	0,56

Продолжение таблицы 3

4	28	8	63	1	1,15
5	55	8	35	2	1,09
6	71	4	22	3	0,60
7	37	12	51	0	1,05
8	64	4	28	4	0,61
9	30	11	58	1	1,00
10	65	4	31	0	1,70
11	67	1	32	0	4,14
12	67	0	33	0	4,25
13	68	7	23	2	0,85
14	74	1	25	0	1,63
15	87	2	9	2	0,71
16	87	2	8	3	0,72

Примечание: Vt – объемная доля мацералов группы витринита; Sv – объемная доля мацералов группы семивитринита; I – объемная доля мацералов группы инертинита; L – объемная доля мацералов группы липтинита; $R_{o,r}$ – произвольный показатель отражения витринита.

В коллекции углей представлены угли разной стадии метаморфизма: показатель отражения витринита изменяется от 0,56 до 1,70% для каменных углей, а для проб антрацитов Горловского угольного бассейна составляет 4,14 и 4,25% соответственно. Каменные угли различаются по петрографическому составу. Так, максимальное содержание инертинита отмечено для углей №4 (63%) и №9 (58%). Петрографический состав остальных каменных углей можно охарактеризовать преимущественным содержанием витринита (более 50%). Угли №№3,6,8 и 16, имеют в своем составе сравнительно высокое содержание липтинита (3–4%).

В коллекции присутствуют угли, приуроченные по данным геологической разведки к зоне окисленности – это пробы углей №6, №14;

ранее проведенные исследования [94] показали частичную окисленность углей №3 и №8 (таблица 4).

Таблица 4 – Показатели окисленности углей [94]

№ пробы	Окисленность		Цвет спирто-щелочного экстракта
	ОКп, %	$(K^r)^d$, мг-экв/г	
1	37	0,20	светло-желтый
2	46	0,23	бесцветный, прозрачный
3	27	2,17	темно-чайный, коричневый
4	25	0,25	светло-желтый
5	69	0,17	светло-желтый
6	45	2,28	темно-чайный, коричневый
7	41	0,21	светло-желтый
8	27	2,24	темно-чайный, коричневый
9	49	0,27	светло-желтый
10	11	0,11	бесцветный
11	-	0,15	бесцветный, прозрачный
12	-	0,22	бесцветный, прозрачный
13	-	0,28	желтый
14	71	1,15	желтый
15	-	-	-
16	-	-	-

Примечание: ОКп – окисленность пробы угля; $(K^r)^d$ – содержание суммарных кислых групп на сухое состояние угля.

Исследования окисленности углей разными методами (таблица 4) показали, что пробы углей №№3 и 8, отобранные от участков, не приуроченных к зонам окисления, тем не менее, имеют характерные дефекты: трещины, каверны и т.п., определяющие значение показателя ОКп (рисунки 2-5) и достаточно высокие показатели содержания суммарных кислых групп $(K^r)^d$. Отмечено, что цвет спирто-щелочных экстрактов из проб углей №№3 и 8 имеет характерную желто-коричневую окраску, что

указывает на наличие в них гуматов. Это дает основание считать, что пробы углей №№3 и 8 частично окислены, но в меньшей степени чем проба угля №6 [94].

Проба угля №14 характеризуется значениями показателей ОКп и $(K^I)^d$ на уровне предела их определения, а соответствующие показатели для пробы угля №10 указывают на его высокую окисленность [94].

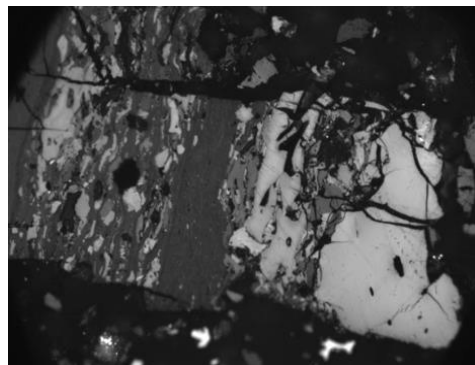
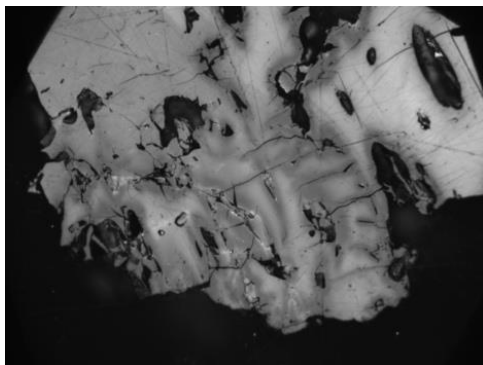


Рисунок 2 – Микрофотографии поверхности пробы угля №3 [94]

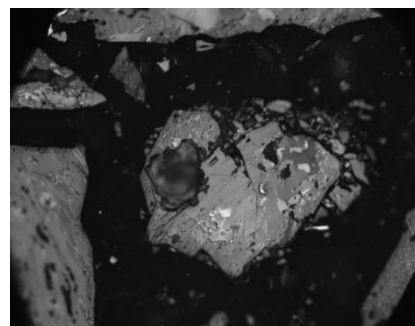
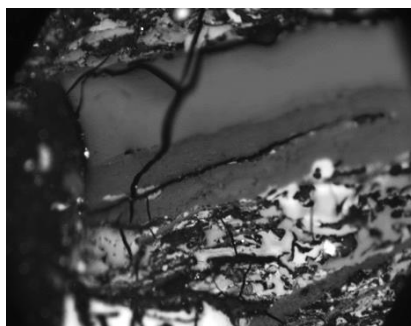
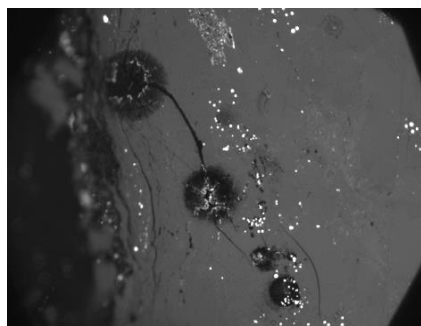


Рисунок 3 – Микрофотографии поверхности пробы угля №6 [94]

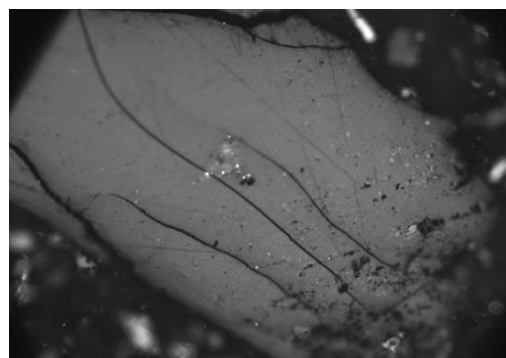


Рисунок 4 – Микрофотографии поверхности пробы угля №8 [94]

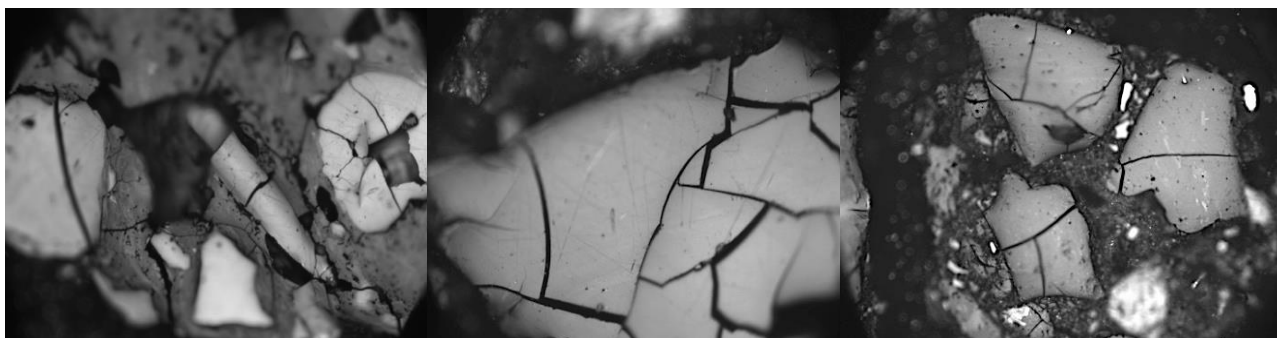


Рисунок 5 – Микрофотографии поверхности пробы угля №14 [94]

2.2. Методы исследований

Для проведения исследований использовали пробы углей различной крупности: для технического анализа – менее 0,2 мм; для петрографического анализа – менее 1,6 мм; для выделения взвешенной пыли – остаток после сита 3 мм, полученный при промышленном рассеве рядового угля по ГОСТ 2093.

Для всех исследуемых проб углей проводили следующие анализы с использованием стандартных методов, регламентированных соответствующими национальными и межгосударственными стандартами:

- массовую долю влаги в аналитической пробе W^a , % – ГОСТ 33503-2015 «Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе»;

- зольность A^d , % – ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности»;

- выход летучих веществ V^{daf} , % – ГОСТ Р 55660-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ»;

- содержание общей серы на сухое состояние топлива S_t^d , % – ГОСТ 32465-2013 (ISO 19579:2006) «Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии». Испытание проводили с использованием анализатора серы LECO SC-144DR на воздушно-сухой навеске пробы аналитической крупности;

- петрографический состав углей - содержание групп мацералов витринита (*Vt*), семивитринита (*Sv*), инертинита (*I*) и липтинита (*L*) в % на чистый уголь – ГОСТ Р 55662-2013 «Методы петрографического анализа углей. Часть 3. Метод определения мацерального состава»; произвольный показатель отражения витринита $R_{o,r},\%$ по ГОСТ Р 55659-2013 «Методы петрографического анализа углей. Часть 5. Метод определения показателя отражения витринита с помощью микроскопа» при помощи комплекса для петрографического и рефлектометрического анализа углей Lucia Vitrinite на базе оптического поляризационного микроскопа отраженного света Olympus BX51.

Окисленность углей определяли двумя методами:

- окисленность пробы угля (ОКп), % определяли петрографическим методом на аншлиф-брикетах угольных проб – ГОСТ 8930-2015 «Угли каменные. Метод определения окисленности»;

- окисленность углей по суммарному содержанию в них фенольных и карбоксильных групп на сухое состояние топлива (K^r)^d, мг-экв/г, определяли по ГОСТ Р 59012-2020 «Угли каменные. Определение окисленности методом потенциометрического титрования». Метод позволяет определять суммарное содержание кислых групп в каменных и бурых углях во всем диапазоне значений в мг-экв на один грамм угля (мг-экв/г), рассчитанное на сухое беззольное состояние (daf).

Содержание фтора на сухое состояние топлива F^d , г/т – ГОСТ Р 59014-2020 «Угли бурые каменные и антрацит. Определение содержания фтора». Стандарт устанавливает метод определения содержания общего фтора в углях бурых, каменных и антраците (далее - топливо) в диапазоне содержания фтора в топливе от 10 до 1000 г/т (ppm) при зольности топлива не более 30%. В пробах, зольность которых составляла более 30% содержание фтора определяли в растворе, полученном после сплавления пробы с гидроксидом калия, потенциометрическим методом с фтор-селективным электродом.

Содержание ртути на сухое состояние топлива – Hg^d , г/т по ГОСТ Р 59176-2020 «Топливо твердое минеральное. Определение содержания ртути на основе прямого сжигания» с использованием автоматического анализатора Анализатор ртути «РА-915М» с приставкой «УРП» группы компаний «Люмэкс».

Содержание остальных элементов (Al, As, B, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Sr, Ti, V, Zn) на сухое состояние топлива определяли в соответствии с ГОСТ Р 54237-2022 «Топливо твердое минеральное. Определение химического состава золы методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой» на атомно-эмиссионном спектрометре iCAP 7200 Duo. Пробы углей предварительно озоляли при температуре 500°C для получения не менее 4 г золы, затем представительную пробу золы массой 0,2 г растворяли в смеси минеральных кислот.

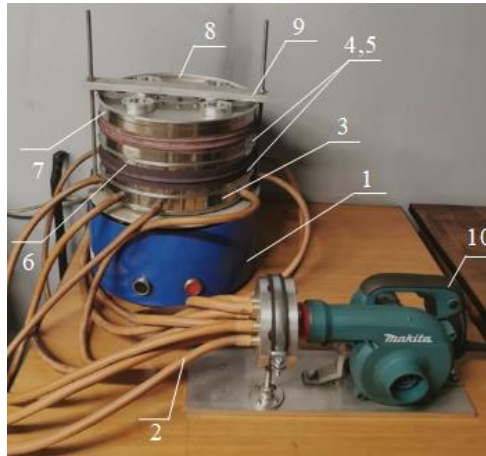
Пересчет на различные состояния топлива проводили по ГОСТ 27313 2015 «Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа на различные состояния топлива».

2.2.1 Разработка метода оценки и контроля содержания и гранулометрического состава пыли в рядовых углях

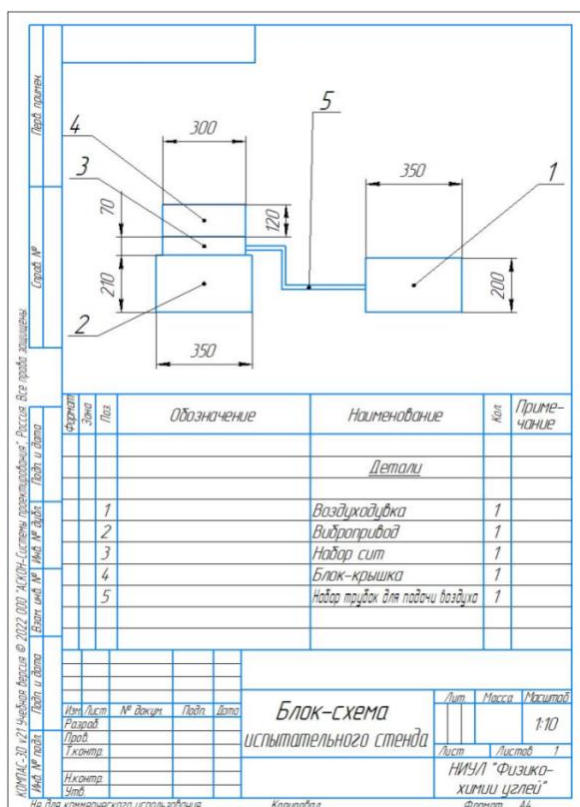
2.2.1.1 Определение содержания взвешенной пыли

Для определения количественного содержания взвешенной пыли в рядовых углях и товарной продукции разработан специализированный испытательный стенд, который имитирует процесс перевалки и позволяет улавливать и концентрировать угольную пыль, содержащуюся в рядовых углях и товарной продукции и способную находиться во взвешенном состоянии. Конструкция стенда позволяет отбирать представительные объемы взвешенной пыли для определения ее гранулометрического состава и содержания в ней макро- и микроэлементов [95]. По результатам экспериментальных исследований определены условия выделения взвешенной пыли на испытательном стенде: соотношение массы угля к

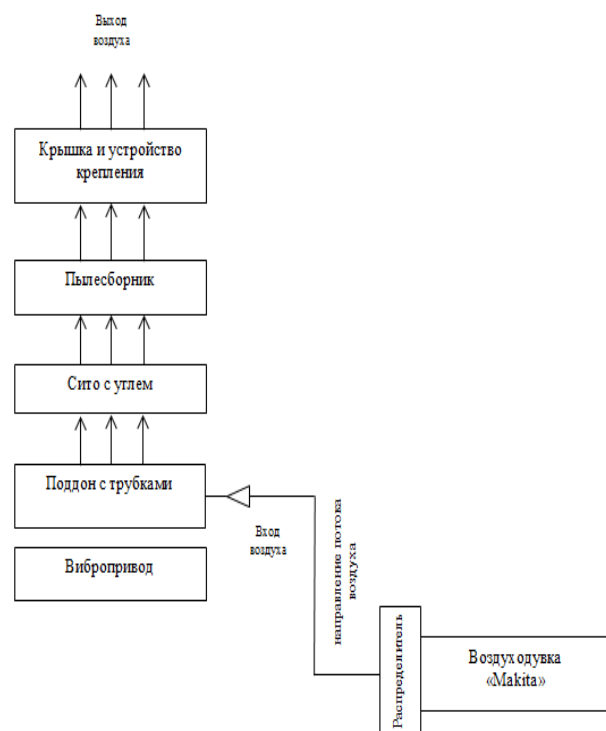
Внешний вид испытательного стенда показан на рисунке 6. Блок-схема стенда и схема движения воздуха (рисунок 7).



38



а)



б)

Рисунок 7 – Блок-схема испытательного стенда а),
схема движения воздуха б) [95]

Стенд реализован на основе вибропривода и воздуходувки с регулируемой скоростью подачи воздуха.

Испытательный стенд (рисунок 6) состоит из следующих основных частей: вибропривода (1), поддона с трубками (2-3), сита (6), вставки (4-5), пылесборника (7), крышки (8), устройства крепления (9) и воздуходувки (10). Устройство крепления состоит из траверсы с двумя прижимами, двух шпилек, двух контргаек и двух гаек. В крышке имеются 4 технологических отверстия с сетками, предназначенные для свободного выхода воздуха. В отверстиях установлены фильтры АФА-ВП для предотвращения потерь угольной пыли. Поддон, сито, вставки и пылесборник фиксируются на плите вибропривода и закрепляются при помощи устройства крепления. Сито представляет собой круглую сварную обечайку из нержавеющей стали с установленным в ней просеивающим элементом. В качестве просеивающего элемента используется металлическая сетка с размером ячеек 0,2 мм [95].

В качестве анализируемой пробы для испытания на стенде был использован остаток угля после сита 3 мм, полученный при промышленном ситовом анализе рядовых углей по ГОСТ 2093. При этом предполагалось, что вся взвешенная пыль находится в подрешеточном классе 0-3 мм. Для дальнейших расчетов для каждой пробы был предоставлен Акт результатов ситового анализа, с указанием выхода класса 0-3 мм при расसेве. Дополнительно в анализируемой пробе определяли содержание пылевой фракции – частиц с размерами менее 200 мкм по ГОСТ 2093. Полученные результаты использовали для дальнейших расчетов содержания пыли в рядовых углях.

Анализируемую пробу предварительно кондиционируют, а после достижения ею воздушно-сухого состояния отбирают представительную часть пробы для испытания на стенде.

Пробу угля помещают на сито испытательного стенда, после чего сито (6), вставки (4-5) и пылесборник (7) фиксируют на плите вибропривода (1) при помощи устройства крепления (9). Воздуходувку (10) включают на минимальную скорость $\approx 4,3$ м/с, и запускают вибропривод (1). Вибрации обеспечивают движение частиц по просеивающей поверхности - от центра к периферии. Частицы надрешетного продукта остаются на сите (6), остальные - просыпаются через сито в поддон (3). Поток воздуха, идущий через 9 трубок (2) от воздуходувки (10) к поддону (3), поднимает образовавшуюся угольную пыль, которая оседает в пылесборнике (7). Схема движения воздуха изображена на рисунке 7. После проведения испытания, выделенную и уловленную пыль удаляют из пылесборника (7), взвешивают и определяют m_1 (г) – масса взвешенной пыли [95].

Содержание взвешенной пыли (m_p , %) в анализируемой пробе, выделенной на испытательном стенде, рассчитывают по формуле (1):

$$m_p = (m_1/m) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_1 – масса взвешенной пыли, г, m – масса анализируемой пробы, загруженной для проведения испытаний на испытательном стенде, г.

Содержание взвешенной пыли в угле (γ_p , %) рассчитывают по формуле (2):

$$\gamma_p = (m_p \cdot \gamma) / 100, \quad (2)$$

где γ – выход класса крупности < 3 мм по результатам ситового анализа по ГОСТ 2093, %.

2.2.1.2 Определение гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции

Для оценки гранулометрического состава уловленной взвешенной пыли разработана и аттестована в установленном порядке методика (Приложение А). При разработке методики были определены условия измерений и проведена метрологическая оценка полученных результатов [96].

Методика измерений предназначена для определения гранулометрического состава проб угольной пыли методом лазерной дифракции при проведении экологического мониторинга и контроля технологических процессов.

Результаты измерений, полученные по методике измерений, могут быть использованы для решения научно-исследовательских и производственных задач в экологии, горном деле, обогащении и переработке полезных ископаемых.

Принцип метода лазерной дифракции

Измерения гранулометрического состава угольной пыли осуществляли с помощью прибора Analysette (FRITSCH, Германия). Лазерный анализатор состоит из двух блоков: измерительного и блока диспергирования. Измерительный блок лазерного анализатора размера частиц состоит из 2-х лазеров: коротковолнового (зеленого) с длиной волны $\lambda = 532$ нм, 7 мВт. и

длинноволнового (инфракрасного) с длиной волны $\lambda = 850$ нм, 9 мВт. Диапазон измерения размера частиц составляет 0,01 - 2100 мкм [96].

Блок диспергирования оснащен центробежным насосом до 5,5 л/мин с регулируемой производительностью и ультразвуковым излучателем с регулируемой мощностью до 100 Вт.

Мощность ультразвука и производительность центробежного насоса, возможно, изменять в зависимости от свойств анализируемого материала для предотвращения агрегации угольных частиц.

Принцип работы лазерного анализатора размера частиц для измерений гранулометрического состава приведен на рисунке 8.

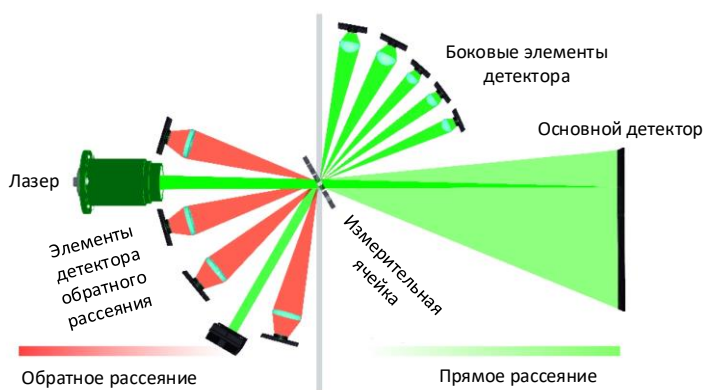


Рисунок 8 – Принцип работы лазерного анализатора размера частиц для измерения гранулометрического состава методом лазерной дифракции

Так как угольная пыль обладает гидрофобными свойствами для улучшения ее смачиваемости водой, применяли поверхностно-активное вещество (ПАВ). В качестве поверхностно-активного вещества использовали «Дусазин», так как он эффективно работает с тонкодисперсными гидрофобными материалами [97].

Для определения минимально необходимого количества пробы для проведения анализа учитывается важный параметр - степень затемнения суспензии. Этот параметр контролировали после добавления пробы в ванну диспергирования. Уровень затемнения суспензии составлял от 10 до 20 ед. для всех измерений.

Обработка результатов измерений проводили автоматически с использованием программного обеспечения MaScontrol. Данные представляются на экране компьютера в виде таблиц с указанием размеров частиц и соответствующих этим размерам объемных долей частиц, а также в виде интегральных кривых ($Q_3(x)$) и дифференциальных гистограмм ($dQ_3(x)$) распределения частиц по размерам (рисунок 9) [96].

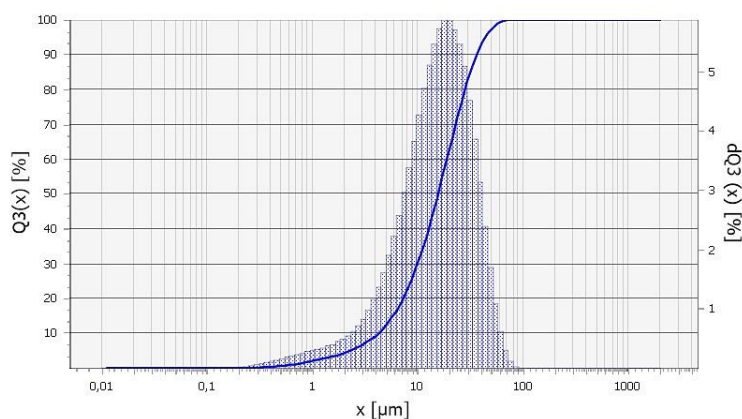


Рисунок 9 – Пример результатов измерений гранулометрического состава образца ($Q_3(x)$ – интегральные кривые и $dQ_3(x)$ – дифференциальные гистограммы) [96]

Определение режима измерений гранулометрического состава пыли

Для определения режима работы лазерного анализатора при измерениях гранулометрического состава угольной пыли была составлена программа исследований (таблица 5). В качестве параметров, определяющих условия измерений, были выбраны: мощность ультразвука (Вт), производительность насоса (л/мин), количество ПАВ (мкл) и время диспергирования (с) [96].

Таблица 5 – План проведения экспериментальных исследований по определению условий измерений гранулометрического состава угольной пыли [96]

№ опыта	Условия измерений			
	Мощность ультразвука, Вт	Производительность насоса, л/мин	Количество ПАВ, мкл	Время диспергирования, с
1	60	3,3	100	60
2	60	5,5	100	60
3	100	3,3	100	60
4	100	5,5	100	60
5	60	3,3	200	60
6	60	5,5	200	60
7	100	3,3	200	60
8	100	5,5	200	60
9	60	3,3	100	90
10	60	5,5	100	90
11	100	3,3	100	90
12	100	5,5	100	90
13	60	3,3	200	90
14	60	5,5	200	90
15	100	3,3	200	90
16	100	5,5	200	90

В процессе работы было проведено 16 измерений при разных условиях (таблица 6). Основным критерием при выборе условий измерений являлись содержание частиц с крупностью 0–10 мкм, средний размер частиц и его среднеквадратическое отклонение (СКО) [96]

Таблица 6 – Влияние условий измерений на характеристики гранулометрического состава угольной пыли [96]

№ опыта	Условия измерений				Содержание частиц с размером 0–10 мкм, %	Содержание частиц с размером 10–50 мкм, %	Содержание частиц с размером 50–100 мкм, %	Средний размер, мкм	СКО среднего размера, мкм
	Мощность ультразвука, Вт	Производительность (скорость) насоса, л/мин	Количество ПАВ, мкл	Время диспергирования, сек					
1	60	3,3	100	60	30,0	65,4	4,6	19,65	14,84
2	60	5,5	100	60	13,1	47,3	39,6	47,04	35,67
3	100	3,3	100	60	24,9	68,3	6,8	22,15	16,32
4	100	5,5	100	60	8,5	57,5	34,0	42,90	29,17
5	60	3,3	200	60	23,0	64,1	12,9	26,18	20,19
6	60	5,5	200	60	3,2	40,3	56,5	61,14	35,50
7	100	3,3	200	60	31,4	66,3	2,32	17,81	12,65
8	100	5,5	200	60	6,4	55,5	38,2	46,32	29,86
9	60	3,3	100	90	24,2	67,6	8,4	23,18	17,15
10	60	5,5	100	90	1,5	29,9	68,6	75,66	41,56
11	100	3,3	100	90	24,6	68,7	6,7	22,17	16,32
12	100	5,5	100	90	1,1	25,3	73,6	81,92	44,73
13	60	3,3	200	90	25,6	67,0	7,4	22,40	16,91
14	60	5,5	200	90	1,1	31,8	67,1	72,22	38,81
15	100	3,3	200	90	35,6	63,3	1,1	15,88	11,25
16	100	5,5	200	90	0,8	29,9	69,3	75,83	41,20

Анализ полученных результатов (таблица 6) позволил установить, что:

- повышение мощности ультразвука приводит к увеличению содержания мелких классов угольной пыли с одновременным снижением содержания частиц с размерами 50–100 мкм;
- повышение количество ПАВ положительно коррелирует с количественным содержанием тонкодисперсных частиц (с размерами 0–10 мкм);
- при увеличении производительности (скорости) насоса наблюдается агрегация угольных частиц, выражающаяся в росте содержания частиц крупных (50–100 мкм) классов.

Два режима измерений (Режим № 7 и Режим № 15) показали лучший результат по максимальному содержанию в пробе частиц с размером 0–10 мкм, минимальному значению среднего размера частиц и его СКО.

Для окончательного выбора режима испытаний по оценке гранулометрического состава угольной пыли указанные режимы были оценены с точки зрения предоставления статистически значимых результатов в зависимости от времени диспергирования. Таким образом, были выбраны режимы со следующими параметрами: Режим 1 – мощность ультразвука – 100 Вт, производительность центробежного насоса – 3,3 л/мин, количество ПАВ – 200 мкл, время диспергирования – 60 с; Режим 2 – мощность ультразвука – 100 Вт, производительность центробежного насоса – 3,3 л/мин, количество ПАВ – 200 мкл, время диспергирования – 90 с. [96]

Результаты измерений представлены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7 – Влияние времени диспергирования на гранулометрический состав угольной пыли [96]

№ опыта	Результаты измерений – содержание в пробе частиц (%) с размерами (мкм):		
	0–10	10–50	50–100
Режим 1. Время диспергирования – 60 с			
1	26,1	67,9	5,9
2	26,3	68,2	5,5
3	27,2	68,0	4,8
4	26,2	68,3	5,5
5	26,7	68,5	4,8
6	25,3	68,8	5,9
7	27,9	68,2	3,9
8	26,2	68,7	5,1
9	27,5	68,5	4,0
10	29,2	67,5	3,3
Режим 2. Время диспергирования – 90 с			
1	22,4	66,9	10,5
2	25,8	67,5	6,7
3	22,9	67,1	9,9
4	30,1	67,2	2,7
5	31,3	65,4	3,3
6	29,0	66,4	4,6
7	31,2	66,0	2,8
8	27,0	67,1	5,9
9	27,7	65,9	6,4
10	29,6	65,4	5,0

Таблица 8 – Статистические характеристики измерений [96]

Показатель	Содержание частиц с размером 0–10 мкм, %	Содержание частиц с размером 10–50 мкм, %	Содержание частиц с размером 50–100 мкм, %
Режим 1. Время диспергирования – 60 с			
Среднее значение	26,86	68,26	4,87
СКО	1,12	0,39	0,89
Доверительный интервал среднего значения	0,69	0,24	0,55
Режим 2. Время диспергирования – 90 с			
Среднее значение	27,70	66,49	5,78
СКО	3,19	0,78	2,73
Доверительный интервал среднего значения	1,98	0,48	1,69

На основании полученных данных (таблица 7 и 8), был выбран режим измерений (Режим 1) со следующими параметрами: мощность ультразвука – 100 Вт; производительность (скорость) насоса – 3,3 л/мин; количество ПАВ–200 мкл; время диспергирования – 60 с, т. к. данный режим характеризуется наименьшим доверительным интервалом среднего значения и наименьшим разбросом полученных величин [96].

В связи с введением гигиенических норм относительно концентрации взвешенных частиц PM_{2,5} и PM₁₀ в атмосферном воздухе состав тонкодисперсной угольной пыли с размерами частиц в диапазоне от 0 до 10 мкм представляет наибольший интерес. Для дальнейшего исследования были выбраны три диапазона размера частиц (таблица 9) и проанализированы статистические параметры полученных результатов измерений (таблица 10). Измерения проводили в условиях Режимы 1 [96].

Таблица 9 – Содержание частиц угольной пыли класса 0–10 мкм [96]

Диапазон, мкм	Распределение по размерам, %									
	№ опыта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,0–2,5	4,10	4,10	3,90	4,20	3,80	3,90	3,70	3,80	3,80	3,80
	4,10	4,00	3,70	4,00	3,70	3,90	3,50	3,90	3,70	3,60
	4,00	3,80	3,80	3,90	3,40	3,60	3,50	3,80	3,60	3,70
	3,90	3,90	3,50	3,70	3,30	3,60	3,40	3,60	3,50	3,60
	3,80	3,90	3,60	3,70	3,30	3,40	3,20	3,50	3,60	3,90
2,5–5,0	8,10	7,10	7,10	7,60	7,40	7,10	6,80	7,50	7,10	7,50
	8,50	7,00	7,00	7,30	7,20	7,50	6,80	7,50	7,10	7,10
	8,20	6,80	7,40	7,20	7,00	6,90	7,00	7,50	7,00	7,30
	7,90	7,10	6,80	7,20	7,00	7,30	7,00	7,60	6,80	7,00
	7,60	7,30	7,20	7,40	7,10	6,90	6,80	7,40	6,90	7,40
5,0–10,0	17,10	14,80	15,20	16,00	15,40	15,40	14,70	16,50	15,30	16,60
	17,30	14,80	15,20	15,80	15,50	16,20	14,90	16,60	15,70	16,40
	17,20	14,80	15,80	15,60	15,60	15,60	15,30	16,50	15,70	16,70
	17,20	15,30	15,30	16,00	15,60	16,30	15,10	16,90	15,60	16,30
	17,20	15,80	15,90	16,40	15,90	16,00	14,90	16,70	15,80	16,70

Таблица 10 – Статистические характеристики измерений [96]

Показатель	Содержание частиц с размером 0,0–2,5 мкм, %	Содержание частиц с размером 2,5–5,0 мкм, %	Содержание частиц с размером 5,0–10,0 мкм, %
Среднее значение	3,72	7,25	15,90
СКО	0,23	0,37	0,72
Доверительный интервал среднего значения	0,14	0,23	0,45

Содержание частиц (таблица 9) с размерами 0,0–2,5 мкм не превышает 4,2%, а с размерами 5,0–10,0 мкм – 17,3%. В среднем, содержание частиц с размерами 0,0–10,0 мкм в пробе составляет около 30%, что указывает на сравнительно высокую долю тонкодисперсной угольной пыли в исследованном угле, способной находится в воздухе во взвешенном состоянии [96].

Полученные данные (таблицы 8 и 10) показали, что выбранный в результате проведенных исследований режим обеспечивает высокую точность результатов измерений во всем диапазоне размеров частиц угольной пыли.

Разработанная методика была аттестована в установленном порядке Уральским научно-исследовательским институтом метрологии (УНИИМ-филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева») и внесена в реестр Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (Свидетельство № 241.0032/RA.RU.311866/2022).

Методика может быть использована для угольной пыли любого происхождения, в том числе для пыли, отобранной с различных поверхностей, выделенной из суспензий, отобранной из рудничной или воздушной атмосферы, из аспирационных установок. В этих случаях точность и достоверность результатов будет определяться следующими условиями: представительностью отбора проб пыли; отсутствием в ее составе примесей, искажающих эффект лазерной дифракции.

2.2.2 Метод оценки форм нахождения потенциально опасных элементов в углях по данным фракционного анализа

Для определения форм нахождения элементов в углях было проведено разделение проб углей на фракции разной плотности по ГОСТ 4790 [82]. Суть разработанного метода заключается в последовательном разделении пробы угля в тяжелых жидкостях различной плотности и определении зольности, содержания серы, фтора и ртути во всплывших фракциях и остатке после последнего расслоения. Для фракционного анализа были выбраны пластовые пробы каменных углей Буреинского угольного бассейна №№15 и 16.

В качестве тяжелой жидкости для разделения проб углей применялся раствор хлористого цинка (ZnCl_2) плотностью от 1300 до 1800 кг/м³.

После проведения фракционного анализа рассчитан выход во фракцию, как отношение массы фракции к сумме масс фракций, (%) по ГОСТ 4790.

Всплывшие фракции (концентрат) анализировали на содержание в них таких элементов как S, F и Hg в соответствии со стандартными методами, приведенными в п.1.2 настоящей главы. Подробное описание метода и его применение для прогноза концентрирования потенциально элементов в пыли приведено в разделах 4.5 и 4.6.

Выводы:

1. При исследовании выбранных углей отмечено, что угли характеризуются широким диапазоном зольности (от 5,4 до 40,2%). Минимальный выход летучих веществ обнаружен у антрацитов (№11 и №12), а максимальный – в угле №3 (39,4%). Повышенное содержание серы характерно только для пробы каменного угля №13 (0,56%).

2. Установлено, что в коллекции представлены каменные угли разных стадий метаморфизма (показатель отражения витринита изменяется от 0,56 до 1,70%). Каменные угли различаются и по петрографическому составу. Максимальное содержание инертинита отмечено для углей №4 (63 %), №9 (58%). Петрографический состав остальных каменных углей можно охарактеризовать преимущественным содержанием витринита (более 50%). Отмечено, что угли №№3,6,8 и 16, имеют в своем составе сравнительно высокое содержание липтинита (3–4%). Антрациты (№№11, 12) характеризуются близкими значениями показателя отражения витринита и сходным петрографическим составом.

3. Показано, что в коллекции присутствуют угли, приуроченные по данным геологической разведки к зоне окисленности – это пробы углей №6, №14, также показана частичная окисленность углей №3 и №8.

4. Для оценки загрязнения окружающей среды угольной пылью при добыче и переработке углей разработан метод оценки и контроля содержания и гранулометрического состава пыли в рядовых и товарных углях. Метод включает в себя: улавливание взвешенной пыли на специализированном испытательном стенде, определение ее количественного содержания и гранулометрического состава.

5. Разработана и аттестована методика определения гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции. Проведены экспериментальные работы по обоснованию условий проведения измерений и метрологических характеристик результатов измерений.

6. Разработан метод оценки форм нахождения потенциально опасных элементов в углях по данным фракционного анализа. Метод заключается в последовательном разделении пробы угля в тяжелых жидкостях различной плотности и определении зольности и содержания серы, фтора и ртути во всплывших фракциях и остатке после последнего расслоения.

Глава 3 Исследование влияния петрографического состава, стадии метаморфизма и окисленности углей на содержание в них пыли разного гранулометрического состава

Определение содержания пылевой фракции (менее 200 мкм) в рядовых углях

Содержание пылевой фракции γ_{200} определяли в пробе рядового угля класса крупностью менее 3 мм в соответствии с ГОСТ 2093, а затем пересчитывали на уголь в соответствии с результатами ситового анализа. Результаты приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Содержание пылевой фракции в пробах рядовых углей [98]

№ пробы	Содержание класса крупности <3 мм в рядовом угле γ , %	Содержание пылевой фракции в анализируемой пробе, %	Содержание пылевой фракции в угле γ_{200} , %
1	19,3	34,3	6,6
2	30,9	20,9	6,4
3	12,2	9,0	1,1
4	25,8	34,3	6,2
5	21,5	23,6	5,1
6	34,6	9,0	3,1
7	19,4	15,9	3,1

Продолжение таблицы 11

8	11,5	5,8	0,7
9	16,4	13,5	2,2
10	15,4	19,1	2,9
11	27,0	14,1	3,8
12	56,5	32,5	18,4
13	11,1	13,3	1,5
14	25,5	4,6	1,2
15	17,6	-	-
16	17,0	-	-

Содержание пылевой фракции в рядовых углях различно. Максимальное содержание пылевой фракции зафиксировано в пробе антрацита №12 (18,4%), а минимальное в каменном угле марки Д Кузнецкого бассейна № 8 (0,7%). Следует отметить существенные различия по содержанию пылевой фракции для рядовых антрацитов.

На рисунках 10-13 приведены данные по изменению содержания пылевой фракции в рядовых углях в зависимости от их петрографического состава и стадии метаморфизма. Установлено, что содержание пылевой фракции в исследуемых углях характеризуется значительным разбросом значений для углей близких стадий метаморфизма и не зависит от их петрографического состава.

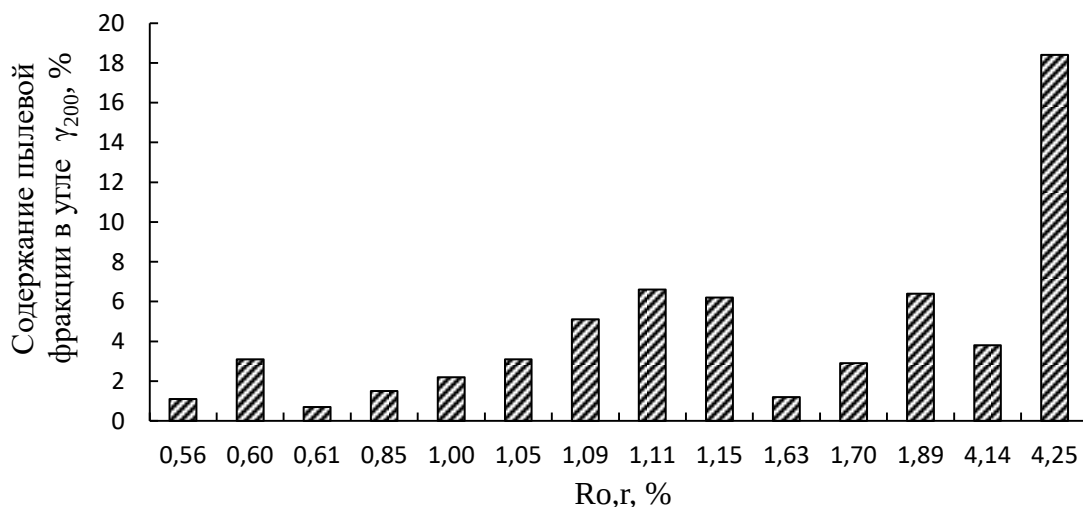


Рисунок 10 – Содержание пылевой фракции в пробах рядовых углей разного метаморфизма

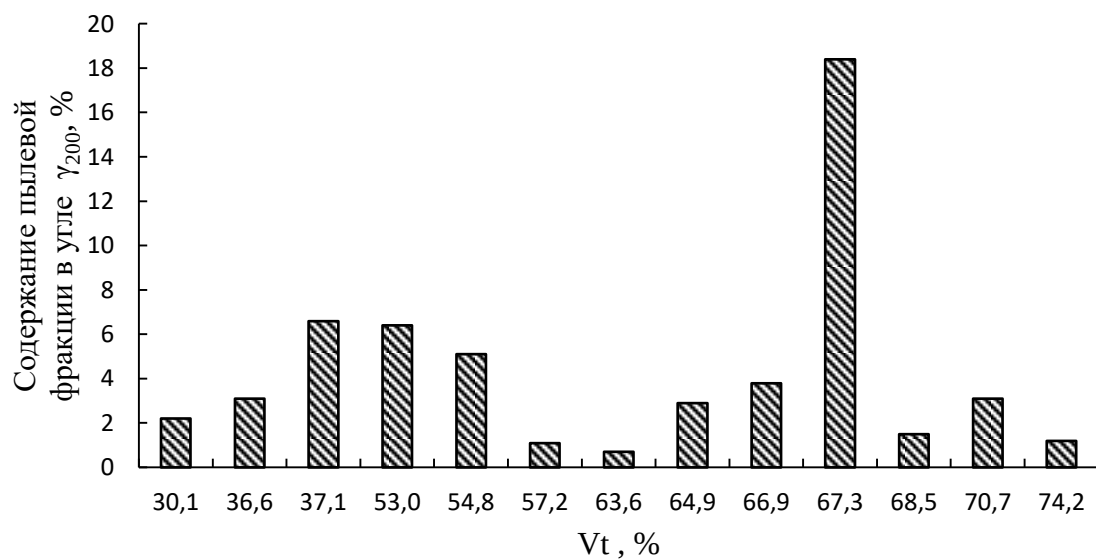


Рисунок 11 – Содержание пылевой фракции в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы витринита

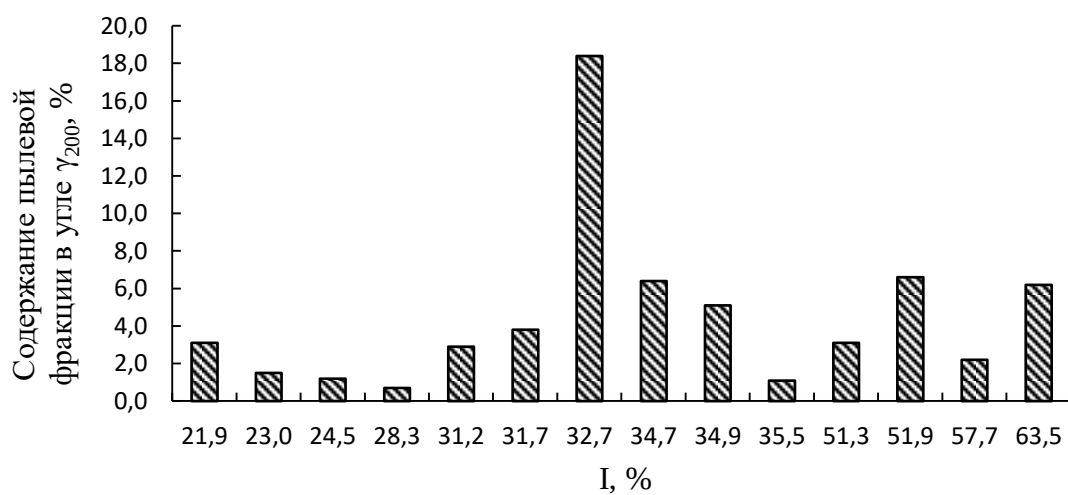


Рисунок 12 – Содержание пылевой фракции в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы инертинита

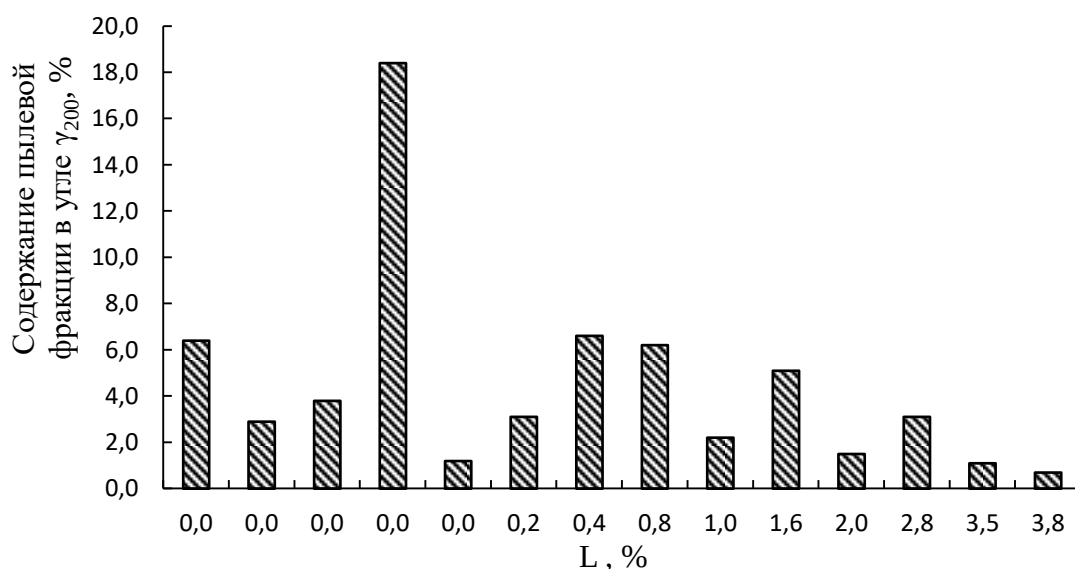


Рисунок 13 – Содержание пылевой фракции в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы липтинита

По полученным результатам также отмечено, что для угля средней стадии метаморфизма (№6), приуроченного по геологическим данным к зоне окисления, по сравнению с частично окисленными углями №№3 и 8, содержание пылевой фракции в угле увеличивается. Однако в окисленном угле высокой стадии метаморфизма (№14) по сравнению с неокисленным №10 наблюдается уменьшение содержания пылевой фракции.

Определение содержания взвешенной пыли в рядовых углях

Содержание взвешенной пыли в рядовых углях определяли на специализированном испытательном стенде в соответствии с п. 2.2.1.1 диссертационной работы. Результаты определения количественного содержания взвешенной пыли приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Содержание взвешенной пыли, выделенной из рядовых углей [98]

№ пробы	Содержание класса крупности <3 мм в рядовом угле, γ , %	Содержание взвешенной пыли в анализируемой пробе m_p , %	Содержание взвешенной пыли в угле γ_p , %
1	19,3	3,7	0,7
2	30,9	3,4	1,1
3	12,2	1,9	0,2
4	25,8	9,5	2,4
5	21,5	4,4	1,0
6	34,6	1,6	0,6
7	19,4	2,4	0,5
8	11,5	2,8	0,3
9	16,4	1,8	0,3
10	15,4	3,7	0,6
11	27,0	4,3	1,2
12	56,5	4,6	2,6
13	11,1	3,9	0,4
14	25,5	1,6	0,4
15	17,6	1,2	0,2
16	17,0	3,1	0,5

Содержание взвешенной пыли в исследуемых углях находится в широком диапазоне и варьируется от 0,2% до 2,6%. Максимальное содержание пыли отмечено в пробе антрацита №12 и каменного угля средней стадии метаморфизма №4; минимальное содержание в углях №3 и №15 (0,2%). Следует обратить внимание, что содержание взвешенной пыли для антрацитов №№11,12 различно и составляет 1,2% и 2,6% соответственно.

Полученные результаты о содержании в пробах углей взвешенной пыли, выделенной из рядовых углей, были сопоставлены со стадией метаморфизма и петрографическим составом углей (рисунки 14-17). Установлено, что содержание взвешенной пыли в рядовых углях характеризуется значительным разбросом значений для углей близких стадий метаморфизма и не зависит от их петрографического состава.

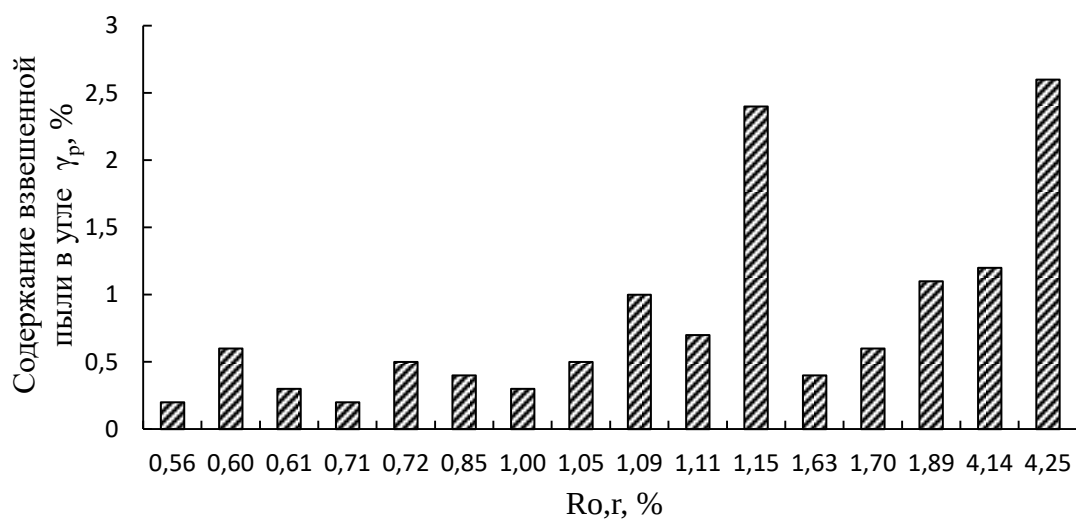


Рисунок 14 – Содержание взвешенной пыли в пробах рядовых углей разного метаморфизма

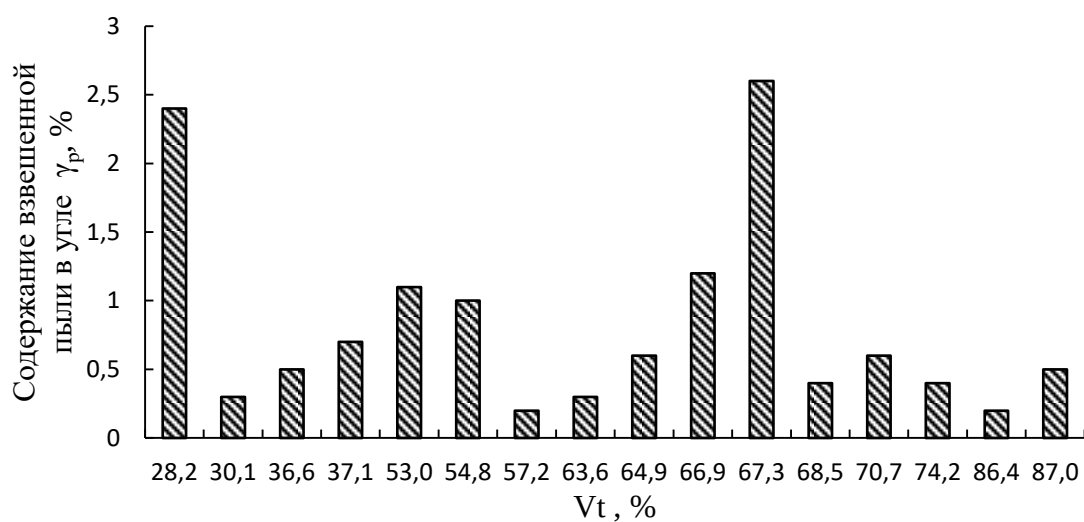


Рисунок 15 – Содержание взвешенной пыли в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы витринита

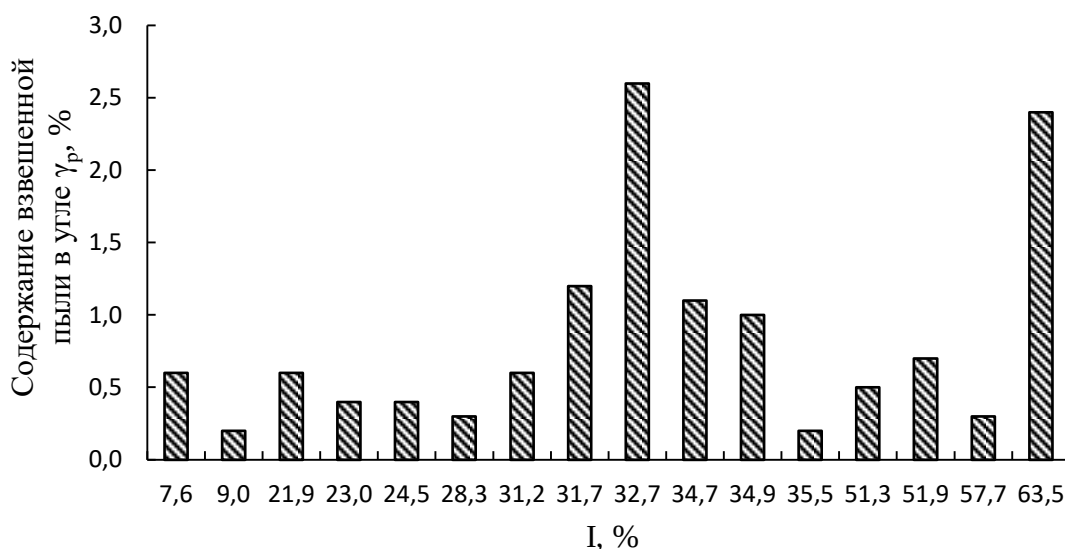


Рисунок 16 – Содержание взвешенной пыли в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы инертинита

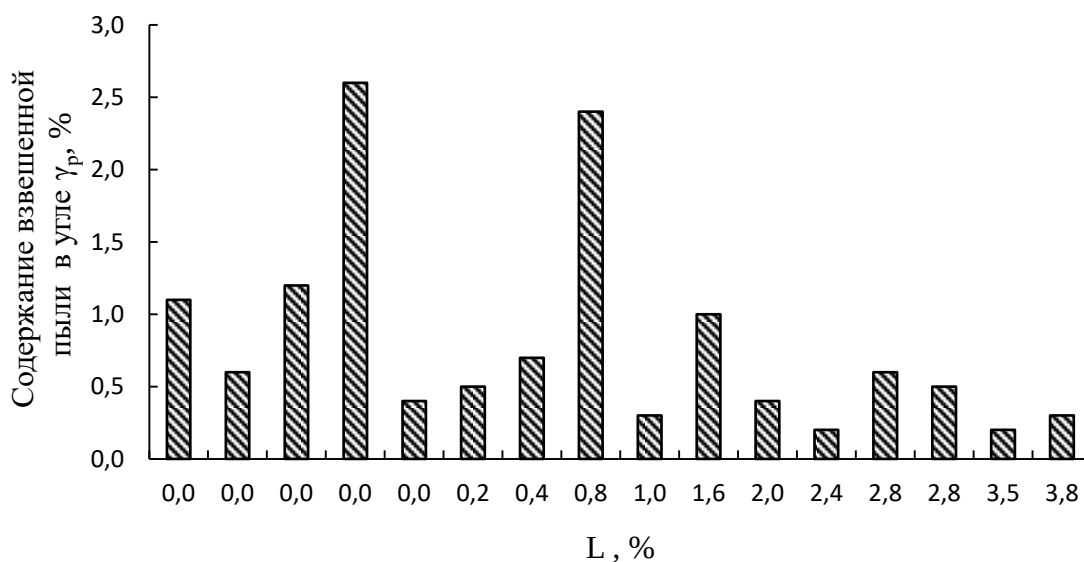


Рисунок 17 – Содержание взвешенной пыли в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы липтинита

Интересно отметить, что угли с повышенным содержанием липтинита (№№3,6,8 и 16) не характеризуются повышенным выходом пыли γ_p по сравнению с остальными углями, в то время как по данным авторов [23,40], повышенное содержание липтинита может являться причиной более высокой склонности углей к образованию пыли и пылевой фракции (частиц с размерами менее 0,2 мм).

Также не обнаружена явная взаимосвязь между содержанием инертинита и выходом пыли из углей, на что указывают различия между углями №4 (63% инертинита, γ_p -2,4 %) и №9 (58% инертинита, γ_p -0,3%). При том в работе [18,57] авторами отмечено, что высокое содержание инертинита может быть причиной более высокой склонности углей к образованию взвешенной пыли.

Таким образом, можно полагать, что содержание взвешенной пыли в углях определяется в первую очередь не их стадией метаморфизма и петрографическим составом, а связано с особенностями механических свойств витринита [99-101].

По результатам, приведенным в таблице 12, не удалось получить однозначные данные о влиянии окисленности углей на содержание в них взвешенной пыли. Так для окисленного угля средней стадии метаморфизма (№6) наблюдается повышение содержания взвешенной пыли в угле практически в 3 раза по сравнению с частично окисленными углями (№№3,8). Однако для окисленного угля высокой стадии метаморфизма (№14) по сравнению с неокисленным (№10) наблюдается незначительное уменьшение содержания взвешенной пыли в угле.

Для определения размеров частиц взвешенной пыли использовали разработанную и аттестованную методику определения гранулометрического состава проб угольной пыли на основе метода лазерной дифракции (п. 2.2.1.2 диссертационной работы).

В качестве пробы использовали взвешенную пыль, выделенную на специализированном испытательном стенде из рядовых углей. Непосредственно перед испытанием пробу доводили до воздушно-сухого состояния и тщательно перемешивали не менее 1 минуты.

Определение гранулометрического состава взвешенной пыли проводили на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22 Next Nano (FRITSCH, Германия).

При проведении измерений в программном обеспечении MaScontrol были установлены оптимальные параметры измерений в соответствии с п. 2.2.1.2 диссертационной работы.

В таблице 13 приведены результаты определения гранулометрического состава взвешенной пыли.

В связи с введением гигиенических норм относительно концентрации взвешенных частиц PM_{2,5} и PM₁₀ в атмосферном воздухе состав взвешенной угольной пыли с размерами частиц в диапазоне от 0 до 10 мкм представляет наибольший интерес.

Таблица 13 – Гранулометрический состав взвешенной пыли [98]

Пыль, выделенная из пробы угля №	Содержание во взвешенной пыли частиц, %					
	0,0-2,5 мкм (PM _{2,5})	2,5-5,0 мкм	5,0-10,0 мкм	0,0-10,0 мкм (PM ₁₀)	10,0-50,0 мкм	50,0-100,0 мкм
1	3,0	4,4	7,9	15,3	51,9	25,6
2	3,2	5,3	9,5	18,0	54,2	22,8
3	2,6	3,9	7,8	14,3	46,7	24,1
4	3,0	4,6	7,5	15,1	45,5	29,1
5	3,7	5,6	9,8	19,1	55,2	21,4
6	6,1	6,5	9,7	22,3	57,8	17,2
7	4,3	5,9	9,5	19,7	55,5	21,7
8	2,5	2,8	3,6	8,9	23,8	28,4
9	3,9	4,6	6,5	15,0	38,1	30,2
10	2,5	3,5	5,4	11,4	46,1	32,8
11	7,0	8,8	12,3	28,1	54,4	16,0
12	4,4	6,0	9,2	19,6	52,0	23,1
13	3,8	4,8	6,8	15,4	41,5	29,5
14	2,2	3,0	4,3	9,5	27,9	33,5
15	5,3	5,1	5,7	16,1	36,0	28,0
16	5,7	6,4	7,3	19,4	33,0	30,0

Результаты (табл. 13) показали, что взвешенная пыль, выделенная из исследованных углей, различается по гранулометрическому составу. Содержание во взвешенной пыли частиц с размерами менее 10 мкм составляет от 8,9% до 28,1%, а содержание частиц с размерами менее 2,5 мкм находится в диапазоне 2,2-7,0%.

Отмечено, что окисленность рядового угля высокой стадии метаморфизма (№14) не влияет на содержание частиц менее 10 мкм во взвешенной пыли по сравнению с соответствующими данными для неокисленного угля №10. Для окисленного угля средней стадии метаморфизма (№6) наблюдается увеличение доли частиц менее 10 мкм во взвешенной пыли по сравнению с углями, отобранными вне зоны окисления.

Полученные данные о содержании взвешенной пыли в угле и ее гранулометрическом составе относительно частиц с размером менее 10 мкм позволили рассчитать содержание этих частиц в угле по следующей формуле:

$$\gamma_{p10} = \gamma_p \cdot \frac{PM10}{100} \quad (3)$$

где γ_p – содержание взвешенной пыли в угле%; PM10 - содержание частиц менее 10 мкм в анализируемой пробе взвешенной пыли, %; γ_{p10} – содержание взвешенной пыли с размерами частиц менее 10 мкм в пересчете на уголь.

Полученные данные о количественном содержании взвешенной угольной пыли и частиц PM10 в углях приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Содержание частиц с размером менее 10 мкм в рядовых углях [98]

Проба угля №	Содержание взвешенной пыли в угле γ_p %	Содержание частиц с размером менее 10 мкм в угле (γ_{p10}), %
1	0,7	0,11
2	1,1	0,19
3	0,2	0,03
4	2,4	0,37
5	1,0	0,18

Продолжение таблицы 14

6	0,6	0,13
7	0,5	0,09
8	0,3	0,03
9	0,3	0,05
10	0,6	0,07
11	1,2	0,33
12	2,6	0,51
13	0,4	0,07
14	0,4	0,04

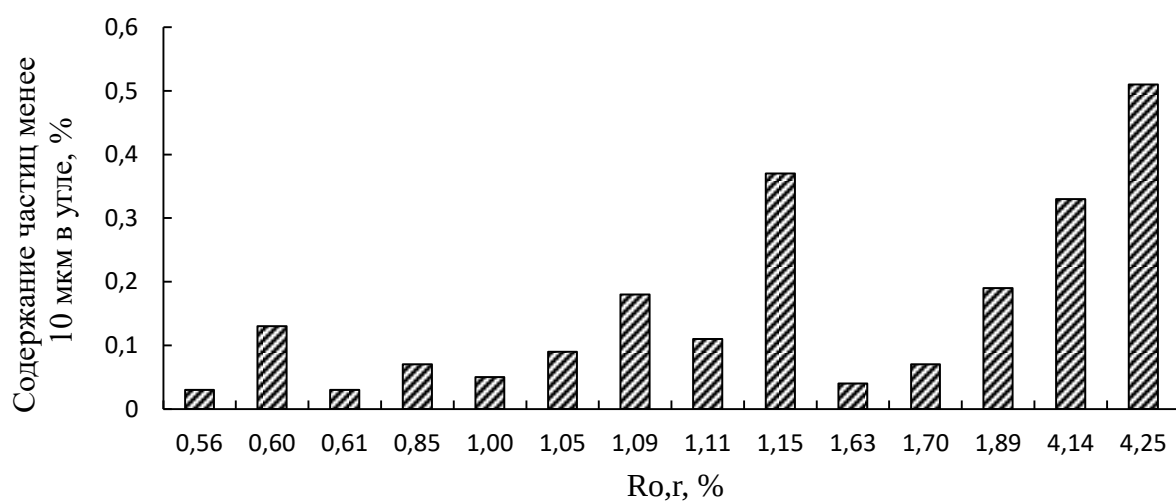


Рисунок 18 – Содержание частиц с размером менее 10 мкм в пробах рядовых углей разного метаморфизма

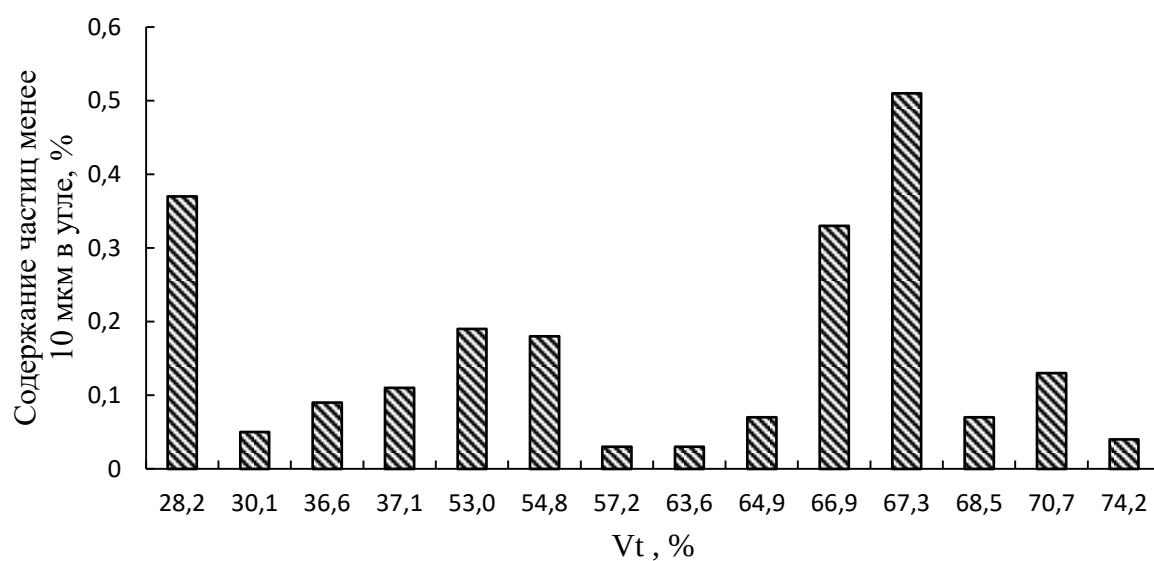


Рисунок 19 – Содержание частиц с размером менее 10 мкм в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы витринита

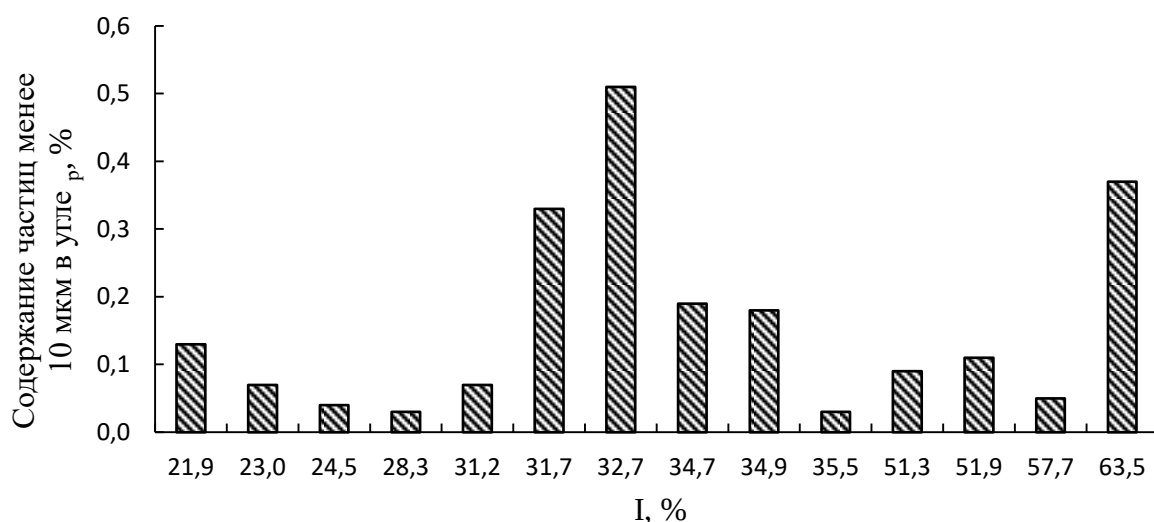


Рисунок 20 – Содержание частиц с размером менее 10 мкм в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы инертинита

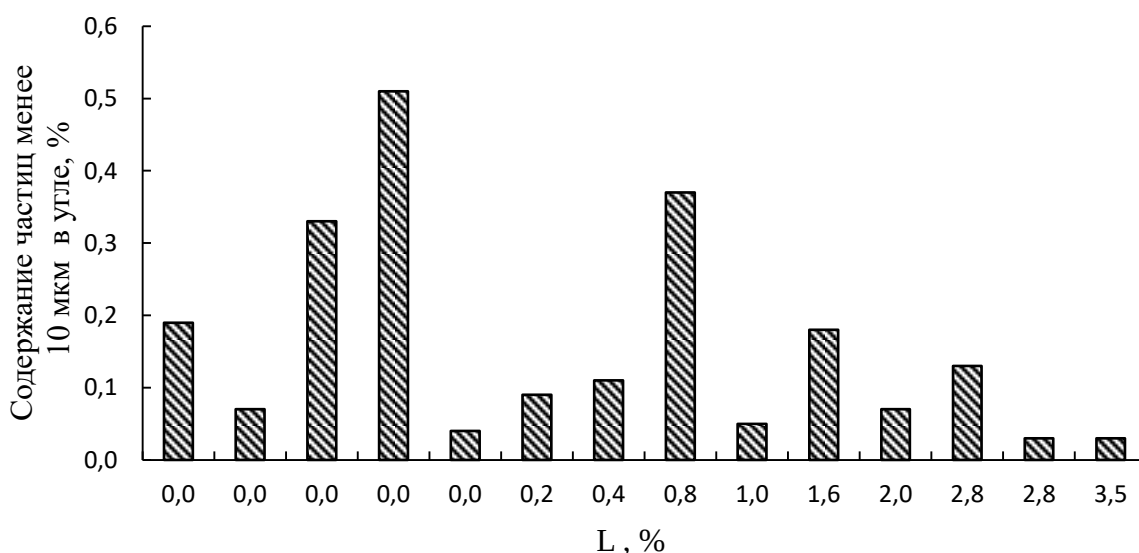


Рисунок 21 – Содержание частиц с размером менее 10 мкм в пробах рядовых углей в зависимости от объемной доли в них мацералов группы липтинита

Данные, полученные в таблице 14, и приведенные на рисунках 18-21, показали, что содержание частиц PM10 в рядовых углях также характеризуется значительным разбросом значений для углей близких стадий метаморфизма и не зависит от их петрографического состава.

Значительное повышение содержания частиц с размером менее 10 мкм в углях характерно для окисленного угля средней стадии метаморфизма (№6), а для окисленного угля высокой стадии метаморфизма (№14)

содержание частиц с размером менее 10 мкм незначительно уменьшается по сравнению с неокисленным углем №10.

Таким образом, установлено, что данные о петрографическом составе углей и стадии его метаморфизма не позволяют оценивать содержание в рядовых углях, как пылевой фракции, так и взвешенной пыли разного гранулометрического состава. Это, в свою очередь, определяет необходимость для оценки загрязнения окружающей среды угольной пылью проведения измерений указанных показателей (содержание в углях пылевой фракции, взвешенной пыли, в том числе с размерами частиц менее 10 мкм) как для рядовых углей, так и для товарной продукции.

Установлено, что окисленность углей средней стадии метаморфизма приводит к увеличению содержания пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм в рядовом угле. Окисленность углей высокой стадии метаморфизма напротив, приводит к снижению содержания пылевой фракции в рядовом угле, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм.

Выводы:

1. Для определения количественного содержания взвешенной пыли в рядовых углях использован специализированный испытательный стенд, который имитирует процесс перевалки и позволяет улавливать и концентрировать угольную пыль, содержащуюся в рядовых углях и способную находиться во взвешенном состоянии. Конструкция стенда позволяет отбирать представительные объемы взвешенной пыли для определения ее гранулометрического состава и содержания в ней макро- и микроэлементов.

2. Для определения размеров частиц взвешенной пыли использована методика определения гранулометрического состава проб угольной пыли методом лазерной дифракции.

3. Применение разработанного метода оценки и контроля содержания и гранулометрического состава пыли для исследованных

рядовых углей позволило установить, что содержание взвешенной пыли в рядовых углях разного метаморфизма и петрографического состава варьируется от 0,2 до 2,6%, а содержание в них пыли с размером частиц менее 10 мкм - от 0,03 до 0,51%.

4. На основании экспериментальных исследований установлено, что содержание пылевой фракции, взвешенной пыли, в том числе с размерами менее 10 мкм в рядовых углях, характеризуется значительным разбросом значений для углей близких стадий метаморфизма и не зависит от их петрографического состава.

5. Проведены исследования по определению влияния окисленности рядовых углей, отобранных от сближенных пластов в зоне окисления и вне ее, на содержание в них пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм. Установлено, что окисленность углей средней стадии метаморфизма приводит к увеличению содержания пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм в рядовом угле. Окисленность углей высокой стадии метаморфизма напротив, приводит к снижению содержания пылевой фракции в рядовом угле, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм.

Глава 4 Экспериментальные исследования распределения макро- и микроэлементов в рядовых углях и выделенной из них взвешенной пыли

4.1 Содержание макро- и микроэлементов в рядовых углях

Основными загрязняющими веществами в атмосферном воздухе городских и сельских поселений в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 являются взвешенные вещества; частицы PM₁₀ и PM_{2,5}, а также пыль каменного угля. Минеральные компоненты в составе взвешенных веществ самостоятельно не являются загрязняющими атмосферный воздух веществами (в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21), однако при оседании угольной пыли на почвы, растительность и водные объекты, входящие в ее

состав макро- и микроэлементы могут приводить к загрязнению объектов окружающей среды [102].

В главе 1 диссертационной работы были отмечены основные потенциально опасные элементы, оказывающие негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека. К ним относятся соединения S, F, Hg, As, Cd, Cr, Ni, Sr, V и Zn.

Для определения содержания макро- микроэлементов в пробах углей использовали стандартные методы, регламентированные соответствующими национальными и межгосударственными стандартами, которые приведены в главе 2 диссертационной работы.

Результаты определения содержания макро- микроэлементов в углях приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Содержание макро- и микроэлементов в рядовых углях [103]

Элементы	Пробы углей:															
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16
	Зольность на сухое состояние топлива, A ^d , %															
	14,2	22,2	13,9	5,4	12,7	20,2	19,8	11,1	20,7	13,8	7,5	10,7	30,9	19,2	40,2	38,3
	Содержание элемента на сухое состояние топлива, г/т															
S ¹⁾	0,19	0,21	0,35	0,12	0,29	0,37	0,15	0,21	0,18	0,31	0,14	0,31	0,56	0,26	0,26	0,28
F	93	163	90	27	150	220	101	255	99	92	194	60	229	88	242	204
Hg	0,027	0,123	0,013	0,058	0,035	0,096	0,017	0,040	0,038	0,055	0,077	0,135	0,220	0,130	0,010	0,015
Al	11132	24510	14266	6167	13395	21359	17250	10534	23278	16334	7892	6742	24684	22299	46175	36020
As	1,2	3,8	2,8	0,5	1,1	5,7	1,5	2,3	0,8	1,7	1,4	0,7	9,3	2,0	14,0	9,6
B	1,0	8,2	17,0	4,2	11,0	20,0	7,0	16,0	13,0	12,0	19,0	8,2	16,0	6,8	15,0	8,9
Be	0,5	1,2	0,6	0,4	0,6	1,0	0,6	1,3	0,9	1,2	0,5	0,5	1,5	1,0	1,4	1,6
Ca	6993	3699	811	4090	4173	4679	8008	1471	6776	639	1628	3880	8248	17838	2590	2018
Cd	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,07	н.п.о.	0,20	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,23	0,04	н.п.о.	0,10
Co	4,4	5,2	3,8	0,6	2,6	7,3	5,2	2,8	5,4	2,7	0,70	2,5	16,0	2,7	2,5	2,2
Cr	4,9	8,5	9,0	1,6	5,9	13,0	13,0	6,5	11,0	3,3	3,9	7,7	18,0	3,8	14,0	16,0
Cu	4,3	8,3	7,3	2,3	5,6	11,0	5,8	9,1	5,9	5,1	3,6	5,6	14,0	5,1	13,0	8,6
Fe	10992	16890	4229	2042	4856	4658	9353	835	9160	9718	6553	6569	9726	5199	9704	7826
Ga	3,2	6,5	3,0	1,2	3,3	5,0	3,2	3,6	5,2	5,0	2,2	2,9	5,6	5,7	11,0	9,2
K	2689	4353	1607	700	1886	4855	3308	1599	5614	768	1538	1288	5614	3566	5042	6440
Li	28	4	23	13	21	10	39	7	18	34	25	22	41	24	38	14
Mg	2499	4712	450	1636	1413	1163	3292	199	2074	450	1159	349	3036	1228	2113	1771
Mn	233	92	38	26	62	47	189	9	199	252	174	57	159	40	143	144
Mo	0,3	1,0	0,6	0,1	0,6	1,0	н.п.о.	0,8	0,5	0,9	0,4	0,4	2,6	0,7	1,3	1,2
Na	479	1031	211	235	283	269	2134	258	1036	806	102	33	2159	1339	3188	3189
Ni	8,2	6,6	6,8	0,4	9,6	18,0	23,0	6,8	12,0	4,3	3,0	6,0	45,0	4,0	5,4	3,3
P	372	613	199	106	825	533	258	1254	158	275	716	56	740	421	113	64
Sr	177	247	58	110	174	167	147	248	125	46	111	49	105	239	77	38
Ti	546	928	766	184	595	969	669	610	948	657	312	537	1275	1013	2331	1756
V	10,0	17,0	11,0	2,5	9,9	26,0	11,0	17,0	14,0	6,5	5,6	10,0	29,0	8,3	27,0	28,0
Zn	13,0	32,0	12,0	6,5	9,5	34,0	14,0	13,0	14,0	7,2	13,0	16,0	22,0	11,0	38,0	22,0

Примечание: ¹⁾ в % на сухое состояние; н.п.о. – ниже предела обнаружения.

Содержание фтора в рядовых углях изменяется в широком диапазоне от 27 г/т до 255 г/т, максимальное содержание отмечено в пробе угля №8 Кузнецкого угольного бассейна. Стоит отметить широкий диапазон содержания ртути в углях: от 0,010 г/т до 0,135 г/т, максимальное содержание ртути наблюдается в пробе антрацита (№12). Содержание в углях таких элементов как мышьяк, бериллий, кобальт, медь, галлий и молибден варьируется незначительно. Кадмий обнаружен в незначительных количествах в пробах углей №№4,6,13,14 и 16 в диапазоне от 0,07 г/т до 0,23 г/т. В углях отмечено различное содержание хрома от 1,6 г/т до 18,0 г/т; содержание в углях никеля варьируется от 0,36 г/т до 45 г/т. Для проб углей №3, №10, №12 и №16 содержание стронция имеет близкие значения в диапазоне от 38 г/т до 58 г/т. Повышенное содержание стронция отмечено для проб углей №№2, 8 и 14 (от 239 г/т до 248 г/т). Максимальное содержание ванадия обнаружено в пробе №13 (29 г/т). Высокое содержание цинка наблюдается в пробах №2 (32 г/т), №6 (34 г/т) и №15 (38 г/т). Исследуемые угли также различаются по содержанию основных золообразующих элементов (Al, Fe, Ca, Mg, Na и K) [103].

4.2 Влияние окисленности углей на содержание в них макро- и микроэлементов

Как было показано во 2-й главе диссертационной работы, угли №№ 3,6 и 8 характеризуются разной степенью окисленности, проявляющейся в повышенном содержании суммарных кислых групп ((Kг)^d), характерной окраске спирто-щелочных экстрактов, а также в наличии типичных дефектов на поверхности угольных зерен. Также для угля №6, приуроченного к зоне окисления, отмечена существенно более высокая зольность, чем для углей №3 и №8. Данные, приведенные на рисунке 22, показывают, что увеличение содержания в №№3,6,8, таких элементов как алюминий, титан, магний, мышьяк, бор, кобальт и хром тесно связано с изменением зольности углей. Увеличение окисленности углей №№3,6 и 8 приводит к концентрированию в них натрия, меди, галлия, ванадия, ртути и молибдена (рисунки 23-24).

Существенное повышение содержания калия и кальция, а также никеля и цинка (таблица 15) происходит в угле №6, приуроченном к зоне окисления. Показана тесная взаимосвязь между содержанием серы и железа в окисленных углях средней стадии метаморфизма (рисунок 25), при этом для окисленного угля №6 содержания этих элементов максимальны [94].

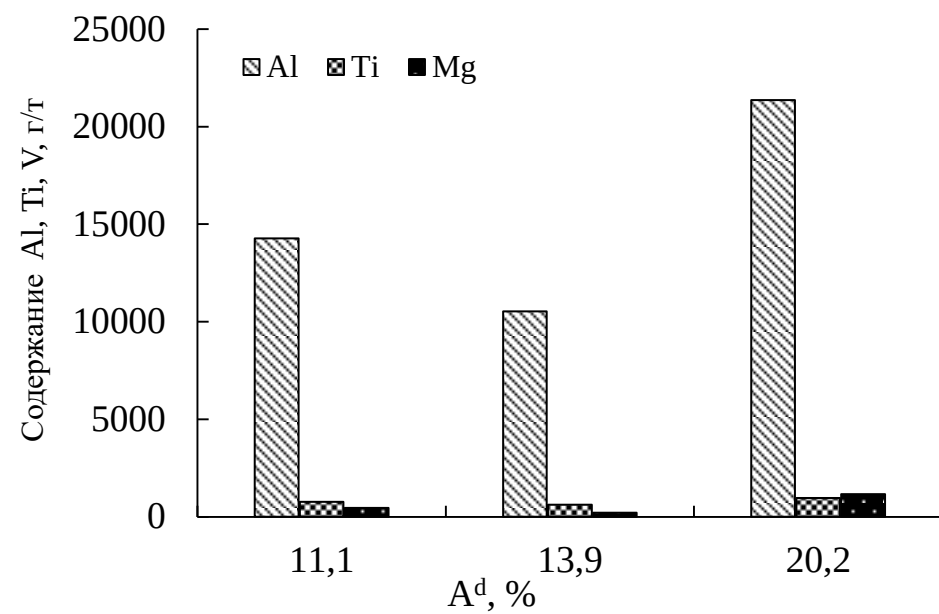
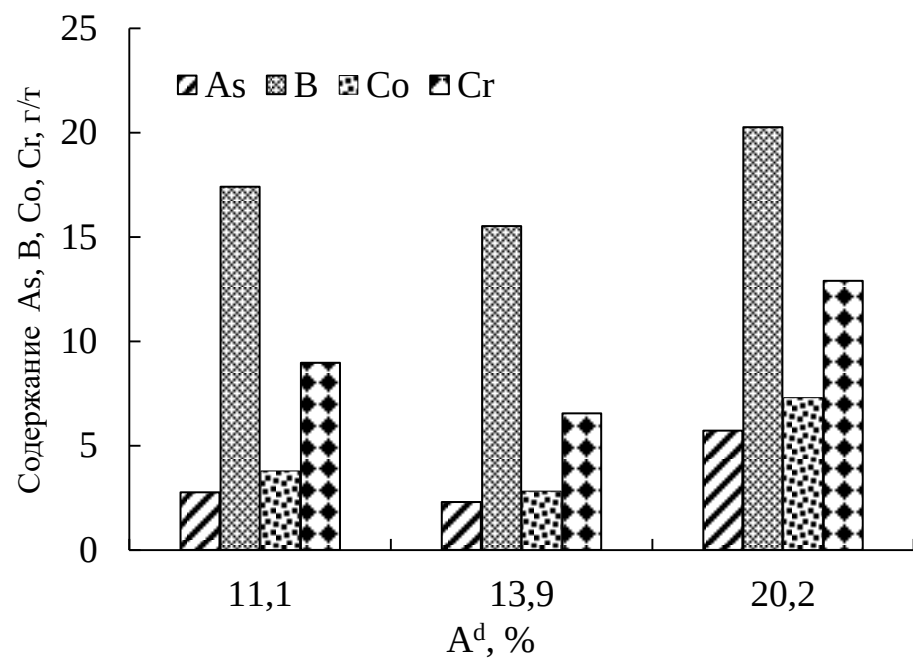


Рисунок 22 – Влияние зольности (A^d) углей №№3,6,8 на содержание в них макро-и микроэлементов [94]

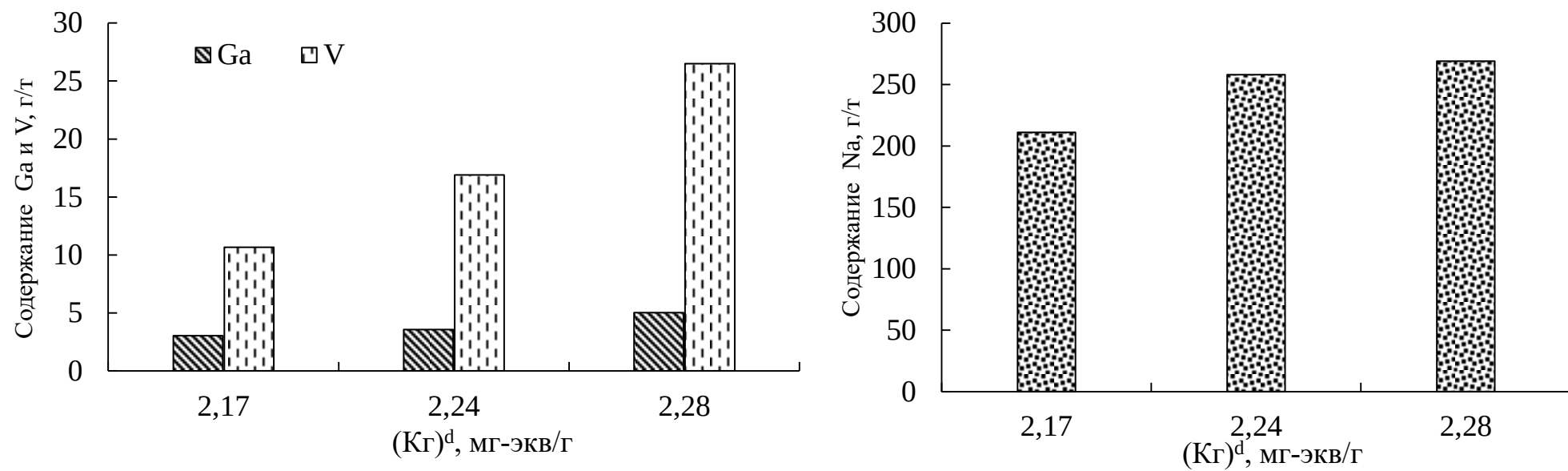


Рисунок 23 – Влияние окисленности $((KГ)^d)$ углей №№3,6,8 на содержание в них макро-и микроэлементов [94]

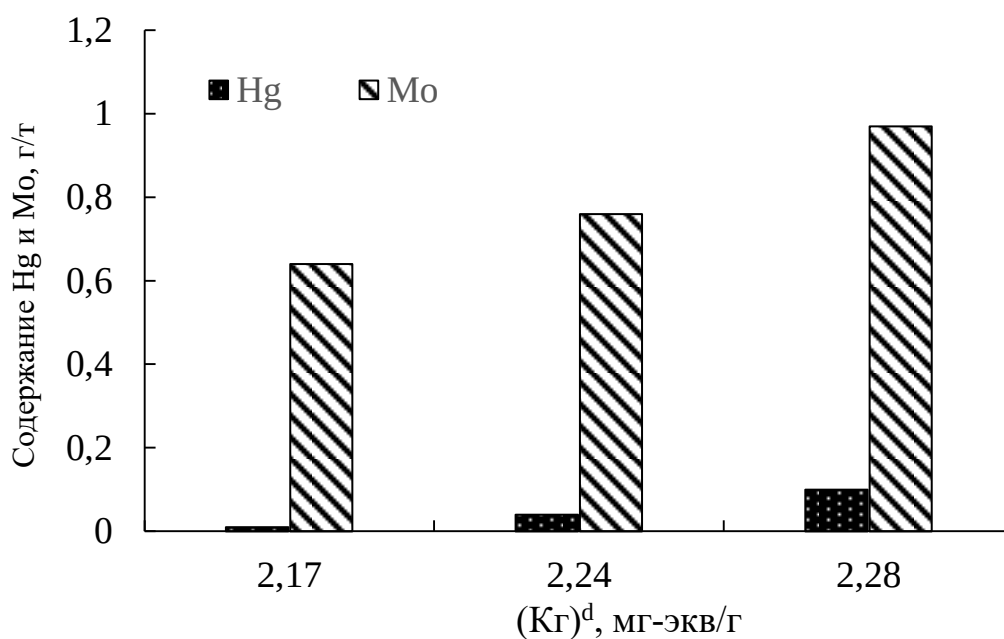


Рисунок 24 – Изменение содержания в углях №№3,6,8 молибдена и ртути [94]

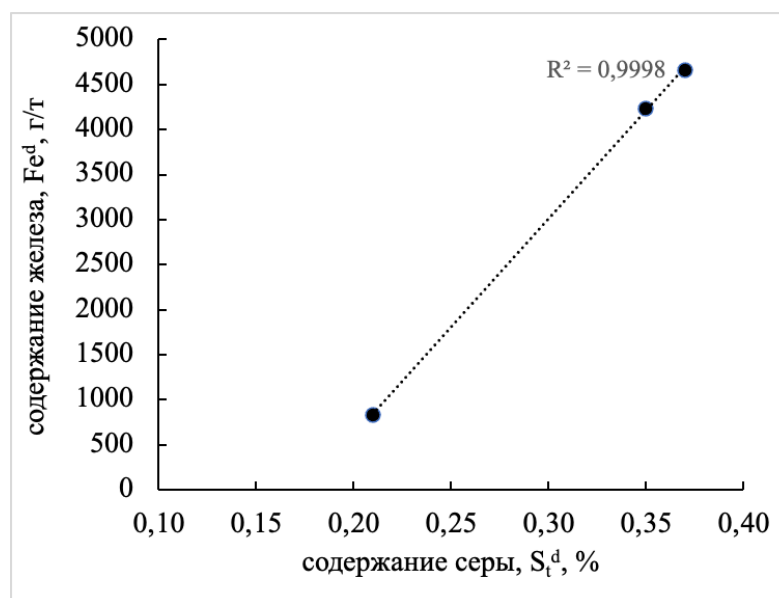


Рисунок 25 – Содержание железа и серы в углях №№3,6,8 [94]

Для оценки изменений содержания макро- и микроэлементов в окисленном угле высокой стадии метаморфизма (№14) были рассчитаны коэффициенты концентрирования отдельных элементов. Коэффициенты рассчитывали, как отношение содержания элемента в окисленном угле №14 к его содержанию в неокисленном угле №10. Дополнительно был рассчитан соответствующий коэффициент для значений зольности. Полученные данные

представлены на рисунке 26. Коэффициент концентрирования зольности в окисленном угле №14 составляет 1,4. При этом концентрирование в этом угле таких элементов как ртуть, калий, магний и стронций соответствует коэффициентам 2,2, 4,6, 2,7 и 5,2, а для кальция коэффициент концентрирования составляет 27,9. Также следует отметить, что в окисленном угле обнаружен кадмий в концентрации 0,04 г/т, содержание которого в угле №10 находится ниже предела обнаружения. В окисленном угле №14 отмечено существенное снижение концентрации серы, железа, марганца и бора по сравнению с углем №10, отобранном вне зоны окисления [94].

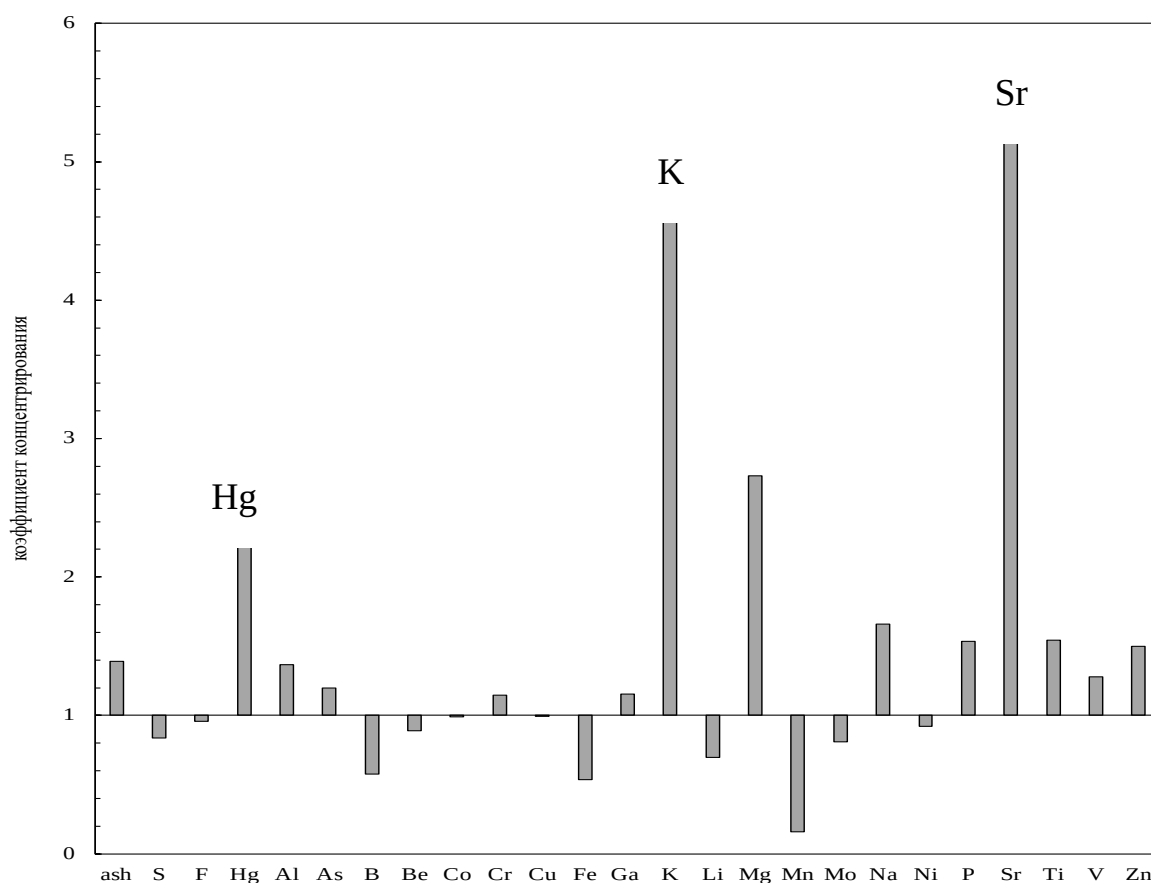


Рисунок 26 – Коэффициенты концентрирования зольности, макро- и микроэлементов окисленном угле высокой стадии метаморфизма (№14) [94]

Таким образом, полученные данные показали, что окисленность углей разных стадий приводит к концентрированию в них таких ПОЭ как ртуть и

стронций. Особенности окисленности углей разных стадий метаморфизма определяет изменения в их составе таких элементов как сера, железо, магний, натрий и калий. [94].

4.3 Содержание макро- и микроэлементов во взвешенной пыли, выделенной из рядовых углей

В таблице 16 приведены результаты определения содержания макро- и микроэлементов во взвешенной пыли, выделенной из рядовых углей на испытательном стенде.

Таблица 16 – Содержание макро- и микроэлементов во взвешенной пыли, выделенной из рядовых углей [103]

Элементы	Взвешенная пыль, выделенная из рядовых углей:															
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16
	Зольность на сухое состояние топлива, A ^d , %															
	13,2	11,7	10,6	5,8	11,4	22,1	13,6	18,3	18,1	10,1	12,2	7,9	32,1	18,2	39,6	47,5
	Содержание элемента на сухое состояние топлива, г/т															
S ¹⁾	0,22	0,33	0,58	0,13	0,31	0,37	0,19	0,23	0,22	0,40	0,07	0,10	0,70	0,24	0,27	0,27
F	105	141	103	45	453	235	105	218	112	140	496	86	236	107	233	307
Hg	0,028	0,105	0,043	0,087	0,026	0,175	0,015	0,084	0,034	0,084	0,043	0,027	0,195	0,191	0,023	0,046
Al	14350	13437	11850	10617	12566	23189	13046	14131	21648	10593	9913	6825	31070	15745	44082	46824
As	1,8	6,3	6,1	0,5	0,9	7,8	1,4	3,4	0,8	2,1	1,1	0,8	11,0	2,2	8,2	22,0
B	12,0	5,9	12,0	7,8	8,3	24,0	16,0	7,3	10,0	6,3	7,8	6,4	27,0	7,3	15,0	9,8
Be	0,5	1,0	0,5	0,4	0,6	1,1	0,6	1,2	0,9	0,9	0,5	0,4	1,3	1,1	1,6	1,6
Ca	3994	2632	1058	2321	7960	9922	10114	3894	5086	1386	4698	5347	12443	28580	1830	4013
Cd	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,10	н.п.о.	0,37	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,27	н.п.о.		н.п.о.
Co	4,2	3,9	5,4	0,6	2,7	15,0	4,9	3,3	6,7	2,8	1,3	1,6	14,0	1,7	3,2	1,8
Cr	6,7	7,5	6,7	1,8	4,4	13,0	10,0	10,3	11,0	3,5	4,0	3,9	22,0	6,1	18,0	9,7
Cu	5,7	8,0	6,4	4,7	6,6	16,0	17,0	9,7	11,0	8,3	3,1	1,9	13,0	12,0	9,8	7,4
Fe	5635	1872	4255	1219	2745	7144	6272	3539	4653	5573	21607	4488	10172	7011	6581	10577
Ga	3,0	4,4	2,3	2,2	2,9	5,4	3,0	4,4	5,3	4,3	2,5	2,2	5,6	4,6	10,0	12,0
K	3331	1790	957	743	1318	4807	2507	3527	6183	582	1544	947	6417	3071	5568	8348
Li	17	22	28	8,3	14	15	26	27	23	28	106	20	35	29	25	23
Mg	1815	994	243	625	1573	1447	3057	936	1496	314	2777	728	4066	1865	1495	3520
Mn	98	14	11	16	20	75	93	52	54	121	678	55	166	64	96	143
Mo	0,6	2,0	1,6	0,7	0,8	1,9	0,4	1,2	0,6	1,3	н.п.о.	0,2	3,7	0,8	0,7	1,7
Na	608	356	118	138	227	415	835	1466	561	653	99	70	1964	1278	2378	3790
Ni	11,0	9,7	6,9	1,7	9,8	30,0	25,0	8,0	17,0	6,1	3,2	3,3	49,0	6,4	4,0	3,4
P	460	680	310	120	1860	640	285	713	138	591	1600	125	805	458	81	92
Sr	199	147	50	92	107	133	120	137	84	66	84	39	106	269	50	64
Ti	716	782	537	208	531	933	511	794	919	724	362	298	1578	1182	2260	1740
V	12,0	22,0	9,9	3,0	11,0	31,0	11,0	30,0	18,0	7,0	5,9	6,5	39,0	13,0	30,0	22,0
Zn	15,0	20,0	19,0	10,0	7,7	52,0	22,0	20,0	17,0	26,0	31,0	15,0	31,0	23,0	15,0	44,0

Примечание: ¹⁾ в % на сухое состояние; н.п.о. – ниже предела обнаружения.

Для проб взвешенной пыли диапазон содержания серы близок соответствующему диапазону для углей и составляет 0,07 - 0,58 г/т. Повышенное содержание серы отмечено в пробе взвешенной пыли №3 (0,58 г/т). Следует отметить, что верхние границы диапазонов содержания большинства макро- и микроэлементов во взвешенной пыли, в целом, выше, чем в рядовых углях. Так, содержание фтора в пробах взвешенной пыли изменяется в диапазоне от 45 г/т до 496 г/т, с максимальной концентрацией во взвешенной пыли антрацита №11. Содержание ртути находится в диапазоне от 0,015 г/т до 0,195 г/т, максимальное содержание наблюдается в пробе взвешенной пыли №13 и составляет 0,195 г/т. Содержание мышьяка во взвешенной пыли варьируется от 0,52 г/т до 22 г/т с максимальным содержанием в пробе №16. Кадмий обнаружен в пробах взвешенной пыли №№4, 6 и 13 и составляет 0,10 г/т, 0,37 г/т и 0,27 г/т соответственно. В пробах взвешенной пыли содержание хрома составляет от 1,8 г/т до 22,0 г/т, содержание никеля от 1,7 г/т до 49 г/т. Повышенное содержание стронция отмечено для проб взвешенной пыли из углей №1 и №14 - 199 г/т и 269 г/т соответственно. Максимальное содержание ванадия обнаружено в пробе взвешенной пыли №13 (39 г/т). Содержание цинка в пыли изменяется в диапазоне от 7,7 г/т до 52 г/т. [103].

Интересно отметить, что пробы взвешенной пыли антрацитов №№10,11 различаются по содержанию F, Fe, P, Sr, Zn и по ряду основных золообразующих элементов. Концентрирование вышеперечисленных элементов отмечено в пробе взвешенной пыли антрацита №11, что, скорее всего, указывает на приуроченность этих элементов к минеральной части угля.

Отмечено, что максимальное содержание макро- и микроэлементов в пробах взвешенной пыли, не всегда соответствует максимальному содержанию этих элементов в углях. Так, например, максимальное содержание F отмечено в угле №8 (255 г/т). При этом максимальное содержание F наблюдается во взвешенной пыли пробы №11 (496 г/т).

Максимальное содержание As обнаружено в пробе угля №15 (14,0 г/т), а максимальное содержание As во взвешенной пыли зафиксировано в пробе №16 (22,0 г/т). В угле №13 отмечено максимальное содержание Cd, а его максимальное содержание во взвешенной пыли наблюдается в пробе №6 [103].

Проба взвешенной пыли окисленного угля средней стадии метаморфизма (№6) по сравнению с пробами взвешенной пыли частично окисленных углей (№3 и 8) обогащена F, Hg, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ti, V, Zn, а также основными золообразующими элементами. Для пробы взвешенной пыли окисленного угля высокой стадии метаморфизма (№14) по сравнению с пробой взвешенной пыли неокисленного угля (№10) наблюдается обогащение такими элементами как Hg, Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Na, Sr, Ti и V.

Таким образом, на основании полученных данных о концентрировании макро- и микроэлементов в пробах взвешенной пыли углей разной степени окисленности, прослеживаются общие тенденции к концентрированию таких ПОЭ как ртуть и ванадий.

4.4 Определение коэффициентов концентрирования макро- и микроэлементов во взвешенной пыли

Для количественной оценки концентрирования (обеднения) макро- и микроэлементов во взвешенной пыли, выделенной из углей, были рассчитаны соответствующие коэффициенты K_k . Коэффициенты концентрирования K_k рассчитывали по следующей формуле:

$$K_k = \frac{C_i}{C_p} \quad (4)$$

где C_i – содержание элемента во взвешенной пыли, выделенной из углей на испытательном стенде;

C_p – содержание элемента в рядовом угле.

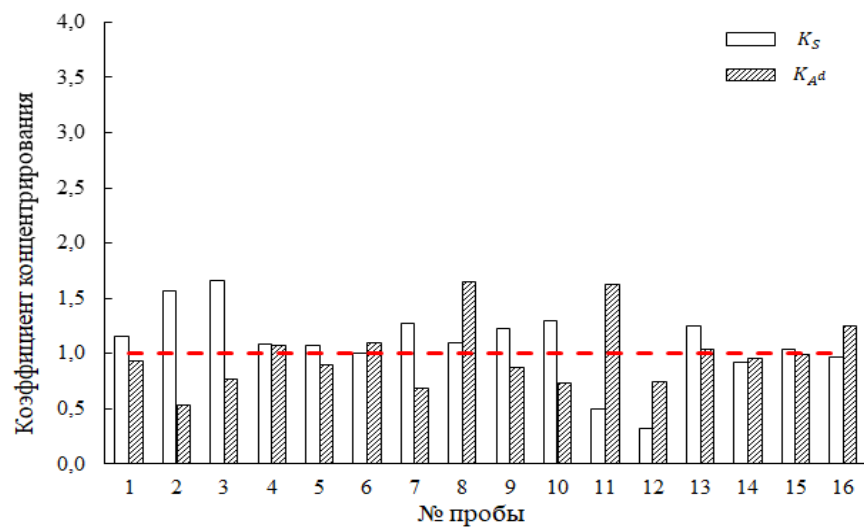
Полученные результаты представлены в таблице 17 и на рисунках 27-29. На рисунках нанесена линия, соответствующая коэффициенту концентрирования равного 1. Такое значение коэффициента указывает на

одинаковое содержание элемента, как в угле, так и во взвешенной пыли, то есть на отсутствие концентрирования – обеднения проб соответствующими элементами [103].

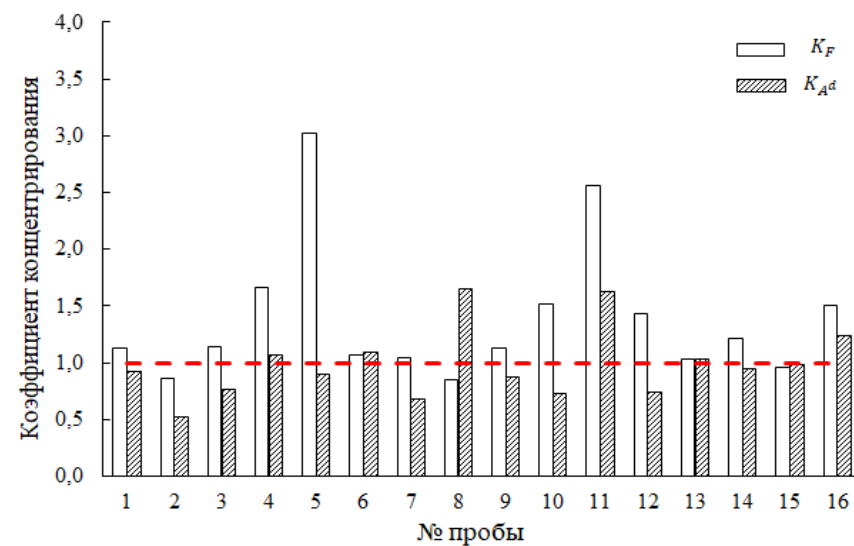
Таблица 17 – Коэффициенты концентрирования макро- и микроэлементов во взвешенной пыли [103]

Элементы	Взвешенная пыль, выделенная из рядовых углей:															
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16
	Коэффициенты концентрирования по показателю зольности K_K															
	0,9	0,5	0,8	1,1	0,9	1,1	0,7	1,6	0,9	0,7	1,6	0,7	1,0	0,9	1,0	1,2
	Коэффициенты концентрирования K_K элементов															
S	1,2	1,6	1,7	1,1	1,1	1,0	1,3	1,1	1,2	1,3	0,5	0,3	1,3	0,9	1,0	1,0
F	1,1	0,9	1,1	1,7	3,0	1,1	1,0	0,9	1,1	1,5	2,6	1,4	1,0	1,2	1,0	1,5
Hg	1,0	0,9	3,3	1,5	0,7	1,8	0,9	2,1	0,9	1,5	0,6	0,2	0,9	1,5	2,3	3,1
Al	1,3	0,5	0,8	1,7	0,9	1,1	0,8	1,3	0,9	0,6	1,3	1,0	1,3	0,7	1,0	1,3
As	1,5	1,7	2,2	1,0	0,9	1,4	0,9	1,5	1,0	1,2	0,8	1,2	1,2	1,1	0,6	2,3
B	12,0	0,7	0,7	1,9	0,8	1,2	2,3	0,5	0,8	0,5	0,4	0,8	1,7	1,1	1,0	1,1
Be	1,0	0,8	0,7	1,1	0,9	1,1	1,0	0,9	1,0	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0	1,1	1,0
Ca	0,6	0,7	1,3	0,6	1,9	2,1	1,3	2,6	0,8	2,2	2,9	1,4	1,5	1,6	0,7	2,0
Cd	-	-	-	1,4	-	1,9	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-
Co	1,0	0,8	1,4	1,0	1,0	2,1	0,9	1,2	1,2	1,0	1,9	0,6	0,9	0,6	1,3	0,8
Cr	1,4	0,9	0,7	1,1	0,7	1,0	0,8	1,6	1,0	1,1	1,0	0,5	1,2	1,6	1,3	0,6
Cu	1,3	1,0	0,9	2,0	1,2	1,5	2,9	1,1	1,9	1,6	0,9	0,3	0,9	2,4	0,8	0,9
Fe	0,5	0,1	1,0	0,6	0,6	1,5	0,7	4,2	0,5	0,6	3,3	0,7	1,0	1,3	0,7	1,4
Ga	0,9	0,7	0,8	1,8	0,9	1,1	0,9	1,2	1,0	0,9	1,1	0,8	1,0	0,8	0,9	1,3
K	1,2	0,4	0,6	1,1	0,7	1,0	0,8	2,2	1,1	0,8	1,0	0,7	1,1	0,9	1,1	1,3
Li	0,6	6,3	1,2	0,6	0,7	1,5	0,7	3,8	1,3	0,8	4,2	0,9	0,9	1,2	0,7	1,6
Mg	0,7	0,2	0,5	0,4	1,1	1,2	0,9	4,7	0,7	0,7	2,4	2,1	1,3	1,5	0,7	2,0
Mn	0,4	0,2	0,3	0,6	0,3	1,6	0,5	5,6	0,3	0,5	3,9	1,0	1,0	1,6	0,7	1,0
Mo	2,0	2,0	2,5	6,0	1,4	2,0	-	1,6	1,2	1,5	-	0,5	1,4	1,2	0,5	1,4
Na	1,3	0,3	0,6	0,6	0,8	1,5	0,4	5,7	0,5	0,8	1,0	2,1	0,9	1,0	0,7	1,2
Ni	1,3	1,5	1,0	4,7	1,0	1,7	1,1	1,2	1,4	1,4	1,1	0,6	1,1	1,6	0,7	1,0
P	1,2	1,1	1,6	1,1	2,3	1,2	1,1	0,6	0,9	2,1	2,2	2,2	1,1	1,1	0,7	1,4
Sr	1,1	0,6	0,9	0,8	0,6	0,8	0,8	0,6	0,7	1,4	0,8	0,8	1,0	1,1	0,6	1,7
Ti	1,3	0,8	0,7	1,1	0,9	1,0	0,8	1,3	1,0	1,1	1,2	0,6	1,2	1,2	1,0	1,0
V	1,2	1,3	0,9	1,2	1,1	1,2	1,0	1,8	1,3	1,1	1,1	0,7	1,3	1,6	1,1	0,8
Zn	1,2	0,6	1,6	1,5	0,8	1,5	1,6	1,5	1,2	3,6	2,4	0,9	1,4	2,1	0,4	2,0

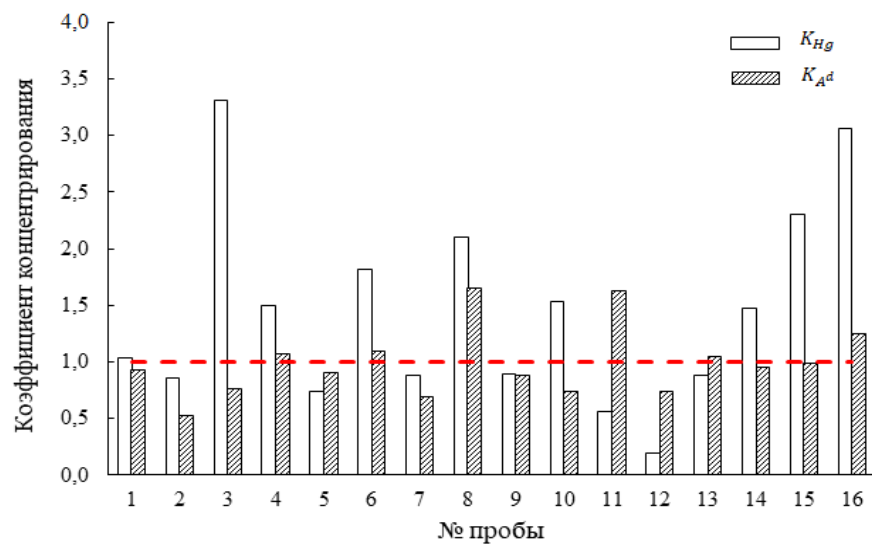
Наибольшими коэффициентами концентрирования зольности характеризуются пробы взвешенной пыли №8 и №11 - K_k для этих проб составляет 1,6. При этом во взвешенной пыли угля №8 происходит значительное концентрирование Hg, Ca, Cr, Fe, K, Li, Mg, Mn и Na, а во взвешенной пыли угля №11 при таком же концентрировании зольности (1,6), наблюдается концентрирование следующих элементов: F (2,6), Ca (2,9), Co (1,9) Fe (3,3), Li (4,2), Mg (2,4), Mn (3,9), P (2,2) и Zn (2,4). Однако в пробах взвешенной пыли №3 и №10 при значительном концентрировании S, F, Hg, As и Zn концентрирования зольности не происходит. Таким образом, отмечено, что концентрирование зольности не всегда приводит к концентрированию элементов, например, таких как S, F, Hg, As, Cr, Ni и V, что может говорить о частичном нахождении этих элементов в органической части в виде органоминеральных соединений [103].



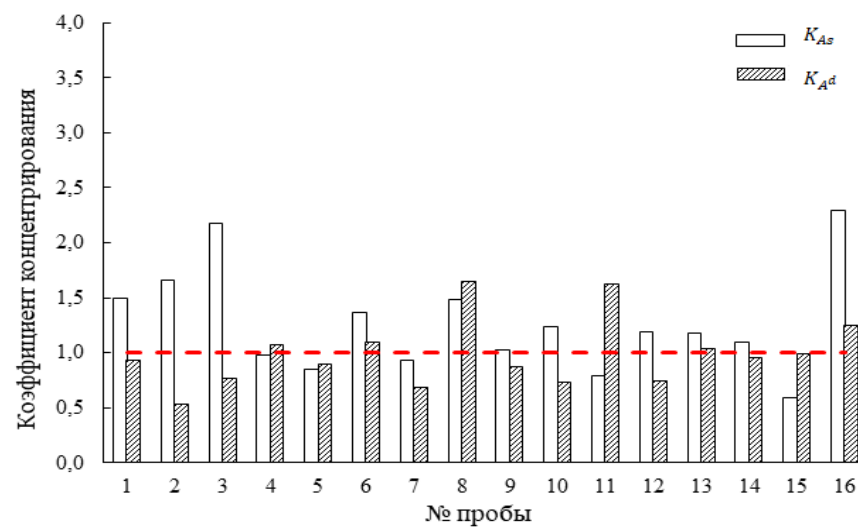
а)



б)



в)



г)

Рисунок 27 – Коэффициенты концентрирования серы (а), фтора (б), ртути (в) и мышьяка (г) во взвешенной пыли [103]

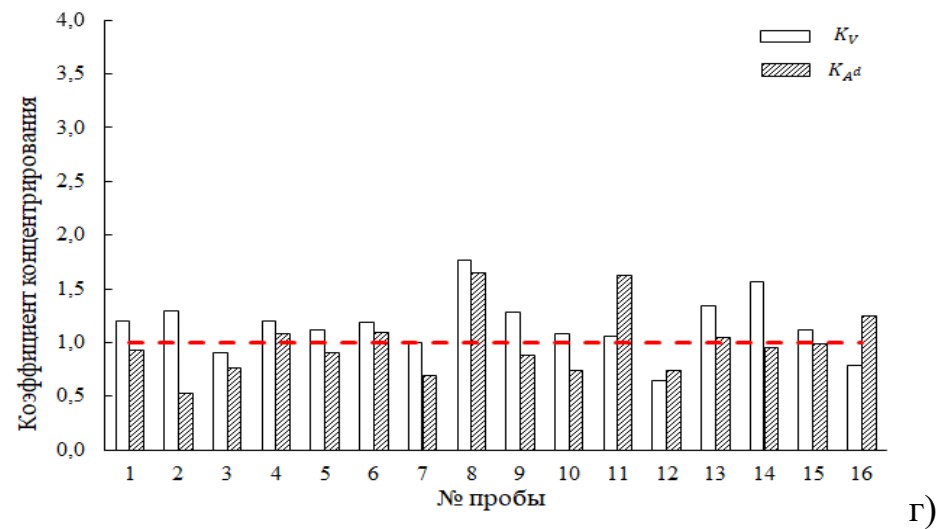
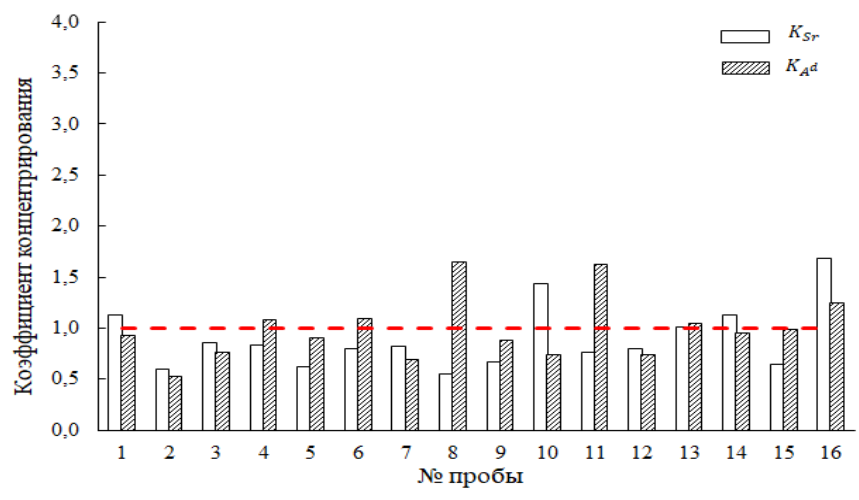
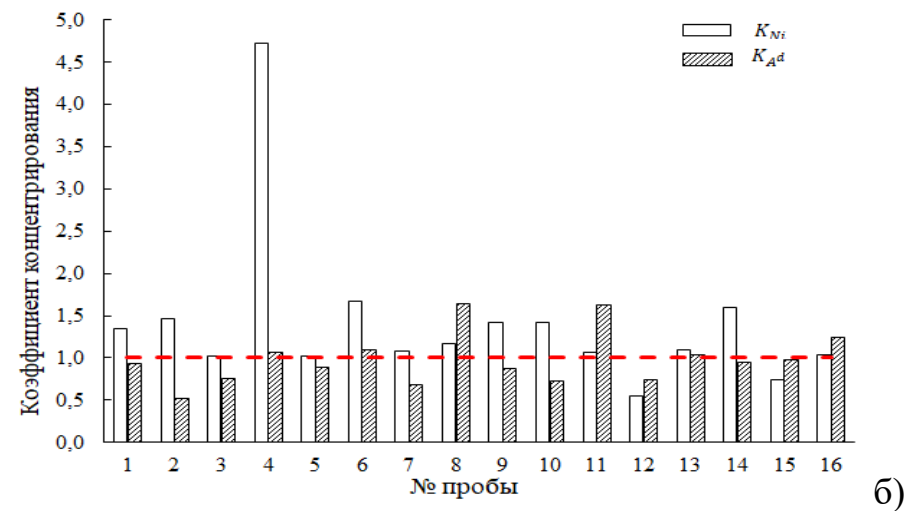
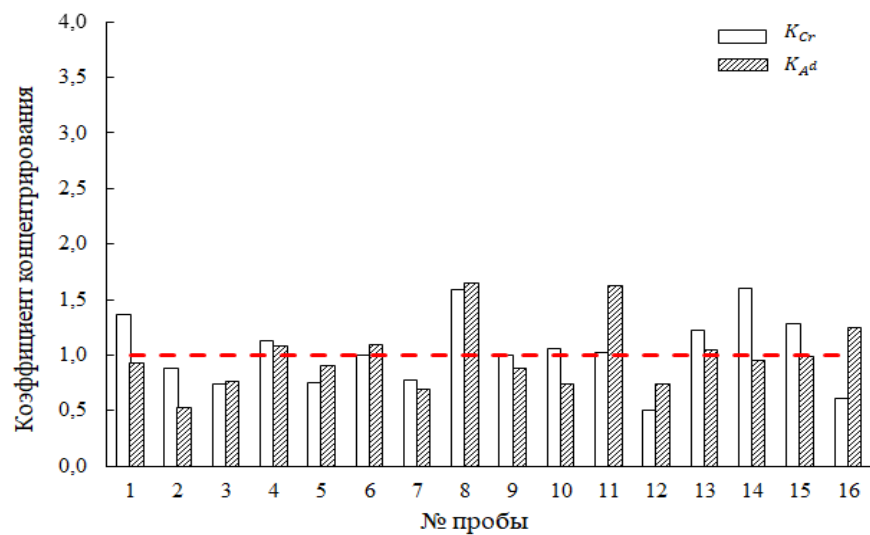


Рисунок 28 – Коэффициенты концентрирования хрома (а), никеля (б), стронция (в) и ванадия (г) во взвешенной пыли [103]

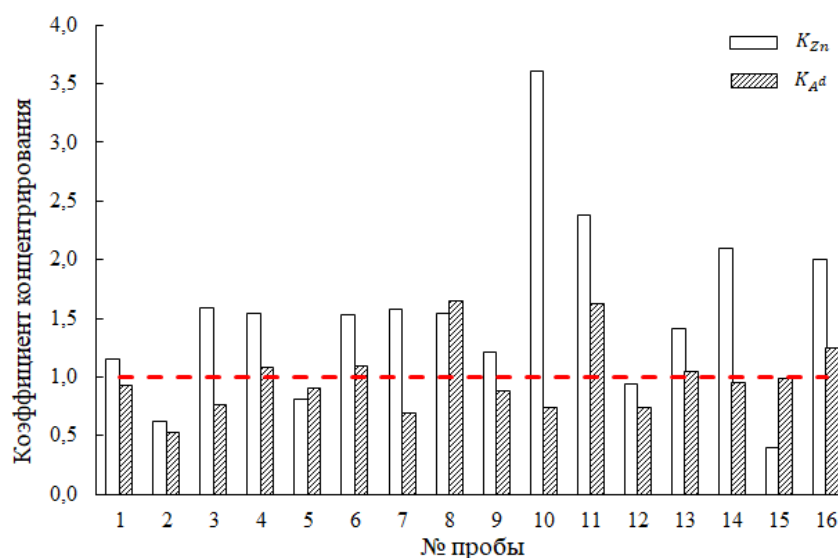


Рисунок 29 – Коэффициенты концентрирования цинка во взвешенной пыли [103]

Анализ рисунков 27-29 показал, что наибольшие коэффициенты концентрирования характерны для таких элементов как: F (от 1,1 до 3,0), Hg (от 1,5 до 3,3), As (от 1,1 до 2,3), и Zn (от 1,2 до 3,6). Для Ni обнаружен разовый выброс коэффициента концентрирования в пробе взвешенной пыли №4 (4,7). Также на рисунках 31-33 отчетливо видно, что концентрирование или обеднение ПОЭ во взвешенной пыли, не всегда сопровождается концентрированием зольности, что, по всей видимости, связано с формами нахождения ПОЭ в угле.

Показано, что концентрирование макро- и микроэлементов в пробах взвешенной пыли, как правило, не связано с увеличением зольности взвешенной пыли по сравнению с углем, что свидетельствует о частичном нахождении этих элементов как в минеральной, так и в органической части в виде органоминеральных соединений.

Для таких элементов как (Al, Fe, Ca, Mg, Na и K) их концентрирование во взвешенной пыли (рисунок 30) связано с увеличением зольности пыли по сравнению с углем, что указывает на то, что эти элементы приурочены в основном к минеральной части углей [103].

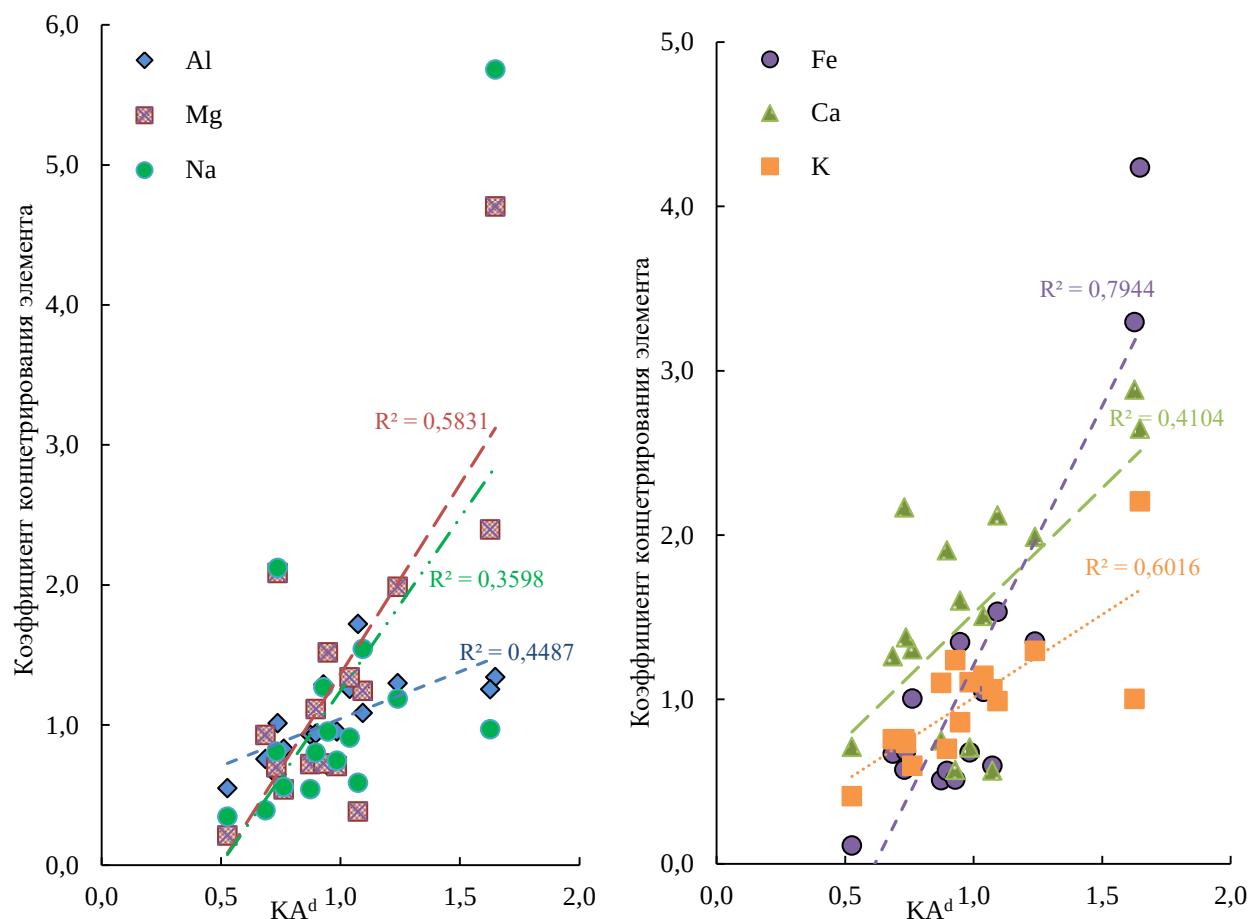


Рисунок 30 – Концентрирование зольности и Al, Fe, Ca, Mg, Na и K элементов во взвешенной пыли [103]

4.5 Оценка форм нахождения потенциально опасных элементов в углях

Полученные данные о коэффициентах концентрирования ПОЭ в угольной пыли позволяют оценивать обогащение или обеднение ее элементами для расчета, например, их выбросов в окружающую среду в разных технологических процессах. Сопоставления коэффициентов концентрирования с изменением зольности пыли позволяет делать предварительные оценки о формах нахождения элементов в углях.

Для более объективной оценки форм нахождения ПОЭ использовали метод, описанный в п. 2.2.2 диссертационной работы. Суть метода заключается в последовательном разделении пробы угля в тяжелых жидкостях различной плотности и определении зольности и содержания

серы, фтора и ртути во всплывших фракциях и остатке после последнего расслоения.

Для проведения фракционного анализа использовали пластовые пробы углей крупностью менее 3 мм Буреинского угольного бассейна (№№15,16).

Результаты фракционного анализа приведены в таблицах 18.

Для проведения фракционного анализа пластовых проб Буреинского угольного бассейна (№№15,16) предварительно из класса 0-3 мм был произведен отсев класса 0-1 мм, полученный остаток разделяли в растворе хлористого цинка ($ZnCl_2$) с плотностью <1300 кг/м³, 1300-1400 кг/м³, 1400-1500 кг/м³, 1500-1600 кг/м³, 1600-1700 кг/м³, >1700 кг/м³ (таблица 18).

Таблица 18 – Результаты фракционного анализа проб углей №№15,16 Буреинского угольного бассейна

№ пробы	Плотность фракций, кг/м ³	Выход фракций, %
15	Класс 1 – 3 мм	100,00
	<1300	14,02
	1300-1400	17,62
	1400-1500	19,40
	1500-1600	15,80
	1600-1700	10,95
	>1700	22,21
16	Класс 1 – 3 мм	100,00
	<1300	12,66
	1300-1400	14,80
	1400-1500	14,98
	1500-1600	24,69
	1600-1700	15,61
	>1700	17,26

Примечание: Результаты рассчитаны на 100% класса 1-3 мм.

Полученные результаты фракционного анализа, зольности и содержания в продуктах разделения серы, фтора и ртути, позволили рассчитать приведенные (относительные) концентрации (Y_i) и извлечение элементов во фракцию (U) (таблица 19).

Приведенную (относительную) концентрацию (Y_i) элемента во фракцию рассчитывали по формуле (5). Приведенную (относительную) концентрация ($Y_i \geq 1$) принято называть концентратором элемента.

$$Y_i = \frac{C_{ig}}{C_{oi}} \quad (5)$$

где C_{ig} – содержание элемента во фракции; C_{oi} – содержание элемента в исходном угле.

Для более точной оценки распределения макро- и микроэлементов в углях был рассчитан такой показатель как извлечение элементов во фракцию (U). Извлечение элемента во фракцию $\geq 50\%$ принято называть носителем элемента.

$$U = Y_i \cdot \gamma \quad (6)$$

где Y_i – приведенная (относительная) концентрация элемента во фракцию, γ – выход фракции, %.

Таблица 19 – Приведенная концентрация и извлечение элементов во фракцию для проб углей №№15,16 Буреинского угольного бассейна [103]

№ пробы	Плотность фракций, кг/м ³	Зольность	S		F		Hg	
		Y_i	Y_i	$U, \%$	Y_i	$U, \%$	Y_i	$U, \%$
15	Класс 1 – 3 мм	39,0 %	0,26 %		230 г/т		0,011 г/т	
	<1300	0,2	1,6	23	0,2	2	0,7	9
	1300-1400	0,5	1,4	25	0,5	8	0,7	13
	1400-1500	0,8	1,0	20	0,7	14	0,9	18
	1500-1600	1,1	0,9	14	1,0	16	1,1	18
	1600-1700	1,4	0,7	8	1,3	14	1,0	11
	>1700	1,8	0,5	10	2,0	45	1,4	31
16	Класс 1 – 3 мм	37,3 %	0,27 %		227 г/т		0,008 г/т	
	<1300	0,1	1,6	20	0,2	2	0,5	6
	1300-1400	0,4	1,3	20	0,4	6	0,9	13
	1400-1500	0,8	1,1	17	0,8	12	0,9	13
	1500-1600	1,1	1,0	24	1,0	25	0,9	22
	1600-1700	1,4	0,8	12	1,3	21	1,0	16
	>1700	1,9	0,4	8	1,9	34	1,7	29

Примечание: Y_i – приведенная (относительная) концентрация элемента во фракцию, U – извлечение элементов во фракцию.

Анализ полученных результатов для проб №№15 и 16 Буренинского угольного бассейна (таблица 21) показал, что наибольшее концентрирование зольности в пробах №№15-16 приходится на фракцию $>1700 \text{ кг/м}^3$.

Концентратором серы в пробах углей №№15-16 Буреинского угольного бассейна является фракция плотностью $<1300 \text{ кг/м}^3$, на это указывает суммарное извлечение в более легкие фракции. Так для пробы №15 суммарное извлечение в более легкие фракции (менее 1500 кг/м^3) составляет 68%, а для пробы №16 - 57%, что дает основание полагать, что сера в основном приурочена к органической части этих углей.

Концентратором фтора в углях №№15,16 является фракция плотностью $>1700 \text{ кг/м}^3$. Суммарное извлечение фтора во фракцию более $>1500 \text{ кг/м}^3$ составляет 75% для пробы №15 и 80% для пробы №16, что указывает на то, что фтор преимущественно находится в минеральной части углей.

Концентратором ртути, как и фтора, является фракция плотностью $>1700 \text{ кг/м}^3$. Суммарное извлечение ртути в более тяжелые фракции (более 1500 кг/м^3) составляет 60% для пробы №15 и 67% для пробы №16, что позволяет приурочить ртуть преимущественно к минеральной части. Указанные закономерности наглядно отражены на рисунках 31-32, где показана высокая степень корреляции между зольностью и извлечением серы, фтора и ртути во фракции разной плотности.

Полученные данные позволяет сделать вывод, что сера преимущественно приурочена к органической части угля, а фтор и ртуть в рассматриваемых пробах углей присутствуют в основном в минеральных формах.

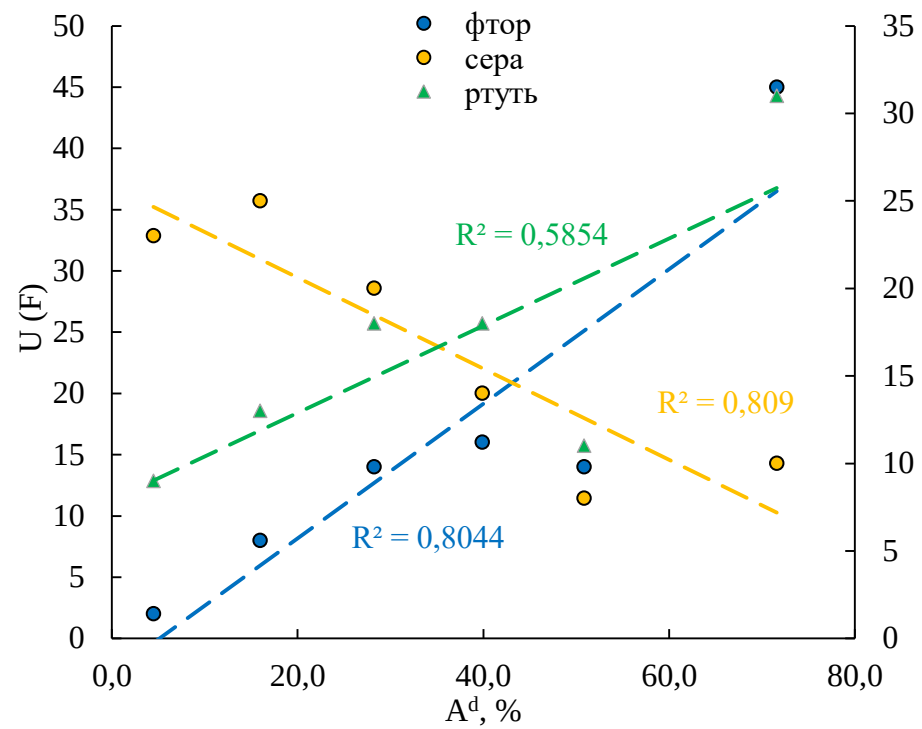
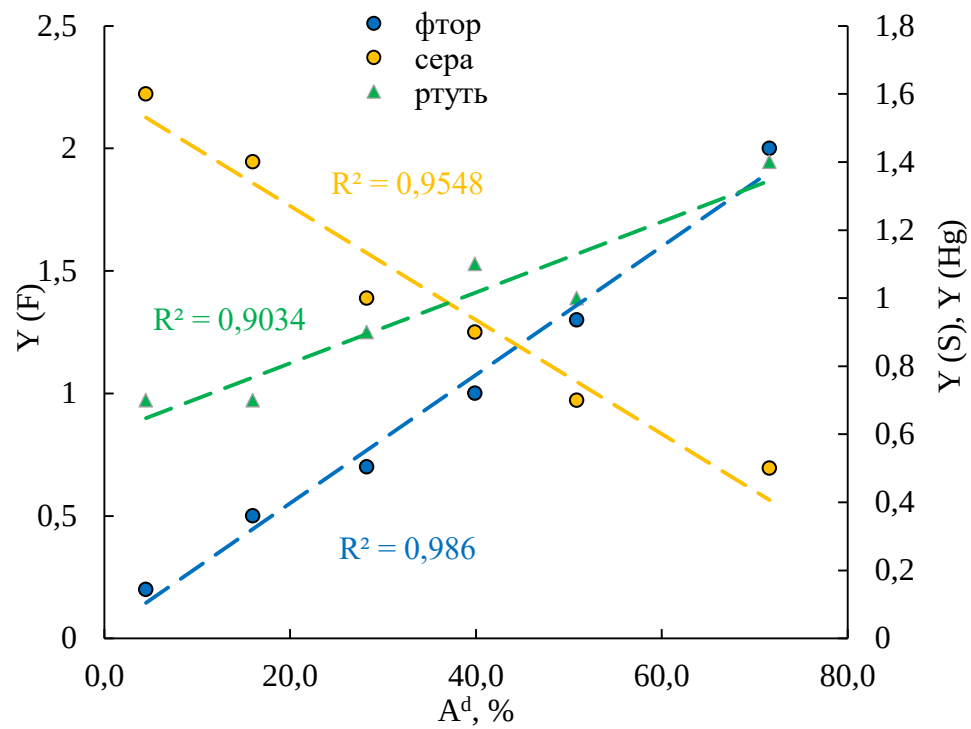


Рисунок 31 – Взаимосвязь между зольностью, концентрированием элементов и их извлечением во фракции разной плотности угля №15 Буреинского угольного бассейна

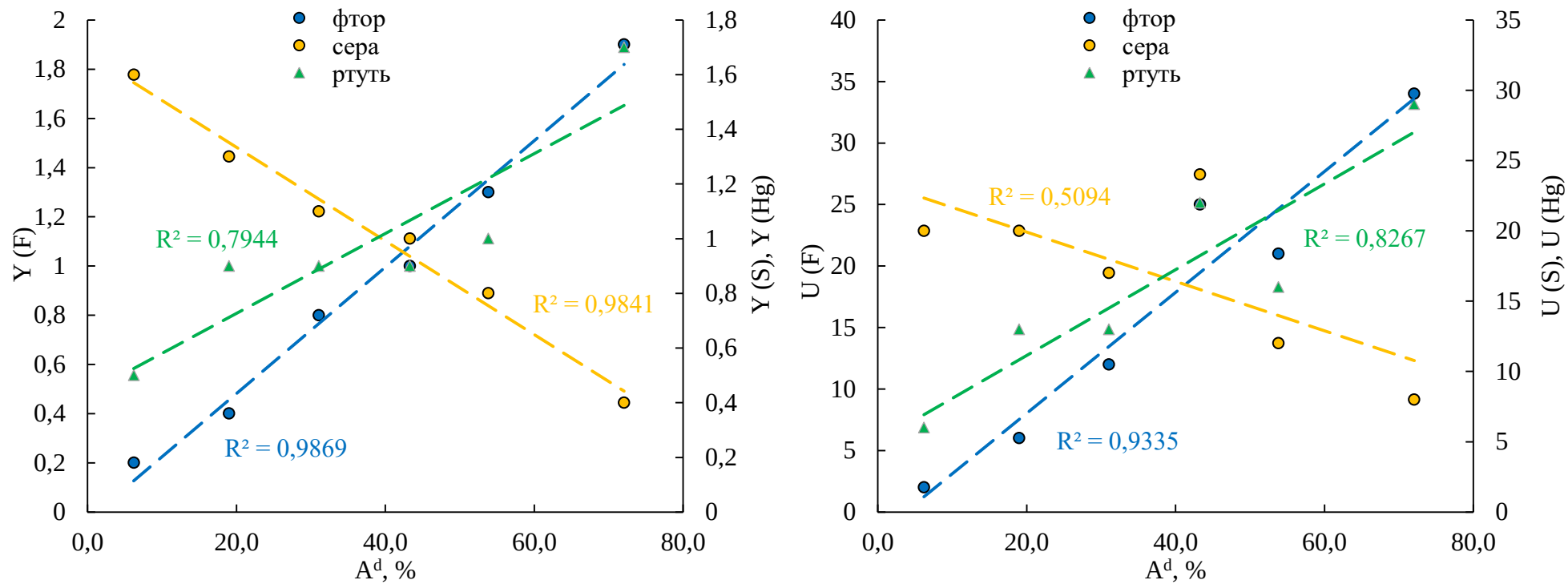


Рисунок 32 – Взаимосвязь между зольностью, концентрированием элементов и их извлечением во фракции разной плотности угля №16 Буреинского угольного бассейна

4.6. Прогноз концентрирования в угольной пыли потенциально опасных элементов

Для прогноза концентрирования ПОЭ в угольной пыли, полученные данные по извлечению серы, фтора и ртути во фракциях различной плотности были сопоставлены с данными по концентрированию этих элементов во взвешенной пыли, выделенной из рядовых углей на специализированном испытательном стенде (таблица 20).

Таблица 20 – Сопоставление данных концентрирования элементов во взвешенной пыли и данных о формах их нахождения

№ пробы	Коэффициент концентрирования зольности и элементов во взвешенной пыли, выделенной из углей				S	F	Hg
					Плотность фракции > 1500 кг/м ³		
	A ^d	S	F	Hg	U, %	U, %	U, %
15	1,0	1,0	1,0	2,3	32	75	60
16	1,2	1,0	1,5	3,1	44	80	69

Для пробы угля №15 Буреинского угольного бассейна, извлечение во фракции >1500 кг/м³ для фтора и ртути составляет 75% и 60% соответственно. Во взвешенной пыли, выделенной из пробы №15, концентрирования зольности не происходит, однако отмечено значительное концентрирование ртути ($K_{Hg} = 2,3$). Такое обогащение взвешенной пыли ртутью, скорее всего, связано с тем, что 40% ртути находится в органической части угля.

Извлечение во фракцию >1500 кг/м³ фтора и ртути в угле №16 составляет 80% и 67%, при этом во взвешенной пыли наблюдается концентрирование зольности, фтора и ртути.

Извлечение серы во фракцию >1500 кг/м³ для пробы №15 составляет 32%, а для пробы №16 – 44 %, что свидетельствует о приуроченности серы преимущественно к органической части угля. Это факт подтверждается

данными об отсутствии концентрирования серы во взвешенной пыли проб №15 и 16.

Таким образом, полученные данные о формах нахождения ПОЭ в пластовых пробах углей позволяют прогнозировать на стадии разведки и эксплуатации угольных месторождений возможное обогащение угольной пыли, образующейся при добыче и переработке углей, потенциально опасными элементами. Такая информация, совокупно с результатами определения коэффициентов концентрирования, позволит оценивать риски загрязнения почв и водных объектов на территориях, прилегающих к предприятиям по добыче, переработке и перевалке углей.

Выводы:

1) Проведены экспериментальные работы по определению содержания макро- и микроэлементов в рядовых углях и выделенной из них взвешенной пыли.

2) Показано, что окисленность углей разных стадий метаморфизма приводит к концентрированию в них таких ПОЭ как ртуть и стронций. Установлено, что верхние границы диапазонов содержания макро- и микроэлементов во взвешенной пыли, в целом, выше, чем в рядовых углях, при этом максимальное содержание макро- и микроэлементов в пробах взвешенной пыли не всегда соответствует максимальному содержанию этих элементов в рядовых углях.

3) Рассчитаны коэффициенты концентрирования, позволяющие оценивать перераспределение потенциально опасных элементов между углем и угольной пылью. Установлено, что наибольшие коэффициенты концентрирования характерны для таких элементов как фтор (от 1,1 до 3,0), ртуть (от 1,5 до 3,3), мышьяк (от 1,1 до 2,3) и цинк (от 1,2 до 3,6). Показано, что концентрирование потенциально опасных микроэлементов в пробах взвешенной пыли в отличие от золообразующих элементов, не всегда связано с увеличением зольности пыли по сравнению с углем, что предположительно свидетельствует о разных формах нахождения этих элементов в углях.

4) Показано, что полученные данные о формах нахождения ПОЭ в пластовых пробах углей позволяют прогнозировать на стадии разведки и эксплуатации угольных месторождений возможное обогащение угольной пыли, образующейся при добыче и переработке углей, потенциально опасными элементами.

Глава 5 Рекомендации по применению полученных результатов

На основании полученных в диссертационной работе результатов сформулированы следующие рекомендации.

Информация о количественном содержании взвешенной пыли в углях, в том числе частиц с размерами менее 10 мкм, полученная с использованием предложенного методического и инструментального обеспечения, может быть использована для достоверных расчетов выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду. На основании полученных данных о количественном содержании взвешенной пыли и ее гранулометрическом составе рассчитаны коэффициенты K_1 и K_2 (таблица 21), отражающие дисперсность материала и используемые при расчете выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух [98]. Следует отметить, что в соответствии с методическими указаниями по расчету выбросов загрязняющих веществ /пыли/ в атмосферу при складировании и перегрузке сыпучих материалов на предприятиях морского и речного флота коэффициенты K_1 и K_2 для углей имеют фиксированные значения 0,03 и 0,02 соответственно.

Количественное содержание частиц PM10 в угле определяется по формуле:

$$\gamma_{p10} = \gamma_p \cdot \frac{C_{PM10}}{100}, \quad (7)$$

где γ_{p10} – содержание взвешенной пыли с размерами частиц менее 10 мкм в пересчете на уголь.

Содержание пылевой фракции γ_{200} , (с размерами частиц менее 200 мкм) определяли по ГОСТ 2093.

По данным содержания пылевой фракции ($\gamma_{200},\%$) и взвешенной пыли с размерами частиц менее 10 мкм ($\gamma_{p10},\%$) были рассчитаны коэффициенты, учитывающие дисперсность материала, для оценки выбросов загрязняющих веществ (угольной пыли) в атмосферный воздух (таблица 21).

Коэффициент K_1 –массовая доля пылевой фракции в материале, рассчитывается по соотношению:

$$K_1 = \gamma_{200}/100, \quad (8)$$

Коэффициент K_2 – доля аэрозольной пыли с размерами частиц менее 10 мкм в пылевой фракции. В соответствии с имеющимися данными коэффициент K_2 можно оценить по соотношению:

$$K_2 = \gamma_{p10}/\gamma_{200}, \quad (10)$$

Таблица 21 – Коэффициенты, характеризующие дисперсность углей [98]

Проба угля №	$\gamma_{200},\%$	$\gamma_{p10},\%$	K_1 , отн.ед.	K_2 , отн.ед.
1	6,6	0,11	0,07	0,02
2	6,4	0,19	0,06	0,03
3	1,1	0,03	0,01	0,03
4	6,2	0,37	0,06	0,06
5	5,1	0,18	0,05	0,04
6	3,1	0,13	0,03	0,04
7	3,1	0,09	0,03	0,03
8	0,7	0,03	0,01	0,04
9	2,2	0,05	0,02	0,02
10	2,9	0,07	0,03	0,02
11	3,8	0,33	0,04	0,09
12	18,4	0,51	0,18	0,03
13	1,5	0,07	0,01	0,05
14	1,2	0,04	0,01	0,03

Из таблицы 21 видно, что фактически рассчитанные коэффициенты K_1 и K_2 для всех углей различаются. Диапазон изменения коэффициента K_1 составляет 0,01 – 0,18, K_2 – 0,02 – 0,09. Следовательно, значения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, рассчитанные по фактически

определенным коэффициентам K_1 и K_2 , могут существенно отличаться от рассчитанных по фиксированным в большую или меньшую сторону [98].

Метод контроля содержания и гранулометрического состава пыли используется на АО «УК Кузбассразрезуголь» для выбора химических реагентов при проведении мероприятий по пылеподавлению. Для этого предварительно из проб товарных углей выделяют подрешеточный продукт после сита 3 мм (далее проба), полученный при промышленном ситовом анализе по ГОСТ 2093. Пробу испытывают на специализированном стенде для определения в ней количественного содержания взвешенной пыли. Далее полученное количественное содержание взвешенной пыли пересчитывают на уголь с учетом выхода класса менее 3 мм по результатам ситового анализа. Следующим этапом является подготовка пробы угля (подрешеточный продукт после сита 3 мм, полученный при промышленном ситовом анализе) для обработки реагентами с учетом расходов, соответствующих промышленному использованию. После этого обработанную пробу также испытывают на специализированном стенде и определяют изменение количественного содержания взвешенной пыли по сравнению с необработанным углем. По изменению содержания взвешенной пыли рассчитывают показатели, свидетельствующие об эффективности применения реагентов, и рассчитывают их оптимальные расходы. Применение данного метода позволяет выбирать и оценивать оптимальное количество реагента для пылеподавления в зависимости от содержания взвешенной пыли в угле.

Разработанная и аттестованная методика по определению гранулометрического состава проб угольной пыли методом лазерной дифракции была использована для разработки стандартного образца состава угля каменного Кузнецкого бассейна (УК-2 СО МИСиС) ГСО 12118-2023, в части дополнительной характеристики - объемной доли частиц с размером от 10 до 50 мкм. Методика используется ООО «Фритч Лабораторные приборы» для калибровки анализаторов размеров частиц и

проведения измерений гранулометрического состава угольной пыли разного происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача получения надежной информации о содержании в рядовых углях взвешенной пыли разного гранулометрического состава и концентрировании в ней потенциально опасных макро- и микроэлементов, что является важным для расчета выбросов в окружающую среду загрязняющих веществ при добыче, транспортировке и перевалке углей.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Разработан метод контроля содержания и гранулометрического состава пыли в рядовых и товарных углях для оценки загрязнения окружающей среды угольной пылью при добыче и переработке углей. Метод включает в себя: улавливание взвешенной пыли на специализированном испытательном стенде и определение ее количественного содержания и гранулометрического состава.

2. Разработана и аттестована методика определения гранулометрического состава проб угольной пыли методом лазерной дифракции. Проведены экспериментальные работы по обоснованию условий проведения измерений и метрологических характеристик результатов измерений.

3. Применение разработанного метода контроля содержания и гранулометрического состава пыли для исследования рядовых углей позволило установить, что содержание взвешенной пыли в рядовых углях разного метаморфизма и петрографического состава варьируется от 0,2 до 2,6%, а содержание в них пыли с размером частиц менее 10 мкм - от 0,03 до 0,51%.

4. На основании экспериментальных исследований установлено, что содержание пылевой фракции, взвешенной пыли, в том числе с размерами менее 10 мкм в рядовых углях, характеризуется значительным разбросом

значений для углей близких стадий метаморфизма и не зависит от их петрографического состава. Это затрудняет прогноз загрязнения окружающей среды угольной пылью в зависимости от вещественного состава и метаморфизма добываемых углей.

5. Проведены исследования по определению влияния окисленности рядовых углей, отобранных от сближенных пластов в зоне окисления и вне ее, на содержание в них пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм. Для углей средней стадии метаморфизма окисленность углей приводит к увеличению содержания пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм. Для углей высокой стадии метаморфизма, отобранных из одного пласта с участков вне зоны окисления и в зоне окисления, окисленность приводит к снижению содержания пылевой фракции, взвешенной пыли и частиц с размером менее 10 мкм.

6. Показано, что окисленность углей разных стадий метаморфизма приводит к концентрированию в них таких ПОЭ как ртуть и стронций. Установлено, что верхние границы диапазонов содержания макро- и микроэлементов во взвешенной пыли, в целом, выше, чем в рядовых углях, при этом максимальное содержание макро- и микроэлементов в пробах взвешенной пыли не всегда соответствует максимальному содержанию этих элементов в рядовых углях.

7. Рассчитаны коэффициенты концентрирования, позволяющие оценивать перераспределение потенциально опасных элементов между углем и угольной пылью. Установлено, что наибольшие коэффициенты концентрирования характерны для таких элементов как фтор (от 1,1 до 3,0), ртуть (от 1,5 до 3,3), мышьяк (от 1,1 до 2,3) и цинк (от 1,2 до 3,6). Показано, что концентрирование потенциально опасных микроэлементов в пробах взвешенной пыли в отличие от золообразующих элементов, не всегда связано с увеличением зольности пыли по сравнению с углем, что предположительно свидетельствует о разных формах нахождения этих элементов в углях.

8. Разработан метод определения форм нахождения потенциально опасных элементов в углях. Метод заключается в последовательном разделении пробы угля в тяжелых жидкостях различной плотности и определении зольности и содержания серы, фтора и ртути во всплывших фракциях и остатке после последнего расслоения.

9. Разработаны рекомендации по применению полученных результатов, в том числе для: расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух; контроля технологических процессов пылеподавления с использованием реагентов; разработки стандартных образцов угольной пыли.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь – июнь 2022 года // Уголь. 2022. № 9. С. 7-22. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-7-22>.
2. Analytical report «Economic and environmental problems of the development of Russian coal terminals» [Electronic resource] // Institute of Problems of Natural Monopolies. 2018. – Access mode: http://www.ipem.ru/files/files/research/20181001_research_coal_terminals.pdf. - [01.08.2022].
3. Кожевникова О.М., Московая И.В., Похил П.Е. Проблемы борьбы с пылью на морских угольных терминалах // Научный журнал «GLOBUS»: Технические науки #3(39), 2021.
4. Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах // М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011.- 256 с., ил. (Серия «Библиотека горного инженера». Т.6 «Промышленная безопасность». Кн.9.
5. Гаврилова Д.И. Применение пленкообразующих полимерных веществ для пылеподавления и снижения окисляемости углей при их хранении и транспортировке: дис. канд. техн. наук: 1.6.21. - НИТУ МИСИС, Москва, 2020 - 111 с.
6. Guang Xu, Yinping Chen, Jacques Eksteen, Jialin Xu. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors // Science of The Total Environment. Volume 639, 15 October 2018, Pages 1060-1076.
7. Qun Zhou , Guang Xu, Yinping Chen, Botao Qin, Zidong Zhao, Chuwen Guo. The development of an optimized evaluation system for improving coal dust

suppression efficiency using aqueous solution sprays // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Volume 602, 5 October 2020, 125104.

8. Guang Xu, Yinping Chen, Jacques Eksteen, Jialin Xu. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors // Science of The Total Environment. Volume 639, 15 October 2018, Pages 1060-1076.

9. Qun Zhou , Guang Xu, Yinping Chen, Botao Qin, Zidong Zhao, Chuwen Guo. The development of an optimized evaluation system for improving coal dust suppression efficiency using aqueous solution sprays // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Volume 602, 5 October 2020, 125104.

10. Wenjin Niu , Wen Nie, Qiu Bao, Qifan Tian, Ruoxi Li., Xiaohan Zhang , Xiao Yan, Jie Lian. Development and characterization of a high efficiency bio-based rhamnolipid compound dust suppressant for coal dust pollution control // Environmental Pollution, August 2023, 121792. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121792.

11. Ворошилов Я.С., Ворошилов Я.С. Влияние угольной пыли на профессиональную заболеваемость работников угольной отрасли // Уголь. Апрель, 2019. С.20-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2019-4-20-24>.

12. Фомин А.И., Ворошилов Я.С., Палеев. Д.Ю. Исследование влияния угольной пыли на безопасность ведения горных работ // Горная Промышленность. №1 (143), 2019. С.33-36.

13. Бородачев Н.М. Токсичные свойства угольной пыли как фактор негативного воздействия на работников угледобывающей // Сборник материалов XIV международной научно-практической конференции. Кемерово, 2021.

14. Руководство Р 2.2.2006-05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация

условий труда». Утверждено Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко, 29 июля 2005 г.

15. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации. Постановление от 28 января 2021 года N 2. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

16. Panov G.E. Dust formation kinetics as a function of the principal mechanical properties of coals // Soviet Mining Science, 1967. Vol. 3, № 5. P. 511–514. DOI: 10.1007/BF02497948.

17. Zipf R.K., Bieniawski Z.T. Estimating the crush zone size under a cutting tool in coal // International Journal of Mining and Geological Engineering 1988 6:4, 1988. Vol. 6, № 4. P. 279–295. DOI: 10.1007/BF00880927.

18. Baafi E.Y., Ramani R.V. Rank and maceral effects on coal dust generation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979. Vol. 16, № 2. P. 107–115. DOI: 10.1016/0148-9062(79)91447-5.

19. Hower J.C., Graese A.M., Klapheke J.G. Influence of microlithotype composition on hardgrove grindability for selected eastern Kentucky coals // International Journal of Coal Geology, 1987. Vol. 7, № 3. P. 227–244. DOI: 10.1016/0166-5162(87)90038-3.

20. Organiscak J.A., Page S.J. Laboratory investigation of coal grindability and airborne respirable dust // Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa, 1993. Vol. 46, № 7. P. 98–105.

21. Hower J.C. Interrelationship of coal grinding properties and coal petrology // Minerals and Metallurgical Processing, 1998. Vol. 15, № 3. P. 1–16. DOI: 10.1007/BF03403218.

22. Page S.J., Organiscak J.A. Using proximate analysis to characterize airborne dust generation from bituminous coals // *Aerosol Science and Technology*, 2002. Vol. 36, № 6. P. 721–733. DOI: 10.1080/02786820290038393.
23. Bagherieh A.H., Hower J.C., Bagherieh A.R., Jorjani E. Studies of the relationship between petrography and grindability for Kentucky coals using artificial neural network // *International Journal of Coal Geology*, 2008. Vol. 73, № 2. P. 130–138. DOI: 10.1016/j.coal.2007.04.002.
24. Organiscak J.A., Page S.J. Airborne Dust Liberation During Coal Crushing // *Coal Preparation*, 2000. Vol. 21, № 5–6. P. 423–453. DOI: 10.1080/07349340108945630.
25. Page S.J., Organiscak J.A., Quattro J. Coal proximate analyses correlation with airborne respirable dust // *Fuel*, 1993. Vol. 72, № 7. P. 965–970. DOI: 10.1016/0016-2361(93)90293-B.
26. Page S.J., Organiscak J.A. Suggestion of a cause-and-effect relationship among coal rank, airborne dust, and incidence of workers' pneumoconiosis // *Aihaj*, 2000. Vol. 61, № 6. P. 785–787.
27. Kossovich E.L., Borodich F.M., Epshtein S.A., Galanov B.A., Minin M.G., Prosina V.A. Mechanical, structural and scaling properties of coals: depth-sensing indentation studies // *Applied Physics A*, 2019. Vol. 125, № 3. P. 195. DOI: 10.1007/s00339-018-2282-1.
28. Ren Q., Zhang Y., Arauzo I., Shan L., Xu J., Wang Y., Su S., Hu S., Xiang J. Roles of moisture and cyclic loading in microstructures and their effects on mechanical properties for typical Chinese bituminous coals // *Fuel*, 2021. Vol. 293. P. 120408. DOI: 10.1016/J.FUEL.2021.120408.
29. Zhou W., Wang H., Wang D., Du Y., Zhang K., Kang W. The effect of coal proximate compositions on the characteristics of dust generation using a conical pick cutting system // *Powder Technology*, 2019. Vol. 355. P. 573–581. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.07.093.

30. Argatov I.I., Borodich F.M., Epshtein S.A., Kossovich E.L. Contact stiffness depth-sensing indentation: Understanding of material properties of thin films attached to substrates // *Mechanics of Materials*, 2017. Vol. 114. P. 172–179. DOI: 10.1016/j.mechmat.2017.08.009.

31. Агарков К. В., Эпштейн С. А., Коссович Е. Л., Добрякова Н. Н. Исследование низкотемпературных воздействий на механические свойства углей на микроуровне и склонность к образованию аэрозольной пыли // *Горный журнал*, 2022. №4. С. 66–72. DOI: 10.17580/gzh.2022.04.11.

32. Kossovich E.L., Epshtein S.A., Krasilova V.A., Hao J., Minin M.G. Effects of coals microscale structural features on their mechanical properties, propensity to crushing and fine dust formation // *International Journal of Coal Science and Technology*, 2022. Vol. in Press.

33. Коссович Е. Л., Эпштейн С. А., Бородич Ф. М., Добрякова Н. Н., Красилова (Просина) В. А. Взаимосвязи между неоднородностью распределения механических свойств углей на микро- и наноуровнях и их способностью к внезапным выбросам и разрушению // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 5. – С. 156–172. DOI: 10.25018/0236- 1493-2019-05-0-156-172.

34. Epshtein S.A., Borodich F.M., Bull S.J. Evaluation of elastic modulus and hardness of highly inhomogeneous materials by nanoindentation // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2015. Vol. 119, № 1. P. 325–335. DOI: 10.1007/s00339-014-8971-5.

35. Borodich F.M., Bull S.J., Epshtein S.A. Nanoindentation in Studying Mechanical Properties of Heterogeneous Materials // *Journal of Mining Science*, 2015. Vol. 51, № 3. P. 1062–7391. DOI: 10.1134/S1062739115030072.

36. Kossovich E.L., Borodich F.M., Bull S.J., Epshtein S.A. Substrate effects and evaluation of elastic moduli of components of inhomogeneous films by nanoindentation // *Thin Solid Films*. Volume 619, 30 November 2016, Pages 112–119.

37. Fender T.D., Rouainia M., Van Der Land C., Jones M., Mastalerz M., Hennissen J.A.I., Graham S.P., Wagner T. Geomechanical properties of coal macerals; measurements applicable to modelling swelling of coal seams during CO₂ sequestration // International Journal of Coal Geology, 2020. Vol. 228. P. 103528. DOI: 10.1016/j.coal.2020.103528.

38. Коссович Е.Л., Добрякова Н.Н., Эпштейн С.А., Белов Д.С. Определение механических свойств микрокомпонентов углей методом непрерывного индентирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2016. № 5. P. 84–91.

39. Kossovich E., Epshtein S., Dobryakova N., Minin M., Gavrilova D. Mechanical Properties of Thin Films of Coals by Nanoindentation // Physical and Mathematical Modeling of Processes in Geomedia, Moscow: IPMech RAS, 2018. P. 45–50. DOI: 10.1007/978-3-319-77788-7_6.

40. Trimble A.S., Hower J.C. Studies of the relationship between coal petrology and grinding properties // International Journal of Coal Geology, 2003. Vol. 54, № 3–4. P. 253–260. DOI: 10.1016/S0166-5162(03)00039-9.

41. Эпштейн С.А. Обоснование и разработка методов изучения структурных особенностей углей для определения динамики их свойств под влиянием внешних воздействий: дис. доктора тех. наук: 25.00.16. – Московский государственный Горный университет, Москва, 2009 - 224 с.

42. Hirsch P.B. X-Ray Scattering from Coals // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1954. Vol. 226, № 1165. P. 143–169. DOI: 10.1098/rspa.1954.0245.

43. Anna Marzec Macromolecular and molecular model of coal structure // Fuel Processing Technology, 14 (1986) 39-46.

44. Приказ от 28 января 2021 года № 59. Методика исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды.

45. Erol I., Aydin H., Didari V., Ural S. Pneumoconiosis and quartz content of respirable dusts in the coal mines in Zonguldak, Turkey // International Journal of Coal Geology, 2013. Vol. 116–117. P. 26–35. DOI: 10.1016/j.coal.2013.05.008.

46. Liu T., Liu S. The impacts of coal dust on miners' health: A review // Environmental Research, Academic Press Inc., 2020. Vol. 190. P. 109849. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109849.

47. ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

48. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации. МУК 4.3.3593-19. Методика измерений массовой концентрации угольной пыли и взвешенных частиц, в том числе аэрозолей фиброгенного действия, в атмосферном воздухе и в воздухе рабочей зоны гравиметрическим методом.

49. Руководящий документ 52.04.893-2020. Массовая концентрация взвешенных веществ в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений гравиметрическим методом.

50. РД 52.04.921-2022. «Массовая концентрация каменноугольной пыли в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом».

51. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля // Пермь: МНИИЭКО ТЭК, 2003. 116 с.

52. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ при сжигании угля и технологических процессов горного производства на предприятиях угольной промышленности // Пермь: МНИИЭКО ТЭК, 2014. 186 с.

53. Методика расчета выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей) // Люберцы: ННЦ ГП ИГД им. А.А. Скочинского, 1999. 35 с.

54. Жаберов С.В. Временные методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ /пыли/ в атмосферу при складировании и перегрузке сыпучих материалов на предприятиях речного флота. Методические указания // Белгород: БТИСМ, 1992. 35 с.

55. Жаберов С.В. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ /пыли/ в атмосферу при складировании и перегрузке сыпучих материалов на предприятиях морского и речного флота. Методические указания // Белгород: БГТУ, 1992. 40 р.

56. International standard ISO 20905. Coal preparation — Determination of dust/moisture relationship for coal. First edition 2004.07.15.

57. Эпштейн С. А., Коссович Е. Л., Вишневская Е. П., Агарков К. В., Колиух А. В. Определение общей аэрозольной и тонкодисперсной пыли в углях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 6. С. 5–14. DOI: 10.25018/02361493-2020-6-0-5-14.

58. Ting Liu, Shimin Liu. The impacts of coal dust on miners' health: A review // Environmental Research. Volume 190, November 2020, 109849.

59. Trechera P., Moreno T., Córdoba P., Moreno N., Zhuang X., Li B., Li J., Shangguan Y., Dominguez A. O., Kelly F., Querol X. Comprehensive evaluation of potential coal mine dust emissions in an open-pit coal mine in Northwest China // International Journal of Coal Geology, 2021. Vol. 235. P. 103677. DOI: 10.1016/J.COAL.2021.103677.

60. Lebedev A.A., Tikhonova O.A., Blinovskaya Ya.Yu., Chaika V.V., Kirianov A.V., Khristophorova N.K., Pikula K.S., Shevchenko V.P., Golokhvast K.S. Coal terminal impact on marine suspension composition: Nakhodka gulf (Japan sea) // Russian Journal of Hydrometeorology and Ecology, 2017. № 48. P. 195-201.

61. ГОСТ 2093-82 Топливо твердое. Ситовый метод определения гранулометрического состава // Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001.

62. ГОСТ 22662-77 Порошки металлические. Методы седиментационного анализа// Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001.

63. Буданова Т. Е., Озмидов О. Р., Озмидов И. О. Современные методы изучения гранулометрического состава грунтов // Инженерные изыскания, 2013. № 8. С.66-71.

64. Журавлева Н. В., Потокина Р. Р., Исмагилов З. Р. Определение гранулометрического состава угольных порошков методом лазерной дифракции // Химия твердого топлива. 2016. №5. С. 56-62.

65. Rui Zhang, Shimin Liu , Siyang Zheng. Characterization of nano-to-micron sized respirable coal dust: Particle surface alteration and the health impact // Journal of Hazardous Materialsю Volume 413, 5 July 2021, 125447.

66. Шпирт М.Я., Рашевский В.В. Микроэлементы горючих ископаемых. М.: Изд-во «Кучково поле». 2010. 383 с. (Библиотека горного инженера. Т. 5. Кн. 4). ISBN 978-5-9950009-1-4.

67. Dai S., Ren D., Chou C.L., Finkelman R.B., Seredin V. V., Zhou Y. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization // International Journal of Coal Geology2012. Vol. 94. P. 3–21. DOI: 10.1016/j.coal.2011.02.003.

68. Johann-Essex V., Keles C., Rezaee M., Scaggs-Witte M., Sarver E. Respirable coal mine dust characteristics in samples collected in central and northern Appalachia // International Journal of Coal Geology, 2017. Vol. 182, № March. P. 85–93. DOI: 10.1016/j.coal.2017.09.010.

69. Кара-Сал И.Д. Содержание тяжелых металлов в снежном покрове города Кызыла // Вестник Тывинского государственного университета. – 2009. – № 3. – С. 36–39. 11.

70. Galhardi J.A., García-Tenorio R., Díaz Francés I., Bonotto D.M., Marcelli M.P. Natural radionuclides in lichens, mosses and ferns in a thermal power plant and in an adjacent coal mine area in southern Brazil // Journal of

Environmental Radioactivity. Elsevier Ltd, 2017, vol. 16, pp. 43–53. DOI:10.1016/j.jenvrad.2016.11.009.

71. Bhuiyan M.A.H., Parvez L., Islam M.A., Dampare S.B., Suzuki S. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh // Journal of Hazardous Materials. 2010, vol. 173, № 1–3. pp. 384–392. DOI:10.1016/j.jhazmat.2009.08.085.

72. Zhou X., Bi X., Li X., Li S., Chen J., He T., Li Z. Fate of cadmium in coal-fired power plants in Guizhou, Southwest China: With emphasis on updated atmospheric emissions // Atmospheric Pollution Research. Elsevier B.V., 2020. vol. 11, № 5, pp. 920–927. DOI:10.1016/j.apr.2020.02.004.

73. Журавлева Н.В. Методы оценки влияния процессов добычи и переработки углей Кузнецкого угольного бассейна на экологическое состояние природной среды // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. Общество с ограниченной ответственностью ВостЭко. – 2016. – № 4. – С. 102–112.

74. R.M. Flores. Coal and Coalbed Gas: Fueling the Future // Elsevier Science & Technology Books. 2013.

75. Katia Martinello Marcos L.S. Oliveira Fernando A. Molossi Claudete G. Ramos Elba C. Teixeira Rubens M. Kautzmann Luis F.O. Silva. Direct identification of hazardous elements in ultra-fine and nanominerals from coal fly ash produced during diesel co-firing // Science of The Total Environment. Volumes 470–471, 1 February 2014, Pages 444–452.

76. Masto R.E., Joshy George, Rout T.K., Ram L.C. Multi element exposure risk from soil and dust in a coal industrial area // Journal of Geochemical Exploration. 176 (2017). P. 100–107. DOI:10.1016/j.gexplo.2015.12.009.

77. Gulsen Tozsın. Hazardous elements in soil and coal from the Oltu coal mine district, Turkey // International Journal of Coal Geology. September 2014. Volume 131. P. 1–6. DOI:10.1016/j.coal.2014.05.011.

78. Alcindo Neckel, Jorge Osorio-Martinez, Diana Pinto, Brian W. Bodah, Bashir Adelodun, Luis F.O. Silva. Hazardous elements present in coal nanoparticles in a Caribbean port region in Colombia // Science of The Total Environment. Volume 838, Part 3, 10 September 2022, 156363.

79. Вернадский В.И. Труды по геохимии /– Москва : Наука, 1994. — 494 с. — (Библиотека трудов академика В. И. Вернадского). — Имен. указ.: с. 486-487. — Пред. указ.: с. 488-492. — ISBN 5-02-003565-3.

80. Покровский М. П. О классификации форм нахождения элементов (к постановке задачи) // Ежегодник-2015, Тр. ИГГ УрО РАН, вып. 163, 2016, с. 119–125.

81. Клер В.Р., Ненахова В.П., Сапрыкин Ф.Я. и др. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Закономерности концентрации элементов и методы их изучения – М.: Наука, 1988, с.256.

82. ГОСТ 4790-2017 «Топливо твердое. Определение и представление показателей фракционного анализа. Общие требования к аппаратуре и методике» // Москва: Стандартинформ, 2018.

83. Юдович Я.Э. и Кетрис М.П. Фтор в углях. Обзор // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера», 2010, т.2, №1.

84. Дворникова А. Г., Кирикилица С. И. Ртутоносность углей Донецкого бассейна / Академия наук Украинской ССР (АН УССР), Институт минеральных ресурсов ; под ред. — Москва : Недра, 1987. — 158 с.: ил. — Библиогр.: с. 157.

85. Шпирт М.Я. Превращение ртути и ее соединений при переработке углей // Химия твердого топлива, 2002, №5, с.73-86.

86. Calkins W.H. The chemical forms of sulfur in coal: a review //Fuel. Volume 73, Issue 4, April 1994, Pages 475-484. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(94)90028-0).

87. Удалов И. В. Формы нахождения микроэлементов в каменных углях и антрацитах Северо-Восточного Донбасса вблизи ртутно-рудных тел // Dnipropetr. Univ. Bull. Ser.: Geol., geogr. 2015. 23(1), 137–143. doi: 10.15421/111517.

88. Dai Sh., Hower J.C., Finkelman R.B., Graham I.T., French D., Ward C.R., Esken G., Wei Q., Zhao L.. Organic associations of non-mineral elements in coal: A review // International Journal of Coal Geology. Volume 218, 1 February 2020, 103347. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103347>.

89. Арбузов С.И., Волостнов А.В. Формы концентрирования тория в углях // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 6.

90. Арбузов С.И., Ильенок С.С., Волостнов А.В., Маслов С.Г., Архипов В.С. Формы нахождения урана в углях и торфах Северной Азии // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 1.

91. Арбузов С.И., Финкельман Р.Б., Ильенок С.С., Маслов С.Г., Межибор А.М., Блохин М. Г. Формы нахождения редкоземельных элементов (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) в углях Северной Азии (обзор) // Химия твердого топлива, 2019, № 1, стр. 3-25. DOI: 10.1134/S002311771901002X.

92. ГОСТ Р 59248-2020. «Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний» // Москва: Стандартинформ, 2021.

93. ГОСТ Р 59252-2020. «Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод отбора пластовых проб» // Москва: Стандартинформ, 2020.

94. Эпштейн С.А., Красилова В.А., Добрякова Н.Н., Хао Цзе, Коссович Е.Л. Влияние окисленности каменных углей на содержание в них макро- и микроэлементов // Химическая промышленность сегодня. 1/2023. С. 45-51. DOI 10.53884/27132854_2023_1_45.

95. Красилова В.А., Коссович Е.Л., Гаврилова Д.И., Козырев М.М. Лабораторная установка для улавливания и концентрирования взвешенной

угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень.– 2022.– №6.– С.121–130. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_121.

96. Красилова В.А., Эпштейн С.А., Коссович Е.Л., Козырев М.М., Ионин А.А. Разработка методики измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5.

97. Zhuravleva N. V., Potokina R. R., Ismagilov Z. R. Determination of the granulometric composition of coal powders by laser diffraction analysis // Solid Fuel Chemistry, 2016. Т. 50. № 5. Р. 326–331. [In Russ]. DOI: 10.3103/S0361521916050104.

98 Эпштейн С.А., Красилова В.А., Коссович Е.Л., Смирнов А.С. Методическое и инструментальное обеспечение количественной оценки содержания в углях взвешенной пыли // Горный журнал, 2023, №6. С. 77-83. DOI: 10.17580/gzh.2023.06.11.

99. Kossovich E.L., Epshtein S.A., Golubeva M.D., Krasilova V.A. On using cyclic nanoindentation technique to assess coals propensity to fine dust formation // Mining informational and analytical bulletin, 2021. № 5. Р. 112–121. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_112.

100. Kossovich E.L., Borodich F.M., Epshtein S.A., Galanov B.A. Indentation of bituminous coals: Fracture, crushing and dust formation // Mechanics of Materials, 2020. Vol. 150, № August. P. 103570. DOI: 10.1016/j.mechmat.2020.103570.

101. Agarkov K. V., Epstein S.A., Kossovich E.L., Dobryakova N.N. Effects of low-temperature treatment on the coals mechanical properties microscale and airborne dust formation // Gornyi Zhurnal, 2022. P. 66–72. DOI: 10.17580/gzh.2022.04.11.

102. Красилова В.А., Эпштейн С.А., Коссович Е.Л., Смирнов А.С., Винников В.А. Содержание макро- и микроэлементов в углях и угольной пыли // Химическая промышленность сегодня». 3/2023. С. 68-76. DOI 10.53884/27132854_2023_3_68.

103. Красилова В.А., Эпштейн С.А., Коссович Е.Л. Оценка форм нахождения потенциально опасных элементов в углях // Двадцать четвертая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о земле» (Москва, 25- 29 сентября. С.142-145.

Приложение А

Методика измерений гранулометрического состава проб угольной пыли методом лазерной дифракции

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСИС» (НИТУ «МИСиС»)**

ООО «Фритч Лабораторные приборы»

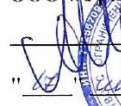
СОГЛАСОВАНО

Проректор по науке
и инновациям НИТУ «МИСиС»


М.Р. Филонов
" 17 "  2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Фритч Лабораторные приборы»


А.Г. Ионин
" 17 "  2022 г.

МИ-01/22

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРОБ
УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ДИФРАКЦИИ**

Аттестована

Уральский научно-исследовательский
институт метрологии — филиал
Федерального государственного унитарного
предприятия «Всероссийский научно-
исследовательский институт метрологии
им. Д.И. Менделеева»

Регистрационный номер в
Информационном фонде по
обеспечению единства измерений

Москва

2022

ПРЕДИСЛОВИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЗРАБОТКЕ

1 РАЗРАБОТАНА

1.1 Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр.1.

Научно-учебная испытательная лаборатория «Физико-химии углей»

Зав. лабораторией, д.т.н.,

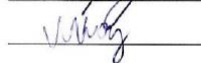
ведущий научный сотрудник

 С.А. Эпштейн

Инженер научного проекта

 В.А. Красилова

Лаборант-исследователь

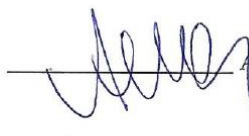
 М.М. Козырев

1.2 ООО «Фритч Лабораторные приборы», 115093, г. Москва, 3-й Павловский пер., д.1, корп. 57, оф. 103

Руководитель:

Генеральный директор

ООО «Фритч лабораторные приборы»

 А.Д. Ионин

1.3 Разработчики: Д.А. Данькин

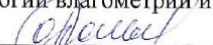
2 ВВЕДЕНА ВПЕРВЫЕ

СВЕДЕНИЯ ОБ АТТЕСТАЦИИ

3 АТТЕСТОВАНА: Уральским научно-исследовательским институтом метрологии – филиалом Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева» (УНИИМ - филиал ФГУП «ВНИИМ им.Д.И. Менделеева»), 620000, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4

Лаборатория метрологии-влагометрии и стандартных образцов (лаб.241)

Зам.зав. лаб.



О.С. Гольнец

М.н.с.



А.В. Касилюнас

УНИИМ - филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» имеет аттестат аккредитации метрологической службы на право аттестации методик (методов) измерений и проведения метрологической экспертизы документов и зарегистрирован в Реестре аккредитованных метрологических служб юридических лиц под № RA.RU.311866 от 07.09.2016 г.

Свидетельство об аттестации методики измерений № 241.0032/RA.RU.311866/2022 от «17» июня 2022 г.

Уральский научно-исследовательский институт метрологии - филиал
Федерального государственного унитарного предприятия
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им.Д.И.Менделеева»
(УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»)

620075, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4
тел: +7(343)350-26-18, факс: +7(343)350-20-39, uniim@uniim.ru, www.uniim.ru

Уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311866



ВНИИМ
им. Д.И.Менделеева

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об аттестации методики (метода) измерений

№ 241.0032/RA.RU.311866/2022

Методика измерений гранулометрического состава проб угольной пыли методом
наименование методики, включая указание измеряемой величины, шкалы величины (шкалы измерений),
лазерной дифракции,

объекта, диапазона и реализуемый способ измерений и, при необходимости, наименование дополнительных параметров

разработанная НИТУ "МИСиС", 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр.1;

наименование и адрес организации (предприятия), разработавшей методику

ООО "Фритч Лабораторные приборы", 115093, г. Москва, 3-й Павловский пер., д.1, к. 57,

оф. 103,

содержащаяся в МИ-01/22 "Методика измерений гранулометрического состава угольной
обозначение и наименование документа, содержащего методику, год утверждения, число страниц
пыли методом лазерной дифракции", утв. в 2022 г., на 24 стр.

Аттестация проведена на основе экспериментальных исследований.

теоретических и (или) экспериментальных исследований

**Методика измерений аттестована в соответствии с Приказом Минпромторга России
от 15.12.2015 г. № 4091**

В результате аттестации методики измерений установлено, что методика измерений
соответствует метрологическим требованиям, приведенным в Федеральном законе
от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ "Об обеспечении единства измерений"

ГОСТ Р 8.563-2009, ТЗ ООО "Фритч Лабораторные приборы".

другие нормативные правовые акты Российской Федерации, нормативные документы (при наличии)

Показатели точности измерений приведены в приложении на 2 л., являющемся неотъемлемой
частью настоящего свидетельства.

Директор филиала

Зав. лабораторией

Дата выдачи

Е.П. Собина

М.Ю. Медведевских

17.06.2022



ПРИЛОЖЕНИЕ
К СВИДЕТЕЛЬСТВУ № 241.0032/RA.RU.311866/2022
об аттестации методики измерений гранулометрического состава проб
угольной пыли методом лазерной дифракции

на 2 листах

Выполнение измерений по настоящей методике обеспечивает получение результатов измерений гранулометрического состава (объемной доли частиц (φ_i , %) в зависимости от размера частиц; диаметра частиц (d_i , мкм) определяющего границу, для которой интегральное значение объемной доли частиц, имеющих меньший диаметр, составляет 10 %, 50 %, 90 % частиц) в пробах угольной пыли в диапазонах измерений и с характеристиками относительной погрешности при доверительной вероятности $P = 0,95$, приведенными в таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Диапазоны измерений, значения показателей точности, повторяемости, воспроизводимости и правильности результатов измерений объемной доли частиц φ_i в зависимости от размера частиц

Диапазон измерений размеров частиц, мкм	Показатель повторяемости (относительное среднее квадратическое отклонение повторяемости), σ_{r0} , %	Показатель воспроизводимости (относительное среднее квадратическое отклонение воспроизводимости), σ_{R0} , %	Показатель правильности (границы относительной неисключенной систематической погрешности при доверительной вероятности $P = 0,95$), $\pm\delta_c$, %	Показатель точности* (границы относительной погрешности при доверительной вероятности $P = 0,95$), $\pm\delta$, %
от 0,1 до 2,5 вкл.	8	12	8	25
св. 2,5 до 5 вкл.	3	5	10	14
св. 5 до 10 вкл.	8	12	8	25
св. 10 до 50 вкл.	2	4	10	13
св. 50 до 100 вкл.	13	18	14	38

Зам. зав. лаб. 241 УНИИМ –
филиала ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»,
эксперт-метролог
№ RUM 02.24.0746-3 от 30.04.2021
17.06.2022
стр. 1 из 2



О.С. Голынец

ПРИЛОЖЕНИЕ
К СВИДЕТЕЛЬСТВУ № 241.0032/RA.RU.311866/2022
об аттестации методики измерений гранулометрического состава проб
угольной пыли методом лазерной дифракции

на 2 листах

Таблица 2 – Значения показателей точности, повторяемости, воспроизводимости и правильности результатов измерений диаметра частиц d_i , определяющего границу, для которой интегральное значение объемной доли частиц, имеющих меньший диаметр, составляет 10 %, 50 %, 90 % частиц, в диапазоне измерений от 0,1 до 100 мкм вкл.

Граница, для которой интегральное значение объемной доли частиц, имеющих меньший диаметр, составляет % частиц, D	Показатель повторяемости (относительное среднее квадратическое отклонение повторяемости), σ_{r0} , %	Показатель воспроизводимости (относительное среднее квадратическое отклонение воспроизводимости), σ_{R0} , %	Показатель правильности (границы относительной неисключенной систематической погрешности при доверительной вероятности $P = 0,95$), $\pm \delta_c$, %	Показатель точности* (границы относительной погрешности) при доверительной вероятности $P = 0,95$ $\pm \delta$, %
10 % (D_{10})	5	7	8	16
50 % (D_{50})	7	10	15	25
90 % (D_{90})	10	14	12	30

**Показатели точности были оценены при проведении межлабораторного эксперимента, в котором участвовали 5 лабораторий.*

Зам. зав. лаб. 241 УНИИМ –
 филиала ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»,
 эксперт-метролог
 № RUM 02.24.0746-3 от 30.04.2021
 17.06.2022
 стр. 2 из 2



О.С. Голынец

Приложение Б

Документы о практическом использовании результатов диссертационного исследования

WWW.FRITSCH.DE



Исх. №: 34
от «04» октября 2023 г

Председателю экспертного совета НИТУ МИСИС
по специальности 2.6.12 Химическая технология
топлива и высокоэнергетических веществ .
Эпштейн С.А.

СПРАВКА

«Методика измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции» (Свидетельство об аттестации методики измерений № 241.0032/RA.RU.311866/2022), разработанная с участием В.А. Красиловой в рамках диссертационной работы на тему "ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ДОБЫЧЕ И ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЕЙ" и ГСО 12118-2023 используется ООО «Фритч Лабораторные приборы» для калибровки анализаторов размеров частиц и проведения измерений гранулометрического состава угольной пыли разного происхождения.

С уважением,

Александр Ионин

Генеральный директор

ООО «Фритч Лабораторные приборы»



ООО «Фритч Лабораторные приборы»
115093, Москва, "М-Стиль", 3-й Павловский пер, 1, офис 103
Телефон: (495) 781-2036

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ
РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
(РОССТАНДАРТ)



ВНИИМ
им. Д.И. Менделеева

Уральский научно-исследовательский
институт метрологии - филиал Федерального
государственного унитарного предприятия
«Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологии им. Д.И. Менделеева»
УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
620075, Свердловская область,
г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4
тел.: +7 (343) 271 271 3, +7 (343) 350 26 18
www.uniim.ru | e-mail: uniim@uniim.ru
ИНН 7809022120, КПП 668543001

Председателю экспертного совета

НИТУ МИСИС по специальности 2.6.12
Химическая технология топлива и
высокоэнергетических веществ

Эпштейн С.А.

09 ОКТ 2023 № 241 / 4423

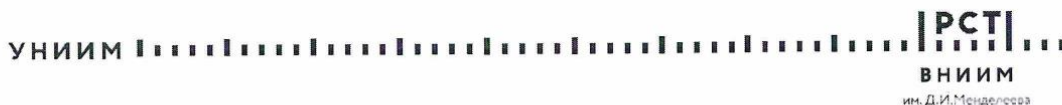
Настоящим информируем Вас, что «Методика измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции» (Свидетельство об аттестации методики измерений № 241.0032/RA.RU.311866/2022, номер в Федеральном информационном фонда по обеспечению единства измерений ФР.1.31.2022.43605) использована при разработке стандартного образца состава угля каменного Кузнецкого бассейна ГСО 12118-2023, в части установления дополнительной метрологической характеристики - объемной доли частиц с размером от 10 до 50 мкм.

Директор филиала

Е.П. Собина

Исп.: И.о.зав.лаб. 241, О.С.Голынец

УНИИМ



ВНИИМ
им. Д.И. Менделеева