

*На правах рукописи*



**МИТИШОВА НАТАЛИЯ АЛЕКСАНДРОВНА**

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ВЗРЫВОВ СУЛЬФИДНОЙ ПЫЛИ  
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОЛЧЕДАНЫХ РУД**

Специальность

25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук в Отделе теории проектирования освоения недр

Научный руководитель:

**Рыльникова Марина Владимировна,**  
профессор, доктор технических наук,  
заведующий отделом Теории проектирования  
освоения недр ИПКОН РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

**Соколов Игорь Владимирович,**  
доктор технических наук,  
директор, заведующий лабораторией  
подземной геотехнологии ИГД УрО РАН,  
г. Екатеринбург

**Добрынин Александр Артурович,**  
кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой «Взрывные технологии и  
безопасность обращения взрывчатых веществ»  
АНО ДПО «СНТА», г. Москва

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск)

Защита диссертации состоится 21 октября 2020 г. в 10 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН: <http://ипконран.рф>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

И.Ф. Жариков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Эффективное развитие минерально-сырьевой базы России неразрывно связано с освоением месторождений колчеданных руд и необходимостью обеспечения безопасности горных работ в изменяющихся условиях недропользования. При этом неизбежно вовлекаются в процесс добычи руды с всё более низким содержанием ценных компонентов, что влечет за собой рост масштабов извлечения запасов из недр, изменение минерального состава вовлекаемых в эксплуатацию сульфидных руд и пород и технологии их разработки. Важно отметить, что, в связи с увеличением объемов вовлекаемых в эксплуатацию сульфидов, происходит увеличение извлекаемых мощностей, массы ВВ, изменяются технологии и объем бурения, что приводит к росту количества формируемой сульфидной пыли и вероятности риска ее воспламенения. В практике горных работ взрывы сульфидной пыли достаточно часто возникают при подземной разработке месторождений колчеданных руд: медно-цинковых, свинцово-цинковых, медно-никелевых, антимонитовых и др. Это обуславливает необходимость проведения исследований и усовершенствования методик изучения взрывчатых свойств сульфидной пыли, разработки требований промышленной и экологической безопасности ведения горных работ.

Безопасность ведения горных работ в забоях, опасных по взрыву сульфидной пыли, обеспечивается осуществлением ряда специальных мероприятий, выбор которых в современных условиях требует обоснованного научно-методического подхода на базе проведения фундаментальных исследований.

В свое время советская научная школа охраны труда создала серьезный научно-методический задел для предотвращения взрывов сульфидной пыли. В результате этого аварий по данному фактору долгое время не происходило. Однако разработанные в советское время технические, методические и практические решения по обеспечению безопасности горных работ не могли в то время учесть произошедшие современные изменения в горном производстве, возможности инновационного горного оборудования, технологий, поэтому напрямую известные, разработанные ранее технологические решения не могут быть эффективно применимы в новых условиях. Рост масштабов добычи, переход на технологию бурения, взрывания скважин большого диаметра, проходки выработок механизированным способом с применением комбайнов, секционного взрывания восстающих при проходке их методом VKR повлекли общее увеличение выделения пыли в атмосферу рудника с ростом доли тонкодисперсных частиц. При разработке месторождений сульфидных руд это влечет рост риска развития экзотермических процессов и взрывоопасности рудничной атмосферы.

Согласно Инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, разрабатывающих пиритсодержащие руды, утвержденной Министерством металлургии СССР в 1991 году, нижний взрывоопасный предел содержания серы в руде составляет 35%. Однако взрывы

сульфидной пыли в настоящее время фиксируются и при более низком содержании серы в рудах.

Анализ практики отработки месторождений колчеданных руд показал, что действующие нормативные документы в области промышленной безопасности для опасных объектов горнодобывающей промышленности в большей части устарели и не содержат требований и указаний по ведению подземных горных работ на месторождениях, опасных по взрывам и возгоранию сульфидной серосодержащей пыли, отвечающих современным техническим условиям. Таким образом, проблема обеспечения взрывобезопасности при разработке месторождений колчеданных руд является весьма актуальной и требует своевременного решения и закрепления в нормативной документации.

**Целью работы** является изыскание технологических решений по снижению рисков взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд.

**Идея работы:** технологические решения по предотвращению взрывов сульфидной пыли должны базироваться на оценке параметров взрывчатости сульфидной пыли с учетом масштабов и технологии ведения буровзрывных работ, протяженности зоны орошения подготовительных выработок перед взрывом, структурно-текстурных характеристик горных пород, фракционного состава пылевых частиц, провоцирующих взрыв.

Достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением научно-практических задач:

- проанализирован и обобщен опыт безопасного ведения горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли при отработке месторождений колчеданных руд, обобщены нормативные документы по вопросам взрывобезопасности;
- разработана методика, и выполнены исследования взрывчатых свойств сульфидной пыли;
- выявлены неучтенные ранее факторы обеспечения безопасности ведения горных работ, и разработаны мероприятия по снижению риска возникновения взрывов сульфидной пыли;
- оценена вероятность возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли, и перспективы ее снижения при реализации компенсирующих мероприятий.

**Объектом исследования** явились руды, породы и пыль, формируемая при разработке месторождений колчеданных руд Шануч, Сентачан и Сибайское, а также условия разработки месторождений, потенциально опасных по взрывам сульфидной пыли.

**Методы исследований** включали сбор, обобщение опыта ведения горных работ на предприятиях, опасных по взрывам сульфидной пыли, обзор и анализ результатов научных исследований отечественных и зарубежных ученых, практического опыта в области обеспечения безопасности по фактору взрыва сульфидной пыли, исследование факторов и процессов, влияющих на пылевзрывоопасность, с использованием методов: оптической микроскопии,

включающей оптико-петрографический и минераграфический анализы, рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), синхронный термический анализ (СТА), с последующим научным обобщением и статистической обработкой полученных результатов.

**Положения**, выносимые на защиту:

1. Пылевые частицы сульфидов размером более 100 мкм не являются термически активными; при меньшем размере частиц склонность их к взрывоопасности повышается с увеличением доли мелких фракций по экспоненциальной зависимости.

2. Доказано, что для предотвращения взрыва сульфидной пыли длина орошения водой выработки ( $l_{op}$ , м), прилегающей к месту взрыва, не является величиной постоянной, а зависит от массы взрываемого ВВ ( $M_{вв}$ , кг), коэффициента шероховатости стенок выработки ( $\beta$ ), площади сечения выработки ( $S_{сеч}$ , м<sup>2</sup>), коэффициента неоднородности минерального состава сульфидной пыли в различных классах крупности пылевых частиц ( $k_s$ ):  
 $l_{op}=28,95 \cdot \ln(M_{вв})-16,26 \cdot \ln(\beta)-24,66 \cdot \ln(S_{сеч})+8,72 \cdot \ln(k_s)-121,4$ .

**Обоснованность и достоверность** научных положений подтверждается:

- достаточным объемом проанализированной и обобщенной информации отечественных и зарубежных исследований;
- корректностью принятой модели возникновения и распространения взрыва сульфидной пыли;
- комплексным анализом факторов, влияющих на возникновение взрывов сульфидной пыли, с учетом современных тенденций развития горных работ;
- использованием современных методов исследования.

**Научная новизна** работы: методика обоснования условий предотвращения взрыва сульфидной пыли и оценки взрывоопасности при разработке месторождений колчеданных руд, учитывающей текстурно-структурные особенности строения и вещественного состава колчеданных руд и пород, а также размер термически активных частиц сульфидной пыли.

**Практическая значимость** работы заключается во внедрении авторской методики по оценке взрывоопасности пыли, определении условий, предотвращающих взрыв сульфидной пыли: орошение контура выработки водой на заданное расстояние; ограничение диаметра буровых скважин и шпуров – не более 89 мм; отказ от применения систем разработки с массовым обрушением руд и пород без профилактического заиливания; ограничение объемов массы одновременно взрываемых зарядов ВВ; исключение присутствия в контуре ведения взрывных работ открытых проводников, применение надежного изоляционного покрытия электропроводов; отказ от проходки восстанавливаемых методом секционного взрывания и механического бурения; использование при бурении скважин и шпуров водоподавления, а при взрывании – ВВ, не склонных к саморазогреву при контакте с сульфидной пылью. Разработаны технологические рекомендации для безопасной отработки месторождений колчеданных руд Шануч, Сентачан и Сибайское.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались на Международной научно-практической конференции «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр земли» (г. Москва, 2017), Международной научно-практической конференции «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» (г. Магнитогорск, 2018), 4-й Международной конференции по проблемам рационального природопользования «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства» (г. Тула, 2018), III Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (г. Москва, 2018), XXVI Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2019), Международной научно-технической конференции «Решение экологических и технологических проблем горных производств на территории России, ближнего и дальнего зарубежья» (г. Москва, 2019), X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (г. Магнитогорск, 2019), 14-й Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, 2019).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 15 работах, 3 из которых – в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из 4 глав, введения и заключения, изложенных на 157 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 15 таблиц, список литературы из 152 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Выполнено обобщение опыта обработки месторождений колчеданных руд, проведен анализ существующих методов обеспечения безопасности подземных горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли, рассмотрен механизм и условия формирования взрывоопасного пылевого облака.

Обобщение особенностей возникновения в практике горных работ взрывов сульфидной пыли базируется на изучении теории горения и взрыва, выявлении механизма и источников образования пылевых частиц, изучении особенностей окисления и взрыва аэрозолей сульфидных руд, анализе мероприятий, обеспечивающих безопасность горных работ.

Вклад в развитие теоретических основ обеспечения безопасности горных работ внесли труды академиков А.А. Баряха, Ю.Н. Малышева, Н.Н. Мельникова, К.Н. Трубецкого, член-корр. РАН Д.Р. Каплунова, А.Е. Красноштейна, профессоров И.И. Айнбиндера, А.Т. Айруни, М.А. Иофиса, В.В. Кудряшова, М.В. Рыльниковой и др.

Значительный вклад в развитие теории возникновения и практики обеспечения безопасности подземных горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли был сделан отечественными учеными: академиком Н.Н. Семеновым, А.А. Скочинским, докторами и кандидатами наук А.С. Алешиним, Н.С. Бахаревиным, В.Н. Бекчиу, А.А. Васильевым, А.П. Годжелло, С.А. Гори-

новым, Л.В. Дубновым, А.А. Еременко, А.И. Ермолаевым, В.А. Захаровым, Я.Б. Зельдовичем, М.Х. Кожобаевым, В.Я. Манаковым, И.Ю. Масловым, Н.Г. Матвиенко, В.М. Огиевским, Г.П. Парамановым, А.В. Пинаевым, В.Н. Рыжковым, М.В. Рыльниковой, В.И. Смирновым, В.И. Филипповым, Э.И. Чернявским, И.В. Чернобаем, В.А. Ярциным и другими.

В свое время советская научная школа охраны труда создала серьезный научно-методический задел для предотвращения взрывов сульфидной пыли, в результате которого аварии по факту взрыва сульфидной пыли в практике горных работ долгое время не происходили. Однако разработанные в советское время технические, методические и другие решения обеспечения безопасности не могли учесть современных возможностей добычного оборудования и технологий, изменения условий горных работ, а способы предотвращения взрывов сульфидной пыли стали либо технологически сложны в применении, либо малоэффективны.

Более подробно в диссертации рассмотрены условия подземной разработки Гайского, Учалинского и Сибайского месторождений в связи с тем, что на них зафиксировано наибольшее количество взрывов сульфидной пыли (рис. 1).

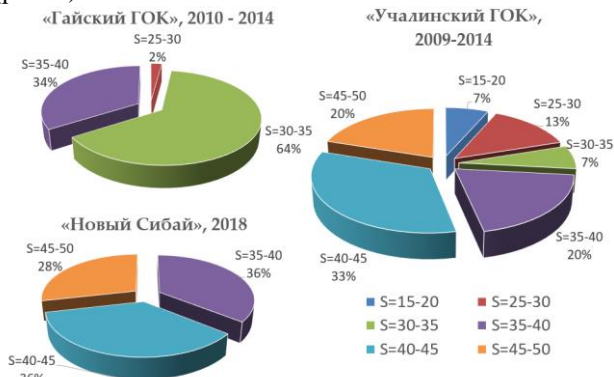


Рисунок 1. Распределение взрывов сульфидной пыли в зависимости от содержания серы в руде

В условиях разработки Гайского месторождения наибольшее количество взрывов происходит в рудах с содержанием серы от 30%, при разработке Учалинского месторождения взрывы зафиксированы при содержании серы в руде от 40 до 45%, для условий разработки Сибайского место-

рождения количество взрывов пыли для руд и пород с содержанием серы 30–35, 35–40 и 40–45% сопоставимо.

В работе выполнен ретроспективный анализ нормативно-правовой документации в области промышленной безопасности. Рассмотрены инструкции по предупреждению взрывов сульфидной пыли на подземных рудниках, принятые, в частности, в отечественной практике в 1963, 1983 и 1991 годах.

Характерной особенностью рассмотренных отечественных документов является консервативная неизменность ряда ключевых параметров. Так, на протяжении более 50 лет в отечественной нормативной документации не менялось представление о размере частиц, участвующих во взрыве, который принят в пределах 300 мкм. При этом основным мероприятием, направлен-

ным на предотвращение взрывов сульфидной пыли, согласно рассмотренным нормативам, является орошение водой призабойной зоны перед взрывом, которое в настоящее время в отечественной практике должно производиться на расстоянии 30 и 15 м при взрывании скважин и шпуров соответственно.

Выявленная совокупность факторов, связанных с изменением технологии ведения подземных горных работ, привела к необходимости проведения комплексной оценки взрывоопасности сульфидной пыли с учетом вещественного состава и структуры руды и вмещающих пород, горно-геологических и горнотехнических условий разработки месторождений, в том числе для уточнения протяженности зоны орошения выработок как основного мероприятия по борьбе со взрывами сульфидной пыли.

С учетом проведенного анализа было рассмотрено изменение технологии ведения подземных горных работ. В результате установлено, что за рассматриваемый период произошло значительное изменение технологических процессов, влияющих на образование пыли в подземных условиях, а именно: повышение интенсивности ведения буровых и взрывных работ, связанное с произошедшим техническим перевооружением подземных рудников, увеличением массы взрываемого ВВ; отказ от применения систем разработки с закладкой выработанного пространства в пользу более экономичных вариантов систем разработки ввиду снижения содержания ценных компонентов в руде; применение скважин увеличенного диаметра; повсеместное внедрение мобильного транспорта, ставшего новым источником пыления в подземных условиях.

С учетом этого рассмотрены необходимые и достаточные условия для воспламенения сульфидной пыли в рудничной атмосфере, к которым относятся: наличие взрывоопасной концентрации пыли; содержание взрывоопасной концентрации серы в руде, нагрев сульфидной пыли до температуры не ниже температуры вспышки, величина превышения выделившегося тепла в зоне горения над тепловыми потерями; при этом учтено, что тепловая мощность источника горения должна быть достаточной для воспламенения:  $\Delta P \geq \Delta P_{\text{крит}}$ .

Анализ изученности проблемы позволил сформулировать цель и задачи исследований.

С опорой на полученные результаты была разработана программа и методика исследований взрываемости сульфидной пыли, алгоритм которой представлен на рисунке 2 и включает основные этапы:

1. Геолого-минералогическая оценка вещественного состава исследуемых проб колчеданных руд.
2. Определение формы нахождения сульфидов в веществе.
3. Изучение содержания серы в пробах руд для различных классов крупности, полученных при первичном измельчении образцов представленных на анализ пород.
4. Определение температуры воспламенения образцов сульфидной пыли.



5. Изучение динамики нагрева и горения сульфидной пыли различной крупности в смеси с ВВ на основе аммиачной селитры и без нее с применением метода СТА.



Рисунок 2. Алгоритм проведения оценки склонности сульфидной пыли к взрывоопасности

полученной в результате первичного разрушения представленных на анализ пород исследуемых месторождений.

Для этого в рамках диссертационного исследования была сформулирована гипотеза о том, что в результате первичной дезинтеграции сульфидной руды происходит неравномерное распределение серы в пыли различных классов крупности.

Для проверки гипотезы было выполнено исследование, включающее измерение содержания серы в пыли различных классов крупности, полученных в результате первичного измельчения руд. Данное уточнение является ключевым, так как позволяет оценить аналогичные результаты первичного дробления после проведения взрывных работ в условиях подземной разработки сульфидных руд. В качестве представительных образцов были выбраны высокосульфидные руды и породы месторождения Сибайское, в качестве

При оценке степени взрывоопасности изучено влияние среднего содержания серы в колчеданных рудах. На практике руды с содержанием серы менее 35% могут являться опасными по фактору взрыва сульфидной пыли, притом что в лабораторных условиях рудничная пыль с содержанием серы менее 35% не взрывается. Для выявления причины отмеченного явления и последующей разработки адекватных технических решений, направленных на обеспечение безопасности ведения подземных горных работ с использованием комплекса методов оптической микроскопии, а также метода рентгенофлуоресцентного анализа, было выполнено исследование изменения содержания серы в различных фракциях рудничной пыли,

убогосульфидных образцов – кварц-антимонитовые руды месторождения Сентачан и медно-никелевые руды месторождения Шануч.

На рисунке 3 а показано изменение содержания серы для различных классов крупности, полученных в результате измельчения серно-колчеданной породы месторождения Сибайское.

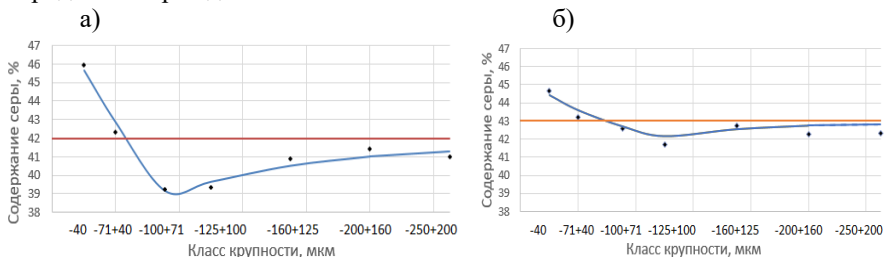


Рисунок 3. Изменение содержания серы для различных классов крупности: а) серно-колчеданной породы месторождения Сибайское; б) медно-колчеданной руды с крупнозернистой структурой месторождения Сибайское

Исследованная проба характеризуется среднезернистой структурой с неоднородным строением агрегатов. Минеральный состав зерен – однородный, представлен пиритом с твердостью 6–6,5 по шкале Мооса. Максимальное содержание серы во фракциях  $-40$  мкм – 45,66%, минимальное во фракции  $-100+71$  мкм – 39,13%, при среднем содержании S – 42%.

Проба массивной медно-колчеданной руды месторождения Сибайское характеризуется плотным минеральным агрегатом однородного сложения с крупнозернистой структурой. Анализ зависимости, приведенной на рисунке 3б, показывает, что проба характеризуется незначительной изменчивостью содержания серы в различных фракциях руды, измельченной в результате первичного дробления, и составляет порядка 5% относительно среднего содержания серы в образце. Анализ графиков на рисунках 3а и 3б свидетельствует, что для пород, характеризующихся крупнозернистым/среднезернистым массивным строением и однородным минеральным составом, характерно незначительное изменение содержания серы по фракциям, образованным в результате первичной дезинтеграции.

Проба кварц-антимонитовой руды (рис. 4а) характеризуется мелкозернистой структурой, минеральный состав представлен кварцем с коэффициентом твердости 7 по шкале Мооса, антимонитом с коэффициентом крепости 2–2,5 и арсенопиритом с коэффициентом крепости 5,5. При мелкозернистой структуре наблюдается наибольшее изменение содержания серы в относительном выражении, поскольку, в отличие от серно- и медно-колчеданных образцов, минеральный состав кварц-антимонита менее однороден.

В процессе дезинтеграции руды первичному разрушающему импульсу подвержены минералы с наименьшей хрупкостью и коэффициентом крепости – антимонит и арсенопирит. При механическом бурении и взрывном разрушении сульфиды в большей мере склонны к образованию тонкодисперсных

частиц за счет более высокой хрупкости. Кроме того, гранобластовая структура руды характеризруется зернами относительно одинакового размера с ярко выраженной изометрической, аллотриоморфной формой и четкими границами, что способствует отделению частиц сульфидов при разрушении. Содержание серы во фракциях -40 мкм и -125+100 мкм отличается на 4,48% при большем в мелких фракциях, что составляет 43,56 % относительно среднего содержания по образцу.

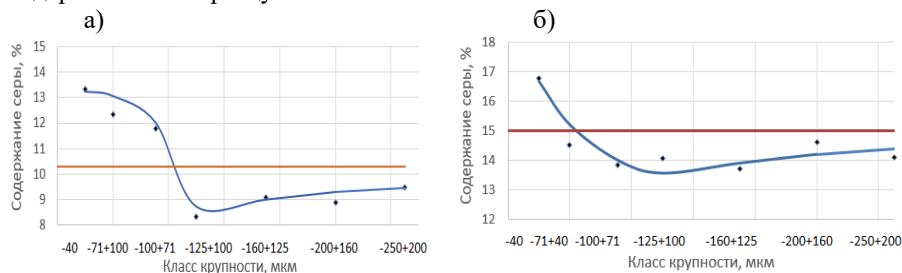


Рисунок 4. Изменение содержания серы для различных классов крупности: а) кварц-антимонитовой руды месторождения Сентачан; б) медно-никелевой руды месторождения Шануч

Аналогичная закономерность распределения серы в руде отмечена в пробе, представленной гранито-гнейсами (рис. 4б), в которой минералы заполнены кварцем, амфиболом, полевыми шпатами, актинолитом, диапазон твердости которых 6,5–7, сульфидные минералы представлены пиритом, халькопиритом и виоларитом, их твердость по шкале Мооса – 3–6,5. Максимальное содержание серы во фракциях -40 мкм и -125+100 мкм фактически отличается на 3,11%, что составляет 20,7% относительно среднего содержания по образцу.

Результаты геолого-минералогического анализа колчеданных руд и пород приведены в таблице 1.

При изучении склонности пыли сульфидных руд и пород к самовозгоранию как основополагающий фактор взрывоопасности должны учитываться: минеральный состав, среднее содержание серы с оценкой ее распределения в тонкодисперсных частицах различной крупности.

На распределение серы в тонкодисперсных фракциях влияют: размер зерен и формы нахождения сульфида в минерале, соотношение прочности сульфидов и вмещающих породных составляющих, определяющие склонность к образованию мелких пылевых частиц с высоким содержанием серы.

Данный факт определяет необходимость разработки технологических решений, учитывающих новые знания о неравномерном распределении содержания серы в различных классах крупности частиц сульфидной пыли.

На основании данных о изменении содержания серы в работе введен поправочный коэффициент  $k_S$  – коэффициент неоднородности минерального состава пыли в классах крупности пылевых частиц. Численно коэффициент

выражается наибольшим относительным отклонением содержания серы в мелких фракциях -40 мкм относительно среднего содержания.

Таблица 1. Результаты геолого-минералогической оценки колчеданных руд и пород и текстурно-структурных особенностей массивов

Характеристики	Медный колчедан (Новый Сибай)	Серный колчедан (Новый Сибай)	Гранито-гнейсы (Шануч)	Кварц-антимонитовая руда (Сентачан)	
Минеральный состав руды (твердость по шкале Мооса)	Пирит (6-6,5) Халькопирит (3-4) Сфалерит (3,5-4)	Пирит (6-6,5) Сфалерит (3,5-4)	Кварц (7) Амфибол (6) Полевой шпат (6-6,5) Актинолит (6,5) Пирит (6-6,5) Халькопирит (3-4), Виоларит (4,5-5,5)	Кварц (7) Антимонит (2-2,5) Арсенопирит (5,5)	
Структурно-текстурные особенности нахождения сульфидных минералов	Крупнозернистый Аллотриоморфный	Среднезернистый Фрамбоидальный Почковидный Сотообразный	Мелкозернистая Среднезернистый Ксеноморфная Прожилково-вкрапленный	Мелкозернистый Гранобластовый	
Крупность зерен сульфидных минералов, мкм	≥250	20-100	20-200	10-120	
Содержание серы, %					
Максимальное	44,43	45,66	16,67	13,22	
Минимальное	42,16	39,13	13,56	8,73	
Среднее	43	42	15	10,3	
Наибольшее изменение содержания серы, %	абс.	2,27	6,53	3,11	4,49
	отн.	5	15,54	20,7	43,56

Для разработки мероприятий по снижению риска возникновения взрывов сульфидной пыли оценено безопасное расстояние орошения призабойной зоны при ведении взрывных работ. Рассмотрено граничное условие возникновения взрыва в подземном руднике, а именно достижение скачка давления на фронте ударно-воздушной волны ( $\Delta P$ ) критической величины ( $\Delta P_{\text{крит}}$ ) и  $\theta$  – давление во фронте УВВ:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{крит}}} = 1. \quad (1)$$

Это уравнение использовано для определения расстояния, при котором возможно возгорание колчеданной пыли под действием УВВ. Известно, что величина критического скачка давления во фронте УВВ, при котором возможно возгорание сульфидной пыли под действием УВВ, равна  $\Delta P_{\text{крит}} = 0,4$  МПа. Таким образом, если при ведении взрывных работ произойдет взрыв сульфидной пыли, то возможно возрастание давления на величину  $\Theta$  во фронте УВВ по сравнению со взрывом ВВ без присутствия пыли:

$$\theta = \sqrt{1 + \frac{I_2}{I_1}}, \quad (2)$$

где:  $I_1$ ,  $I_2$  – удельные импульсы УВВ, соответственно, от взрыва заряда ВВ и от взрыва сульфидной пыли, выбрасываемой в выработку при взрыве, кг/(м\*с).

На основании (1) получено уравнение для определения скачка давления на фронте УВВ  $\Delta P$  и расстояния от места взрыва до участка массива, отдаленного от взрыва на величину  $X$ , м:

$$\zeta^{-1} \frac{Q_{\text{ВВ}}}{Q_{\text{АММ.}}} \left( 7,25 \frac{n M_{\text{ВВ}}}{S X} 1,9 \sqrt{\frac{n M_{\text{ВВ}}}{S X}} \right) \exp \left( -\frac{\beta X}{d_{\text{ВЫР.}}} \right) = 1, \quad (3)$$

где:  $k_{\text{ПЫЛ.}}$  – коэффициент пыления, характеризующий долю пылевых частиц (до 300 мкм) в массе пород зоны измельчения;  $k_{\text{ГОР}}$  – коэффициент полноты сгорания пылевых частиц;  $k_S$  – коэффициент распределения содержания серы в руде в зависимости от класса крупности пылевых частиц;  $\delta_{\text{СКВ}}$  – толщина слоя зоны измельчения вокруг скважины, м;  $d_{\text{СКВ}}$  – диаметр взрывной скважины, м;  $\rho_M$  – плотность сульфидосодержащей породы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ВВ}}$  – плотность заряжения ВВ, кг/м<sup>3</sup>;  $q$  – удельная теплота горения сульфидной пыли, Дж/кг;  $n$  – массовая доля ВВ, идущая на образование УВВ;  $Q_{\text{ВВ}}$  – удельная теплота взрыва ВВ, Дж/кг;  $\zeta$  – общий коэффициент сопротивления движению УВВ на участке  $X$ ;  $Q_{\text{АММ.}}$  – удельная теплота взрыва аммонита 6ЖВ, Дж/кг;  $M_{\text{ВВ}}$  – масса взрываемого ВВ, кг;  $S$  – площадь сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $X$  – расстояние от места ведения взрывных работ до рассматриваемого места, м;  $\beta$  – коэффициент шероховатости стенок выработки;  $d_{\text{ВЫР.}}$  – условный диаметр выработки ( $d_{\text{ВЫР.}} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}$ ), м.

Расчет по уравнению (3) подтвердил необходимость уточнения безопасной длины орошаемого водой участка выработки в призабойной зоне с учетом характера воздействия технологических процессов на массив колчеданных руд. Введение поправочного коэффициента  $k_S$  позволяет учесть новые знания о перераспределении серы в различных классах крупности пыли для предотвращения взрывов сульфидной пыли.

Поскольку в уравнении (3) сложно выразить  $X$  в явном виде, то это уравнение решено методом последовательного приближения. Для оптимизации процессов расчета уравнение решено численными методами с разработкой программы для ЭВМ. При помощи этой программы были получены зависимости, которые показывают, что для площади сечения выработки 10 м<sup>2</sup> взрывание заряда массой более 300 кг определяет необходимость орошения выработки на расстояние большее, чем предусмотрено действующей нормативной документацией.

С помощью вышеуказанной программы с учетом коэффициента  $k_S$  были получены зависимости, которые показывают, что при заданных параметрах:  $M_{\text{ВВ}} = 850$  кг;  $d_{\text{СКВ}} = 0,89$  м;  $\delta_{\text{СКВ}} = 0,04$  м;  $\rho_{\text{ВВ}} = 900$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_M = 4000$  кг/м<sup>3</sup>;  $S = 10\text{--}20$  м<sup>2</sup>;  $n = 0,1$ ;  $Q_{\text{ВВ}} = 4,4$  МДж/кг;  $Q_{\text{АММ.}} = 4,1$  МДж/кг;  $q = 7$  МДж/кг;  $k_{\text{ПЫЛ.}} = 0,1$ ;  $k_{\text{ГОР.}} = 0,3$ ;  $k_S = 0,1554$ ;  $\beta = 0,04$ ;  $\zeta = 1$  для площадей сечения выработки 10, 16 и 20 м<sup>2</sup> при ведении взрывных работ по серноколчеданным породам месторождения Сибайское с наибольшим относительным изменением содержания серы в мелких фракциях относительно среднего

значения – 15,54% необходимо выполнять орошение призабойной зоны на расстояние не менее 52 м, что превышает нормативную величину в 1,7 раза.

Для практического использования представленных выше зависимостей при ведении горных работ по серно-колчеданным породам на рисунке 5 представлены графические зависимости для определения протяженности участков выработок, подлежащих орошению для безопасного мгновенного взрывания скважинных зарядов массой 200, 400, 600, 800 и 1000 кг при площади сечения выработок 10, 16, 20 м<sup>2</sup> с учетом коэффициента шероховатости их стенок.

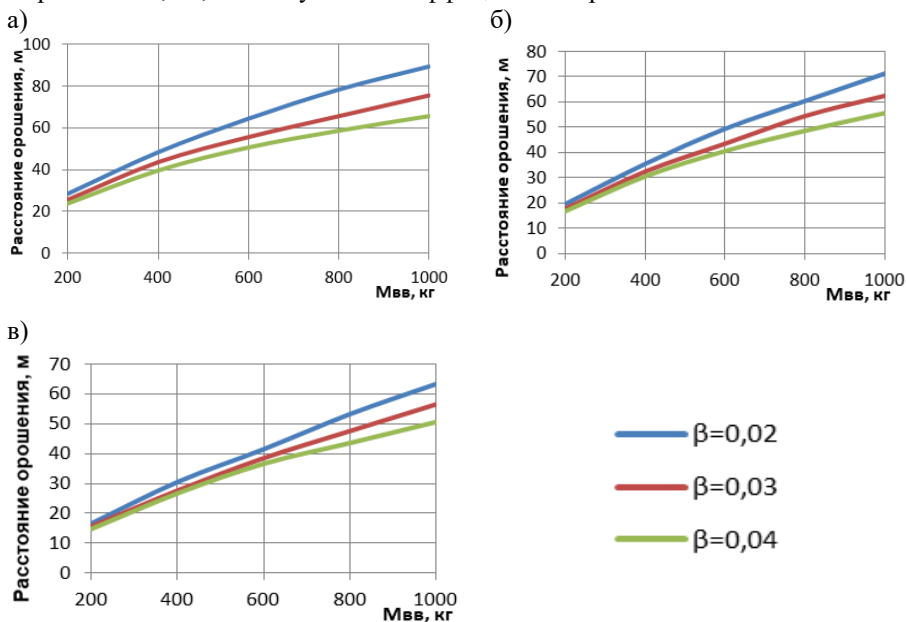


Рисунок 5. Длина орошаемого участка выработок для безопасного взрывания скважинных зарядов массой 200–1000 кг при площади сечения выработок: 10 (а), 16 (б), 20 (в) м<sup>2</sup>

Анализ экспериментальных данных при взрывании скважинных зарядов массой до 200 кг свидетельствует, что дополнительной обработки стенок и кровли выработок водой не требуется. Достаточно стандартной обработки (орошение на расстояние 30 м от места взрыва). При взрывании скважинных зарядов массой 200–400 кг дополнительное орошение боков и кровли выработок требуется только при площади их сечения до 16 м<sup>2</sup>. При этом в выработке с площадью сечения 20 м<sup>2</sup> достаточно орошения на расстоянии 30 м от места взрыва. При взрывании скважинных зарядов массой 600–1000 кг дополнительное орошение стен и кровли выработок требуется на определяемое согласно рисунку 5 расстояние.

Величина отклонения значений протяженности зоны орошения, в отличие от исходных значений, с учетом коэффициента  $k_s$  в формуле (3) составляет от 4 до 11%.

Обработкой результатов моделирования методом множественного нелинейного регрессионного анализа получена логарифмическая зависимость для определения требуемой длины орошения выработки водой перед проведением взрывных работ:

$$l_{op} = 28,95 \cdot \ln(M_{BB}) - 16,26 \cdot \ln(\beta) - 24,66 \cdot \ln(S_{сеч}) + 8,72 \cdot \ln(k_s) - 121,4, \quad (4)$$

где  $M_{BB}$  – масса взрываемого ВВ, кг;  $\beta$  – коэффициент шероховатости стенок выработки;  $S_{сеч}$  – площадь сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $k_s$  – коэффициент неоднородности минерального состава сульфидной пыли в различных классах крупности пылевых частиц.

Для определения взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ при разработке месторождений колчеданных руд, выполнен СТ-анализ (рис. 6 и 7), который позволил выявить термически активные классы крупности сульфидной пыли. При моделировании экзотермической реакции в качестве катализатора использовалась аммиачная селитра как наиболее распространенная основа применяемых при разработке колчеданных руд ВВ.

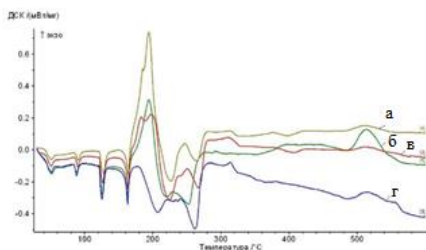


Рисунок 6. ДСК-кривые смесей пробы серно-колчеданной породы с аммиачной селитрой (1:9 (масс.)), размер частиц: а) менее 40 мкм; б) -71+40 мкм; в) -100+71; г) -125+100 мкм

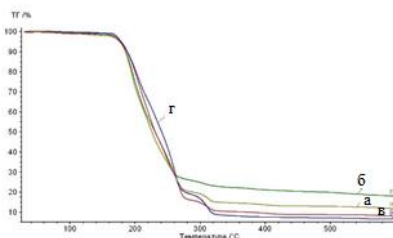


Рисунок 7. ТГ-кривые смесей пробы серно-колчеданной руды с аммиачной селитрой в соотношении 1:9 (масс.) при размере частиц: а) менее 40 мкм; б) -71+40 мкм; в) -100+71; г) -125 +100 мкм

За начало развития экзотермической реакции принимали температуру появления тепловыделения по совместному анализу ДСК-кривой и монотонной убыли массы ТГ-кривой. Резкое выделение тепла, сопровождающееся значительной потерей массы, принимается за взрыв. Для этого был проведен синхронный термический анализ (СТА) для частиц сульфидной пыли крупностью -40; -71+40; -100+71-; -125+100 мкм. ДСК-кривые, приведённые на рис. 6, а также ТГ-кривые на рис. 7 при среднем содержании серы в образце серно-колчеданной породы 43% свидетельствуют, что для всех образцов убыль массы происходит идентично. Однако присутствие пыли пирита различных фракций ускоряет этот процесс, приводя его к разложению со взрывом в диапазоне температур 183–197,9 °С для кривых а – в (рис. 6). В том числе с уменьшением класса крупности частиц сульфидной пыли наблюдается увели-

чение объемов выделившегося тепла на ДСК-кривых при возникновении экзотермических реакций.

На рисунках 6 и 7 для кривых *a*, *б*, *в* протекает ряд экзотермических процессов с ярко выраженными тепловыми эффектами, сопровождающихся резкой убылью массы. Для ТГ- и ДСК-кривых *г* в ходе эксперимента отсутствует быстропротекающая химико-физическая реакция с резкой убылью массы и энтальпией, что говорит об отсутствии взрывного горения при крупности сульфидной пыли свыше 100 мкм. Происходит разложение аммиачной селитры с пылью сульфидных пород без выделения тепла, а следовательно, такая пыль не проявляет термической активности.

Таблица 2. Основные характеристики испытуемых проб методом СТ-анализа

Образец, мкм	-40	-71+40	-100+71	-125+100
Показатели				
Температура экзотермического эффекта (взрыв), °С	185,1 (I стадия); 194,2 (II стадия)	194,2	183 (I стадия); 197,9 (II стадия)	отсутствует
Теплота взрыва, Дж/г	58,40	54,47	45,12	отсутствует
Потеря массы образца при взрыве, %	31,97	31,55	31,97	отсутствует
Остаточная масса образца при температуре 600 °С, %	6,71	7,82	9,94	11,61

На основе результатов СТ-анализа применительно к серноколчеданным породам месторождения Сибайское установлено:

- характерной особенностью кривых синхронного термического анализа частиц крупностью до 100 мкм (рис. 6) является наличие быстропротекающих ярко выраженных экзотермических реакций, которые сопровождаются резкой убылью массы и выделением тепла;

- в частицах пыли крупностью свыше 100 мкм отсутствует экзотермическая реакция, сопровождаемая убылью массы с выделением тепла;

- при нагреве образцов до температуры 600 °С наблюдается закономерность: величина остаточной массы тонко измельченной пробы прямо пропорциональна крупности её частиц и снижается с 11,61% для пробы крупностью -125+100 мкм до 6,71% для пробы крупностью менее 40 мкм. Это свидетельствует о росте интенсивности термического разложения пыли при снижении крупности частиц;

- теплота взрыва обратно пропорциональна крупности пыли и увеличивается с 45,12 Дж/г для фракции -100+71 мкм до 58,4 Дж/г для фракции менее 40 мкм за счет увеличения площади удельной поверхности частиц, что является характерным признаком для физико-химической реакции;



- в реакции, сопровождающейся взрывом сульфидной пыли, принимаю участие частицы размером менее 100 мкм, что ниже нормы в действующих нормативных документах (300 мкм).

В таблице 2 приведены результаты, полученные при СТ-анализе образцов, которые расширяют представление о механизме взрыва сульфидной пыли.

В ходе оценки риска взрывоопасности определен общий перечень сценариев развития аварий при подземной разработке месторождений колчеданных руд по фактору взрыва сульфидной пыли, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3. Общие виды опасностей при разработке месторождений колчеданных руд по фактору взрыва сульфидной пыли

№ п/п	Наименование сценария	При каких условиях возможна авария	Возможное развитие аварии	Вероятность инцидента, год <sup>-1</sup> / Уровень риска
C1	Взрыв сульфидной пыли, вследствие присутствия в зоне ведения буровзрывных работ неизолированных кабелей или проводов, служащих источником открытой электрической дуги	Естественный износ оболочки кабеля, его повреждение в ходе механического воздействия, некачественное покрытие изоляционной оболочки	Взрыв сульфидной пыли, оплавление вентиляционных рукавов, поступление горячего воздуха и продуктов горения в горные выработки, гибель и травмирование персонала, утрата оборудования, простои производства.	$2,31 \times 10^{-5}$ высокий уровень риска
C2	Взрыв отложившейся сульфидной пыли в горной выработке	Повышенное пылевыведение при выполнении основных технологических процессов, ошибка проектирования некачественное проведение мероприятий по пылеподавлению	Скопление большого количества пыли и ее взрыв, оплавление вентиляционных рукавов, поступление горячего воздуха и продуктов горения в горные выработки, гибель и травмирование персонала, утрата оборудования, простои.	$4,03 \times 10^{-3}$ высокий уровень риска
C3	Саморазогрев сульфидов при зарядании ВВ в массиве горных пород	Ошибка проектирования, человеческий фактор, выход из строя оборудования	Взрыв сульфидной пыли, оплавление вентиляционных рукавов, поступление горячего воздуха и продуктов горения в горные выработки, гибель и травмирование персонала, утрата оборудования, простои.	$10^{-16}$ средний уровень риска

На основании таблицы 3 определен уровень риска возникновения взрывоопасной ситуации в присутствии сульфидной пыли при освоении месторождений колчеданных руд. В соответствии с оценкой рисков разработаны технологические рекомендации, применение которых позволяет снизить уровень риска до приемлемых значений.

Для повышения безопасности ведения подземных горных работ при разработке сульфидных месторождений целесообразно отказаться от технологических решений, характеризующихся повышенным пылеобразованием. Выбор технологических решений необходимо предварять оценкой текстурно-структурных особенностей строения колчеданных руд и пород и изучением термической активности пылевых частиц различных классов крупности.

Для предотвращения взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд разработаны технологические реко-

мендации: отказ от применения систем разработки с этажным принудительным обрушением и самообрушением в пользу систем разработки с поэтажным обрушением; отказ от проходки восстающих выработок методом секционного взрывания; сокращение массы одновременно взрываемых ВВ; отказ от бурения скважин большого диаметра; установление протяженности зоны орошения выработок, которая должна рассчитываться по формуле (4), а не по единому нормативному показателю.

При вовлечении в отработку бедных сульфидных руд необходимо учитывать, что изменение вещественного состава руд и пород и переход горных работ на участки, характеризующиеся повышенным содержанием серы и рудами массивной текстуры с зернистой структурой, требует корректировки принятой технологии ведения горных работ. При переходе на участки с повышенным содержанием сульфидов необходимо повторно провести оценку взрывоопасности пыли, формирующейся в ходе подземных горных работ, увеличить расстояние орошения призабойного пространства и оценить условия, при которых пыль сульфидных руд и вмещающих пород не взрывопожароопасна.

Выполненный анализ опасностей с оценкой уровня риска возникновения и развития аварий по фактору взрыва сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд показал, что риски развития аварийных сценариев находятся на среднем, высоком и очень высоком уровнях. Вероятность инцидента в год для сценариев С1, С2, С3 (см. табл. 3) составляет соответственно  $2,31 \times 10^{-5}$ ;  $4,03 \times 10^{-3}$ ;  $10^{-16}$ . В результате внедрения разработанных в диссертации технологических решений по снижению риска взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд риск аварий снижается до приемлемого уровня.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации на основании выполненных автором экспериментальных и теоретических исследований решена актуальная научно-практическая задача обоснования технологических решений по предотвращению взрывов сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд. Определены основные факторы, влияющие на взрыв сульфидной пыли, оценена вероятность возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывами сульфидной пыли, разработаны технологические рекомендации по снижению риска их возникновения.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что в связи с истощением минерально-сырьевой базы России произошли существенные изменения условий техногенного преобразования недр при подземной разработке месторождений колчеданных руд. Это связано с увеличением объемов извлечения бедных руд из недр, повсеместным внедрением мобильного транспорта, ставшего новым источником пыления в подземных условиях, повышением интенсивности ведения буровых и взрывных работ. Произошедшие изменения предопределили необходи-

мость проведения исследований в соответствии с поставленными в диссертации целью и задачами.

2. Для проведения исследований разработана и апробирована методика изучения основных факторов пылевзрывобезопасности при разработке сульфидных руд и пород. В рамках развития научно-методических и практических основ безопасного ведения подземных горных работ применение данной методики обеспечивает возможность комплексно анализировать и оценивать состояние потенциальных источников взрывоопасности, выявлять результаты воздействия различных факторов, способствующих формированию взрывоопасной обстановки. Программа исследований включает элементы авторских методов по оценке взрывоопасности сульфидной пыли в зависимости от содержания серы для различных классов крупности пылевых частиц. В ходе реализации методики впервые установлено, что с уменьшением крупности частиц сульфидной пыли содержание серы в ней возрастает. Так, с уменьшением крупности частиц сульфидной пыли до  $-40$  мкм абсолютное отклонение по содержанию серы составило  $2,27-6,53\%$ .

3. Пылевые частицы сульфидов размером более  $100$  мкм не являются термически активными; при меньшем размере частиц склонность к взрывоопасности повышается с увеличением доли мелких фракций по экспоненциальной зависимости. Так, при нагреве образцов тонко измельченных сульфидов до температуры  $600$  °С наблюдается характерная закономерность: величина остаточной массы пробы пыли прямо пропорциональна величине ее крупности и снижается с  $11,61\%$  для пробы крупностью  $-125+100$  мкм, до  $6,71\%$  для пробы крупностью менее  $40$  мкм. Это свидетельствует об увеличении интенсивности термического разложения пыли со снижением крупности частиц. Теплота взрыва обратно пропорциональна крупности пыли и увеличивается с  $45,12$  Дж/г для фракции  $-100+71$  мкм до  $58,4$  Дж/г для фракции менее  $40$  мкм за счет увеличения площади удельной поверхности частиц, что является характерным признаком физико-химической реакции возгорания сульфидов.

4. Установлено, что пыль крупностью более  $100$  мкм не является термически активной, то есть в условиях возникновения взрыва такая пыль будет лишь поддерживать процессы взрывного горения, но не будет являться первоисточником возникновения взрыва. По данным синхронного термического анализа, проба серно-колчеданной породы месторождения Сибайское с содержанием серы  $42\%$  проявила термическую активность в диапазоне температур  $183-197,9$  °С для классов крупности  $-40$ ,  $-71+40$ ,  $-100+71$  мкм. При изучении медно-цинковой руды со средним содержанием серы  $37,2\%$  термическая активность зафиксирована в диапазоне температур  $189,9-217,5$  °С в идентичном диапазоне класса крупности частиц – от  $-40$  до  $100$  мкм. При нагреве частиц сульфидной пыли крупностью свыше  $100$  мкм на ДСК- и ТГ-кривых отсутствует быстропротекающая реакция с выделением тепла, сопровождаемая резкой потерей массы.

5. Определен комплекс факторов, оказывающих влияние на взрывоопасность сульфидной пыли, формируемой в процессах первичной

дезинтеграции колчеданных руд и пород. Установлена необходимость при анализе сульфидных руд и пород учета их минерального состава с оценкой среднего содержания серы в различных классах крупности и учета хрупкости минералов, слагающих сульфиды и вмещающих породы, для выявления минерала, наиболее склонного к разрушению, определения размера зерен и формы нахождения сульфидов в минерале, определяющих их склонность к образованию мелких пылевых частиц. Содержание серы во фракции -125+100 мкм составляет 8,73%, во фракции -40 мкм – 13,22%, что указывает на более высокую концентрацию серы в мелкой фракции и предопределяет необходимость дифференцированной оценки содержания серы по фракциям. Минеральный состав руды представлен кварцем с коэффициентом твердости 7, антимонитом с коэффициентом крепости 2–2,5 и арсенопиритом с коэффициентом крепости 5,5. Доказано, что в процессе дезинтеграции первоначально разрушающему импульсу подвержены более хрупкие серосодержащие минералы.

6. Установлено, что строение минерала, содержащего серу, а именно величина его зерен, определяет вероятность риска более высокого содержания серы в мелких фракциях (-40, -71+40, -100+71 мкм), образованных в результате первичного измельчения руды при техногенном воздействии на массив, а следовательно, является фактором, представляющим опасность взрыва сульфидной пыли. С учетом перераспределения содержания серы при первичной дезинтеграции в мелких фракциях оценен риск взрывоопасности при разработке месторождений колчеданных руд с содержанием серы свыше 18%.

7. Обосновано, что протяженность зоны орошения выработок перед взрывом для смыва пыли с их стенок и кровли не является величиной постоянной, а зависит от массы взрываемого ВВ ( $M_{\text{ВВ}}$ , кг), коэффициента шероховатости стенок выработки ( $\beta$ ), площади сечения выработки ( $S_{\text{сеч}}$ , м<sup>2</sup>), коэффициента неоднородности минерального состава сульфидной пыли ( $k_s$ ) с учетом класса крупности пылевых частиц и определяется по формуле:  $l_{\text{ор}} = 28,95 \cdot \ln(M_{\text{ВВ}}) - 16,26 \cdot \ln(\beta) - 24,66 \cdot \ln(S_{\text{сеч}}) + 8,72 \cdot \ln(k_s) - 121,4$ . На основании расчетов при взрывании скважинных зарядов массой до 200 кг обработки стенок и кровли выработок на расстоянии свыше 30 м не требуется. При взрывании скважинных зарядов массой 400 кг орошение стенок и кровли выработок за пределами 30 м требуется только для выработок с площадью сечения 10 и 16 м<sup>2</sup>, при площади сечения свыше 20 м<sup>2</sup> достаточно орошения зоны на расстоянии 30 м от места взрыва. При взрывании скважинных зарядов массой 600–1000 кг орошение стен и кровли выработок требуется для всех рассмотренных сечений на расстоянии от 37 до 80 м в зависимости от изменения вышечисленных параметров. Разработанные рекомендации применимы к месторождениям колчеданных руд с содержанием серы более 18%.

8. Разработаны практические рекомендации, снижающие вероятность взрыва сульфидной пыли при разработке месторождений колчеданных руд, включающие: отказ от применения систем разработки с этажным принудительным обрушением и самообрушением в пользу систем разработки с твердеющей закладкой; отказ от проходки восстающих выработок методом

VCR; сокращение массы одновременно взрываемых ВВ; отказ от бурения скважин увеличенного диаметра.

9. Выполненная оценка вероятностей возникновения и развития аварийных ситуаций, связанных со взрывом сульфидной пыли, для условий комбинированной отработки Сибайского месторождения показала, что риски превышают допустимый уровень. На основе анализа наиболее распространенных сценариев возникновения и развития аварий по фактору взрыва сульфидной пыли проведена идентификация опасностей. Установлено, что вероятность взрыва сульфидной пыли при наличии неизолированных проводников составляет  $2,31 \times 10^{-5}$ , в результате накопления отложений сульфидной пыли на контуре горных выработок и поверхности размещенного в них оборудования –  $4,03 \times 10^{-3}$ , по фактору взрыва в результате разогрева сульфидной пыли при взаимодействии с ВВ на основе аммиачной селитры –  $10^{-16}$ . Внедрение разработанных компенсирующих мероприятий снижает риск аварии до «приемлемого уровня».

#### **Основное содержание диссертации опубликовано: в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Рыльникова М.В., Митишова Н.А. Методика исследований взрывоопасности убогосульфидных руд при подземной отработке колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 9. – С. 41–51.

2. Рыльникова М.В., Митишова Н.А., Пономарев А.П. К обоснованию нормативно-правовой базы безопасного недропользования при освоении месторождений колчеданных руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 3. – С. 97–107.

3. Рыльникова М.В., Айнбиндер Г.И., Митишова Н.А., Гаджиева Л.А. Исследование закономерностей возгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 2. – С. 139–155.

#### **В прочих изданиях и материалах конференций:**

4. Рыльникова М.В., Айнбиндер И.И., Митишова Н.А. Анализ условий взрывания сульфидной пыли и способов их предотвращения при ведении горных работ // Международная научно-практическая конференция «50 лет российской научной школе комплексного освоения недр Земли»: сб. тезисов. – М.: ИПКОН РАН. 2017. – С. 316–322.

5. Рыльникова М.В., Митишова Н.А., Гавриленко В.В. Разработка условий безопасности по фактору воздействия сульфидной пыли на среду обитания в горнотехнической системе // 4-я Международная конференция по проблемам рационального природопользования «Проблемы создания экологически рациональных и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства»: тезисы докладов. – Тула, 2018 – С. 99–105.

6. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Митишова Н.А. Исследование условий и механизма взрыва пылевоздушных смесей в горных выработ-

ках при подземной разработке колчеданных месторождений // Материалы всероссийской-научно практической конференции: Научные основы безопасности горных работ. – М: ИПКОН РАН, 2018. – С. 199–206.

7. Митишова Н.А. Геолого-технологическое обеспечение взрывобезопасности при отработке колчеданных месторождений // Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ: сб. научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – Магнитогорск, 2018. – С. 34–38.

8. Митишова Н.А. Обеспечение безопасности горных работ по фактору взрывчатости сульфидной пыли // Материалы международной научно-практической конференции: Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее. – М: РГГРУ, 2018. – С. 460–461.

9. Айнбиндер И.И., Митишова Н.А., Гавриленко В.В. Обоснование условий и механизма взрывания сульфидной пыли // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. – М.: ИПКОН РАН, 2018. – С. 45–48.

10. Рьльникова М.В., Митишова Н.А. Механизм распространения взрывной волны в условиях подземного рудника при разработке колчеданных месторождений // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: Сб. ст. – Магнитогорск: МГТУ, 2019. – С. 276–281.

11. Федотенко В.С., Митишова Н.А. Обоснование механизма распространения взрывной волны как источника возникновения взрыва сульфидной пыли при подземной разработке месторождений колчеданных руд // Материалы международной научно-практической конференции: Решение экологических и технологических проблем горного производства на территории России, ближнего и дальнего зарубежья. – М., 2019. – С. 166–169.

12. Федотенко В.С., Митишова Н.А. Анализ условий и рисков возникновения и развития окислительных процессов в рудах и вмещающих породах при разработке колчеданных месторождений // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Сб. науч. тр. – М.: ИПКОН РАН, 2019. – С. 223–226.

13. Митишова Н.А. Механизм распространения взрывной волны на основе оценки тонкодисперсных аэрозолей в условиях рудников при разработке колчеданных месторождений // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: Сб. тез. – Магнитогорск: МГТУ, 2019. – С. 80–82.

14. Митишова Н.А. К вопросу оценки промышленной безопасности подземных горных работ по фактору взрыва сульфидной пыли // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность». – Севастополь: СевГУ, 2019. – С. 1065–1068.

15. Митишова Н.А. Оценка параметров взрывобезопасности углосульфидных руд при подземной отработке колчеданных месторождений Севера // Наука и инновационные разработки – Северу: II Международная научно-практическая конференция. – Мирный, 2019. – Ч. 1. – С. 75–77.