

*На правах рукописи*



**АЙНБИНДЕР Геннадий Игоревич**

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ  
ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ САМОВОЗГОРАНИЯ СУЛЬФИДОВ ПРИ  
КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
КОЛЧЕДАНЫХ РУД**

Специальность

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

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владикавказ 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
**РЫЛЬНИКОВА Марина Владимировна**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

**ПЫТАЛЕВ Иван Алексеевич,**

кандидат технических наук, доцент, начальник отдела горной науки

ОАО «Уралмеханобр»

**ДИК Юрий Абрамович,**

**Ведущая организация:**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Сибирский Федеральный университет»,  
г. Красноярск**

Защита состоится 26 июня 2020 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.246.02 созданного на базе Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) по адресу: 362021 РСО-

Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, факс 8(8672) 40-72-03,

E-mail: [info@skgmi-gtu.ru](mailto:info@skgmi-gtu.ru) или [gegelashvili@mail.ru](mailto:gegelashvili@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФБГОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)» по адресу <http://www.skgmi-gtu.ru/ru-ru/postgraduates/dissertation> .

Автореферат разослан 30 апреля 2020 г

Ученый секретарь совета,  
доктор технических наук, профессор



**Гегелашвили М.В.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Развитие мировой экономики характеризуется прогрессирующим увеличением потребления минерально-сырьевых ресурсов. В ключевых стратегических для страны задачах важнейшая принадлежит месторождениям колчеданных руд цветных и благородных металлов. При разработке месторождений колчеданных руд подземным, открытым и комбинированным способами, кроме общеизвестных опасностей, связанных с разрушением геомеханических конструкций – целиков, выработок в шахтах, бортов и отвалов на карьерах, возникает проблема эндогенной пожароопасности, вызванная самонагреванием, окислением и самовозгоранием сульфидных руд под действием кислорода воздуха.

Окисление сульфидных руд и пород происходит за счет поглощения кислорода из атмосферы и поверхности рудника и сопровождается выделением определенного количества тепла и ядовитых газов. Самовозгорание полезных ископаемых, руд и углей известно с давних времен и приводит к значительным материальным, экономическим издержкам и экологическому ущербу. Актуальность проблемы самовозгорания руд в настоящее время возросла не только в России, но и за рубежом, так как происходят неизбежные изменения в минерально-сырьевой базе ведущих мировых продуцентов металлов. Причем процесс окисления и самовозгорания сульфидов трудно прогнозировать и не всегда имеется возможность предсказать.

Особую опасность представляет освоение месторождений колчеданных руд, представленных серно-колчеданными, медно-колчеданными, медно-цинковыми и полиметаллическими сульфидами, поскольку при этом происходит интенсивное окисление и самовозгорание руд, что инициирует развитие экзогенных пожаров. Вскрытие колчеданного месторождения открытыми и подземными выработками активизирует развитие процесса окисления природных сульфидов кислородом воздуха, который прогрессирует по мере развития горных работ при комбинированной разработке месторождения и увеличения доступа кислорода воздуха к техногенно измененным колчеданным рудам и породам.

**Целью исследования** является раскрытие механизма развития и обоснование технологических решений по предотвращению и снижению рисков самовозгорания сульфидов при комбинированной разработке месторождений колчеданных руд.

**Идея:** обеспечить безопасность горных работ и снизить риск самовозгорания сульфидов при комбинированной разработке месторождений колчеданных руд возможно только путем разработки технологических решений, основанных на закономерностях совместного развития деформационных, физико-химических, газо-, пневмо- и термодинамических процессов в техногенно нарушенном массиве сульфидсодержащих руд и пород за контуром карьера под влиянием подземной добычи руд.

Для достижения установленной цели были сформированы и решены следующие задачи:

- проведено обобщение мировой практики возгорания колчеданных руд и пород, условий предотвращения и борьбы с развитием процессов окисления;
- систематизированы технологические методы предотвращения развития, локализации и ликвидации очагов возгорания сульфидов;
- разработаны программа и методики исследования для оценки условий и рисков развития окислительных процессов при разработке месторождений колчеданных руд;
- исследованы взаимосвязи развития окислительных процессов в техногенно нарушенных сульфидах с деформационными, термодинамическими процессами и параметрами системы проветривания подземного рудника;
- обоснована последовательность действий по обеспечению безопасности горных работ по фактору самовозгорания сульфидов при комбинированной разработке колчеданных руд и проведена оценка риска самовозгорания сульфидных пород с разработкой компенсирующих мероприятий, снижающих риск до приемлемого уровня.

Предметом исследования явились технологические решения по предотвращению и уменьшению риска развития окислительных процессов при разработке месторождений колчеданных руд.

Объектом исследования являются условия комбинированной разработки месторождений колчеданных руд (Гайское, Сибайское, Сентачан, Шанучское, Тарньерское, Кызыл-Таштыгское, Весенне-Аралчинское) по фактору снижения риска развития экзогенных процессов.

### **Защищаемые положения:**

1. При комбинированной разработке колчеданных месторождений самовозгорание сульфидных руд изначально связано с раскрытием системы трещин в результате деформирования основания бортов карьера с формированием каналов, открывающих доступ кислорода воздуха из рудничной атмосферы к сульфидам, и интенсифицируется в результате формирования дополнительной тяги движения воздуха за счет теплового эффекта саморазогрева оставленных в выработанном пространстве карьера и подземного рудника колчеданных руд и пород.

2. При нарастании окислительных процессов в деформированном массиве при температуре свыше 160 °С происходит потеря массы твердого с переходом элементов в газообразную и жидкую фазы, а при увеличении температуры до 600 °С потеря массы сульфидов с содержанием серы свыше 35% достигает 20%, это способствует развитию пористости, пустотности и дальнейшему деформированию массива с простиранием трещин вглубь и ростом скорости развития окислительных реакций.

3. Геотехнологические решения при комбинированной разработке по предотвращению возгорания сульфидных руд и пород, включающие совместный контроль

и управление взаимосвязанными геомеханическими, физико-химическими, газогидродинамическими и теплофизическими процессами: деформационными – путем выполаживания откосов бортов в основании при переходе к подземным работам и в последующем применением систем подземной разработки с твердеющей закладкой; газодинамическими – применением комбинированного способа вентиляции подземного рудника с формированием обособленной схемы проветривания пожароопасных участков; физико-химическими и термодинамическими – за счет исключения оставления сульфидов в изолирующих целиках между карьером и подземным рудником и в выработанном пространстве на период, превышающий инкубационный, либо их изоляции методом заиливания или бетонирования.

4. Затопление очага возгорания водой снижает температуру массива и газовыделение, но не исключает развития реакций окисления сульфидов с переходом в растворимые сульфаты и сопровождается дальнейшей потерей массы твердого.

5. Методика оценки риска возгорания колчеданных руд и пород при взаимодействии со взрывчатыми веществами в ходе подготовки массива к взрыву, основанная на определении методом ТГА- анализа времени разогрева сульфидов при контакте со взрывчатыми веществами, позволяющая выбрать для конкретного месторождения тип ВВ, его структуру, время контакта с сульфидами.

### **Научная новизна**

Раскрыты особенности процессов самовозгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождений. Обоснована методика оценки риска самовозгорания сульфидов, базирующаяся на расчете вероятности реализации различных технологических сценариев в зависимости от параметров деформационных, газодинамических, физико-химических процессов в массиве горных пород за предельным контуром карьера.

**Практическая значимость результатов** заключается в реализации методики оценки риска самовозгорания сульфидных руд и разработке технологических рекомендаций по снижению риска развития окислительных процессов при разработке месторождений колчеданных руд: Гайское, Сентачан, Шануч, Тарньерское, Кызыл-Таштыгское, Весенне-Аралчинское. Доказана предпочтительность принятия превентивных геотехнологических решений в проектах на отработку месторождений с проведением комплексных исследований по разработанной методике оценки склонности руд и пород к самовозгоранию, в том числе при взаимодействии с ВВ, и на основе этого обоснованного выбора параметров горнотехнических конструкций, системы разработки, способа и схемы вентиляции рудника, системы комплексного мониторинга параметров геомеханических, газодинамических, теплофизических и геотехнологических процессов на всех этапах разработки месторождения.

**Достоверность и методы исследований** включают сбор, обобщение и анализ результатов научных исследований и практического опыта в области решения задач по безопасности разработки месторождений колчеданных руд, представленных сер-

но-колчеданными, медно-колчеданными, медно-цинковыми и полиметаллическими разностями при интенсивном окислении и самовозгорании руд с последующим проявлением негативных последствий в виде эндогенного пожара.

**Апробация результатов.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных семинарах, научно-технических советах, международных конференциях: Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН (г. Москва, 2016–2019 гг.), ФГУП «Всероссийский институт минерального сырья им. Федоровского» (г. Москва, 2013–2015 гг.), ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск, 2015–2019 гг.), Ростехнадзор (2012–2020 гг.), Министерство природных ресурсов и экологии РФ (г. Москва, 2015–2019 гг.).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в семи статьях – в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключительных выводов и рекомендаций, списка использованной литературы, насчитывающего 136 наименований. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 15 таблиц и 44 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу условий самовозгорания сульфидов при разработке месторождений колчеданных руд и обоснованию требования к безопасности горных работ. Выполнено обобщение мировой практики возгорания колчеданных пород.

Значительный вклад в научное обоснование технологических решений по предотвращению самовозгорания углей и сульфидов при разработке сложноструктурных месторождений внесен в работах ученых: академика А.А. Скочинского, докторов и кандидатов наук Л.Н. Быкова, В.С. Веселовского, Л.Н. Виноградовой, А.С. Воронюка, Ю.А. Дика, Б.М. Зимакова, Н.О. Калединой, В.Н. Калмыкова, С.С. Кобылкина, В.Х. Кумыкова, Т.М. Кумыковой, Н.Г. Матвиенко, В.М. Маевской, В.М. Огиевского, Г.Н. Орлеанской, И.М. Печука, М.С. Плаксина и многих других. Проведенные ранее исследования, практический опыт, анализ проектных и научных решений свидетельствует, что опасность самовозгоранием сульфидных руд создает повышенные промышленные, экологические и экономические риски для горнодобывающих предприятий и является одной из наиболее важных, актуальных и сложно решаемых задач.

При этом отсутствуют решения по предотвращению самовозгорания сульфидов при комбинированной разработке месторождений колчеданных руд. Особенно важно оценить условия и риски возникновения и развития окислительных процессов в рудах и вмещающих породах при комбинированной разработке месторождений

колчеданных руд с проектным обоснованием геотехнологических решений, обеспечивающих превентивное предупреждение, диагностику и своевременное предотвращение самовозгорания сульфидных руд.

В настоящее время для цветной металлургии России весьма высока роль месторождений сульфидных руд: медно-колчеданных, медно-никелевых, свинцово-цинковых и др., освоение которых сопровождается нарушением природного равновесия, связанного с окислением сульфидов. Доступ кислорода воздуха и поверхностных вод в техногенно нарушенный массив горных пород, навалы обрушенных руд, в горные выработки, отвалы вскрышных пород вызывает развитие процессов окисления, сопровождаемых негативными экологическими последствиями. Выделение тепла при окислении сульфидов сопровождается саморазогревом руд, что инициирует развитие подземных пожаров.

Обобщение опыта разработки самовозгорающихся руд и борьбы с пожарами на карьерах и в шахтах свидетельствует, что при тушении эндогенных пожаров теряются подготовленные к выемке запасы, а также подготовленные горные выработки и техника. Ко всему прочему, нет гарантии, что даже при принятии всех профилактических мероприятий пожар не возобновится через какой-то период времени. С экономической точки зрения эндогенный пожар – это высокий социальный, финансовый и экологический ущерб. При этом происходит невозвратная потеря запасов месторождений.

Очевидно, что при разработке месторождений сульфидных руд нельзя допускать их возгорания ввиду угрозы потери всего месторождения со всеми исходящими экономическими и экологическими последствиями.

Анализ состояния изученности проблемы позволил сформулировать цель, задачи и определить методы исследований.

Во второй главе диссертации разработаны методические положения по изучению условий развития и предотвращения возгорания колчеданных руд и пород при комбинированной разработке месторождений.

Механизм самовозгорания колчеданных пород и углей в массиве горных пород при разработке месторождений определяется закономерностями течения химических реакций во взаимосвязи с деформационными и аэрогазодинамическими процессами, происходящими исключительно в техногенно нарушенном массиве либо в навале разрушенных пород. Принципиальное отличие механизма возникновения эндогенных пожаров на месторождениях колчеданных руд и углей состоит в том, что на поверхности колчеданных пород сорбции кислорода не происходит, окисление происходит даже при полном подтоплении горящего массива сульфидов водой. Более высокие температуры реакций окисления и горения колчеданных руд и пород по сравнению с окислением углей обуславливают большую сложность выбора мер борьбы с эндогенными пожарами и предпочтительность принятия и реализации превентивных мер.

Природа окисления сульфидов за предельным контуром карьера в глубине массива при комбинированной геотехнологии начинается с раскрытия единичных трещин, затем образуются системы трещин в результате деформирования основания бортов, что приводит к активной аэродинамической связи карьера и подземного рудника с формированием каналов, по которым происходит поступление кислорода воздуха из рудничной атмосферы к сульфидсодержащим минералам. При этом процессы окисления интенсифицируются в результате дополнительной тяги движения воздуха за счет теплового эффекта саморазогрева оставленных в выработанном пространстве карьера и подземного рудника колчеданных руд и пород.

В результате развития подземных работ при выемке руды за предельным контуром в бортах и основании карьера происходит разгрузка призмы упора бортов и, как следствие, рост деформаций с раскрытием имеющихся и появлением новых техногенных трещин, которые становятся активными каналами связи подземного рудника с атмосферой поверхности, по которым происходит активное движение кислорода, инициируется развитие эндогенных процессов разогрева и самовозгорания сульфидов.

Систематизированы технологические методы предотвращения развития, локализации и ликвидации очагов возгорания сульфидов (табл. 1).

Для оценки поведения руд и пород в борту карьера при комбинированной разработке выполнено экспериментальное изучение взаимосвязанных геомеханических, физико-химических, газо- и термодинамических процессов в очагах горения. Рассмотрено три сценария возникновения очага горения и путей поступления воздуха из подземного рудника в карьер:

- по единичным трещинам, сформировавшимся в результате развития деформационных процессов в прикарьерном массиве;
- по сформировавшимся в результате развития деформационных процессов системам трещин в прикарьерном массиве;
- по пустотам в обрушенной горной массе в бортах и основании карьера, сформировавшейся в результате обрушения колчеданных руд и пород.

**Таблица 1.** Классификация способов предотвращения и локализации очагов возгорания сульфидных руд при комбинированной геотехнологии

| № п/п | Процессы                              | Методы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Технологические решения                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Деформационные в массиве горных пород | <p>Минимизация развития деформационных процессов на основе применения систем комплексного геомониторинга и разработки месторождений:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- открытой с выполаживанием углов откосов в основании бортов карьера и на отвалах;</li> <li>- подземной: с заполнением выработанного пространства твердеющей закладкой, с обрушением руды и последующим профилактическим заиливанием или бетонированием обрушенных пород либо с обрушением руды и нагнетательной вентиляцией, обеспечивающей отвод воздуха из обрушенного пространства в атмосферу, минуя горные выработки, с исключением оставления колчеданных руд и пород в массиве и отбитых сульфидсодержащих пород в выработанном пространстве</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- выполаживание откосов бортов карьера в основании и отвалов;</li> <li>- применение на подземных работах систем разработки с закладкой выработанного пространства либо с профилактическим заиливанием;</li> <li>- ограничение сроков извлечения отбитых руд и пород продолжительностью инкубационного периода;</li> <li>- исключение оставления обрушенных руд и пород в выработанном пространстве в неизолированном состоянии;</li> <li>- применение высокопроизводительных систем разработки и техники</li> </ul> |
| 2     | Газодинамические                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- предотвращение доступа кислорода для снижения интенсивности горения;</li> <li>- минимизация выделения вредных веществ при тушении пожара;</li> <li>- уменьшение содержания кислорода в воздухе и охлаждение контуров выработок;</li> <li>- реверсирование вентиляционной струи на участке активного горения либо в масштабе всей шахты</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- применение комбинированного способа вентиляции подземного рудника с формированием обособленной схемы проветривания пожароопасных участков;</li> <li>- применение системы пневмоизоляции перемычек</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 3     | Физико-химические и термодинамические | <ul style="list-style-type: none"> <li>- нагнетание воды, жидких ингибиторов и инертных газов в массив отвала;</li> <li>- сокращение доступа кислорода;</li> <li>- снижение температуры пород и интенсивности горения;</li> <li>- заполнение пустот в горящем массиве</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- исключение оставления разрушенных сульфидов и рудной мелочи на период, превышающий инкубационный;</li> <li>- снижение содержания кислорода в зоне очага;</li> <li>- изоляция разрушенных сульфидов и рудной мелочи методом заиливания или бетонирования;</li> <li>- затопление очагов горения</li> </ul>                                                                                                                                                                                                          |

Сценарии, связанные с вероятностью формирования единичных трещин и отслоений по плоскостям напластования трещин, определены на основании установленного факта, что при прекращении эффективной эксплуатации карьера происходит накопление напряжений в массиве, слагающем его борта, что приводит к развитию деформаций, смещениям и раскрытию системы трещин. Как следствие этого происходят:

- создание и развитие аэродинамических связей между подземными горными выработками и атмосферой карьера, что в значительной мере определяет интенсификацию окислительных процессов в массивах нарушенных сульфидных руд и пород;
- развитие деформационных процессов, приводящих к обрушению руд и пород и механическому перекрытию ранее пройденных в борту карьера подземных выработок – штолен, наклонных съездов, штреков и пр. В результате отсутствия мер по сохранности этих выработок исключается доступ людей и оборудования в карьер.

В соответствии с методикой моделирования процесса поступления воздуха в горный массив рассмотрены сценарии развития событий в среде ANSYS. Аэродинамическая связь открытых и подземных горных выработок рассматривалась в качестве механизма переноса и отвода тепла от окисляемых пород, обладающих высоким тепловым потенциалом.

Анализ последовательности химических реакций убедительно свидетельствует, что при температуре свыше 900 °С формируется гематит, который ранее, при производстве из пиритного концентрата серной кислоты, использовался в качестве железной руды, а также в кирпичной, лакокрасочной и цементной промышленности. При температурах свыше 650 °С оксид железа (III) связывает в ферриты оксиды Fe (II), Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Cd, образуя соединения типа  $n\text{MeO} \cdot m\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Доказано, что высокие температуры реакций окисления и горения колчеданных руд и пород по сравнению с температурой горения углей обуславливают большую сложность принятия мер борьбы с рудничными эндогенными пожарами и предпочтительность принятия и реализации превентивных мер. Выполненный анализ механизма самонагрева сульфидных руд показал, что автоокисление их, лежащее в основе процесса, обуславливает случайный характер зарождения очагов самонагрева и локальное их распределение в массиве или в отвале.

В результате моделирования процесса движения воздуха в техногенно измененном массиве колчеданных руд и пород при комбинированной разработке месторождений в соответствии с тремя рассмотренными сценариями, характеризующимися разными путями распространения воздуха с различными возможностями своевременного обнаружения возгорания и тушения пожаров, установлено, что наибольшую опасность представляют ситуации возгорания руд в массиве, интенсивно

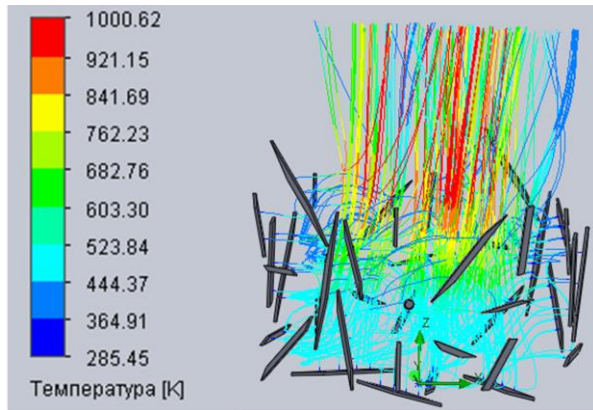
нарушенном системами трещин, где инкубационный период до начала интенсивного горения может продолжаться неопределенно долго и распространяться далеко вглубь массива по мере раскрытия трещин.

Установлено, что чем выше начальная температура воздушной среды, подаваемой в нижнюю часть трещины с одинаковой площадью раскрытия, тем обширнее формируется очаг горения в зоне после «пережима» трещин. Вероятно, горение в борту карьера, представленном трещиноватым массивом горных пород, может быть спровоцировано возгоранием сульфидов как в зонах пережима, так и в зонах перегибах трещин.

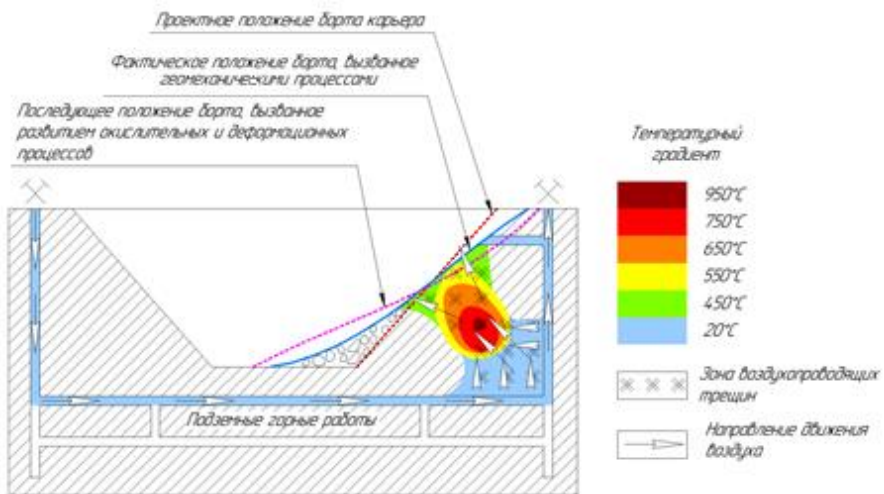
Созданная модель позволяет установить наиболее общие закономерности развития процессов окисления в техногенно нарушенном массиве:

- нижняя часть массива, нарушенного системой трещин, представлена зоной отвода тепла, которая может распространяться на многие десятки и сотни метров вверх, что зависит от конкретных параметров горнотехнической системы. Это обуславливает факт, что в основании и борту карьера, даже над горными выработками, где работают люди, может сформироваться ранее не зафиксированный очаг окисления сульфидов. Его обнаружение весьма затруднительно и даже невозможно без проведения специального термодинамического мониторинга в глубине массива горных пород, т. к. вся нижняя часть массива может быть охлаждена, температура пород в нем соответствует температуре воздуха в подземном руднике;
- в системах трещин отсутствует явная зона боковой диффузии воздуха во вмещающие породы, т. к. механизм распространения окислительных процессов по системе трещин в сульфидах реализуется по принципу «печной топки». Этот факт также свидетельствует о сложно прогнозируемом развитии зон горения и трудностях их обнаружения даже в зоне ведения горных работ;
- интенсивный очаг горения сульфидов в техногенно нарушенном массиве с системой разнонаправленных разветвленных трещин в зависимости от условий развития может располагаться в глубине массива на десятки и сотни метров выше зоны отвода тепла (рис. 1).

В случае развития процессов горения сульфидных руд и пород в глубине массива (рис. 2) в результате окисления и фазовых переходов сульфидов в газообразное состояние происходит потеря массы твердого вещества, уменьшение плотности пород в массиве, формирование новых пустот и пористости, что влечет развитие процессов деформирования бортов карьера и, как следствие, интенсификацию процессов горения.



**Рисунок 1.** Интерфейс модели для изучения характера движения потока через системы трещин с постоянным объемным расходом воздуха  $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$  и пористостью тела при перепаде давления  $5 \text{ Па}$



**Рисунок 2.** Схема механизма роста пустотности за контуром карьера и нарастающая интенсивность деформирования горного массива в результате фазовых переходов сульфидных минералов в газ при высоких температурах

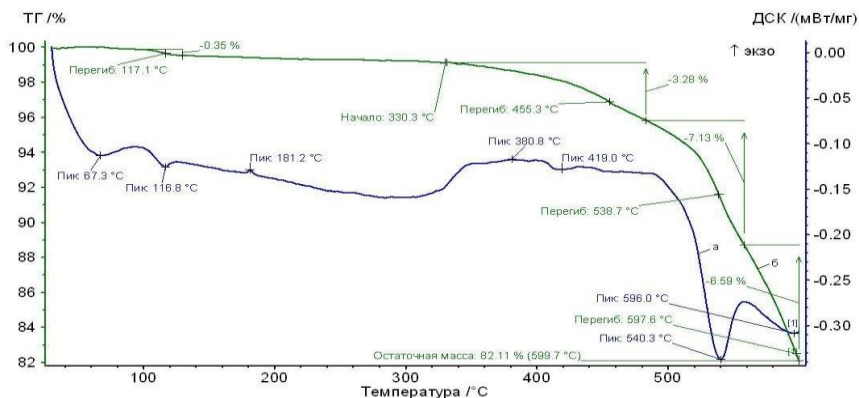
Выполненными исследованиями установлено, что при подземной и комбинированной разработке месторождений сульфидных руд безопасное и эффективное освоение запасов требует количественного учета параметров взаимосвязанных деформационных, окислительных и газотермодинамических процессов, обуславливающих в результате перехода сульфидов в газовую фазу при высоких температурах (свыше  $160^\circ\text{C}$ ) нарастание пористости, пустотности в массиве горных пород с активизацией

процессов деформирования массива и развитием аэродинамических связей выработок подземного рудника и атмосферы карьера.

Обоснованы требования к выбору способа, схемы и параметров системы вентиляции подземного рудника при разработке месторождений самовозгораемых колчеданных руд, а также меры по выявлению, локализации очагов горения и предотвращению развития пожаров путем реализации разработанных геотехнологических решений по снижению риска самовозгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождения.

Третья глава посвящена исследованию факторов и параметров процессов окисления сульфидов.

Выполненный термохимический ТГА-анализ склонности сульфидов к самовозгоранию показал, что в исследуемом диапазоне температур (до 800 °C) убыль массы пиритовых пород, а также медно-колчеданных, цинк-колчеданных и смешанных руд превышает в ряде случаев 20% (рис. 3).



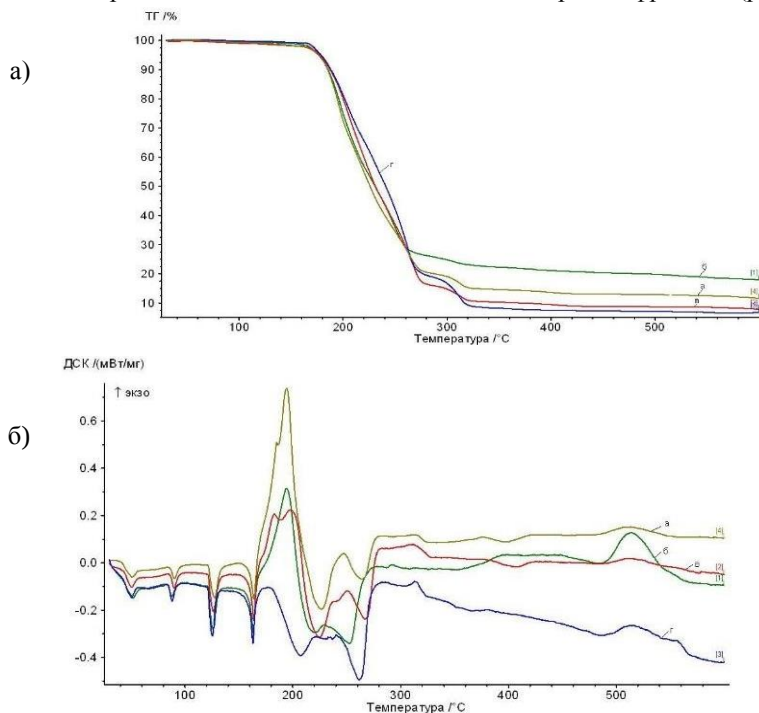
**Рисунок 3.** Кривые синхронного термического анализа пробы серного колчедана (содержание S – 42,7%, размер частиц – менее 40 мкм). На рисунках синим цветом показаны ДСК-кривые; зеленым – ТГ-кривые

Установлено, что в диапазоне температур до 600 °C не происходит стабилизации процессов потери массы, в интервале 580–600 °C фиксируется экзотермический пик с продолжающейся после него экзотермической реакцией.

Подтверждена цикличность возникновения экзогенных и эндогенных всплесков в различных типах колчеданных руд в ходе их разогрева во всем диапазоне температур 110–900 °C. При этом происходит потеря массы твердого вещества за счет потери газообразных фаз, причем относительная величина потери массы при температуре очага горения свыше 600 °C достигает 20%. Этот факт необходимо учитывать при оценке структуры массива с учетом развития в нем деформационных процессов, обусловленных технологической последовательностью вовлечения ранее горящих масс в эксплуатацию.

Затопление очага возгорания водой снижает температуру массива и газовыделение, но не исключает развития реакций окисления сульфидов с переходом в растворимые сульфаты и сопровождается дальнейшей потерей массы твердого. При этом ионы металлов переходят в растворы и содержание их в определенных условиях может достигать продуктивных значений, пригодных для переработки гидрометаллургическими геотехнологиями.

В результате экспериментальной оценки влияния взаимодействия ВВ на самовозгорание сульфидов методом синхронного термического анализа установлено, что при разогреве пирита до температуры  $158,8^{\circ}\text{C}$  в ходе заряжания скважин/шпуров ВВ весьма вероятно самовоспламенение тонкодисперсной фракции (рис. 4).

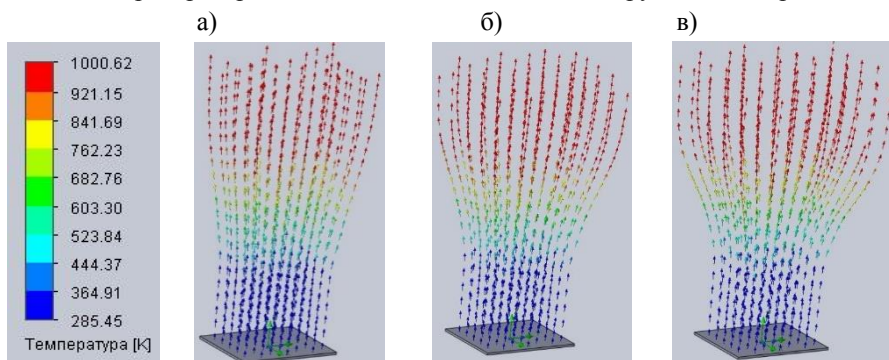


**Рисунок 4.** Кривые синхронного термического анализа проб с аммиачной селитрой  
 а) ТГ-кривые смесей проб с аммиачной селитрой (1:9 (масс.)) б) ДСК-кривые смесей проб с аммиачной селитрой (1:9 (масс.)): а – размер частиц менее  $0,040\text{ мм}$ ; б – размер частиц  $-0,071+0,040\text{ мм}$ ; в – размер частиц  $-0,1+0,071\text{ мм}$ ; г – размер частиц  $-0,125+0,1\text{ мм}$

Для предотвращения неконтролируемого взрыва ВВ необходим выбор типа ВВ с определением допустимой продолжительности контакта с породами месторождения, контроль температуры массива, удаление тонкой фракции и промывка скважин/шпуров перед заряжением ВВ.

Для определения допустимого времени контакта ВВ с колчеданными рудами при повышенной температуре массива были проведены исследования по оценке химической совместимости гранулированных ВВ с сульфидной рудой для условий Гайского ГОКа, рекомендованы предпочтительные типы ВВ: Грамотол Т-20 и Грамонит ТММ.

В результате исследования взаимосвязи окислительных процессов сульфидов с газодинамическими процессами при проветривании подземного рудника и деформационными процессами в массиве горных пород установлено, что при неизменной площади поперечного сечения зоны входа воздушной струи, но при увеличении объемного расхода воздуха на входе в 10 раз диффузионные свойства меняются в зависимости от изменения пористости тела и что это вызвано формированием тяги воздушной струи (рис. 5). Отмечено, что при повышении площади потока воздуха и низком его объемном расходе на входе обеспечиваются более высокие показатели диффузии, вне зависимости от пористости и гранулометрического состава моделируемой обрушенной массы. Причем диффузия воздуха в горизонтальном направлении может распространяться в объеме всего навала обрушенных пород.



**Рисунок 5.** Моделирование потока через провал площадью  $19\,052,1\text{ мм}^2$  при постоянном объемном расходе воздуха  $0,1\text{ м}^3/\text{с}$  и переменной пористости тел с перепадом давления: а) 1 Па, б) 5 Па, в) 10 Па

Выполненное моделирование процесса распространения воздуха в техногенно измененном массиве медно-колчеданных руд и пород показало, что наибольшую опасность представляют ситуации возгорания руд в массивах, интенсивно нарушенных системами трещин, где инкубационный период до начала интенсивного горения может продолжаться неопределенно долго и распространяться далеко вглубь массива по мере раскрытия трещин.

В четвертой главе на основании выполненных исследований предложены технологические рекомендации по обеспечению безопасности горных работ по фактору самовозгорания сульфидов при разработке месторождений колчеданных руд.

В результате выполненного анализа горно-геологических и горнотехнических условий разработки исследуемых месторождений сульфидных руд (Гайское, Сибайское, Сентачан, Шанучское, Тарньерское, Кызыл-Таштыгское, Весенне-Аралчинское) систематизированы факторы возгорания пород и руд и обоснованы требования к обеспечению технологических мер безопасности.

Выполнен анализ опасностей и оценен уровень риска возникновения и развития аварий на исследуемых объектах ведения горных работ. Проведена идентификация опасностей по объектам исследований, сгруппированным по способам разработки: открытый, подземный, комбинированный открыто-подземный. Установлено, что для объектов ведения открытых горных работ уровень риска возникновения и развития аварий, связанных с возгоранием отбитой горной массы (забой, отвал, рудный склад), характеризуется как приемлемый, что указывает на крайне малую вероятность возникновения очага возгорания.

Показано, что при комбинированной разработке месторождения сценарий самовозгорания руд в результате ликвидации карьера с оставлением за контуром сульфидных руд и пород без обеспечения доступа в карьер при комбинированной открыто-подземной разработке является вероятным и требует превентивной реализации компенсирующих мероприятий. Установленные фундаментальные закономерности развития аварии на основе взаимосвязи деформационных процессов и самовозгорания руд показали, что для снижения уровня риска возгорания сульфидов в проектах требуется разработка мероприятий, компенсирующих повышенный риск комбинированной разработки месторождений сульфидных руд. Разработаны компенсирующие мероприятия с достижением приемлемого уровня риска.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, изложено научное обоснование геотехнологических решений по снижению риска самовозгорания сульфидов при комбинированной разработке месторождений колчеданных руд, основанных на учете при разработке технологических решений по снижению риска аварий закономерностей совместного развития деформационных, физико-химических, газо- и термодинамических процессов в техногенно нарушенном массиве за контуром карьера, что имеет важное значение для безопасного и устойчивого функционирования горнопромышленного комплекса России.

**Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:**

1. На основе обобщения мировой практики возгорания колчеданных руд и пород, а также условий предотвращения и борьбы с развитием окислительных процессов систематизированы и разработаны новые геотехнологические решения по предотвращению, локализации и ликвидации очагов возгорания сульфидов на основе комплексного управления взаимосвязанными геомеханическими, физико-

химическими, газогидродинамическими и термofизическими процессами, что позволяет выбрать приоритетные технологические решения в соответствии с особенностями условий освоения месторождения.

2. Установлены закономерности низкотемпературного окисления и самонагрева сульфидсодержащих пород. Показано, что более высокие температуры реакций окисления и горения колчеданных руд и пород и иной механизм развития процессов, по сравнению с окислением углей, обуславливают большую сложность разработки и принятия мер борьбы с эндогенными пожарами и предпочтительность реализации в проектных решениях превентивных мер. Так, эндогенные пожары возникают чаще всего там, где в руде не менее 70% сульфидов металлов, что соответствует содержанию серы свыше 35% и требует количественного учета параметров взаимосвязанных деформационных, окислительных и газотермодинамических процессов.

3. Разработана программа и методика исследования для оценки условий и риска развития окислительных процессов при комбинированной разработке месторождений колчеданных руд, основанная на определении методом ТГА-анализа характера горения вмещающих пород и сульфидсодержащих фракций при контакте со взрывчатыми веществами с оценкой минимальной температуры вспышки, которая ниже по сравнению с температурой первой вспышки без присутствия ВВ. Для условий разработки Гайского месторождения рекомендованы предпочтительные типы ВВ: Граммотол Т-20 и Граммонит ТММ.

4. На основе моделирования процесса поступления воздуха в горный массив установлено, что при подземной и комбинированной разработке месторождений сульфидных руд безопасное и эффективное освоение запасов требует количественного учета параметров взаимосвязи развития деформационных, окислительных и газотермодинамических процессов. Формирование и развитие аэродинамических связей между подземными горными выработками и пространством карьера при активизации деформационных процессов, приводящих к обрушению руд и пород и механическому перекрытию ранее пройденных в борту подземных выработок и исключению доступа людей и оборудования в карьер.

5. При нарастании окислительных процессов в деформированном массиве при температуре свыше 160 °С происходит потеря массы твердого с переходом элементов в газообразную и жидкую фазы, что обуславливает нарастание пористости, пустотности в массиве горных пород, дальнейшее его деформирование и окисление минералов, а также активизацию аэродинамических связей выработок подземного рудника и атмосферы карьера с прохождением кислорода воздуха системы рудничной вентиляции через техногенно нарушенный массив колчеданных руд и пород. При увеличении температуры до 600 °С потеря массы сульфидов с содержанием серы свыше 35% достигает 20%. Подтверждена цикличность возникновения

экзогенных и эндогенных вспышек в различных типах колчеданных руд в ходе их разогрева в диапазоне температур 110–900 °С.

6. Затопление очага возгорания водой снижает температуру массива и газовыделение, но не исключает развития реакций окисления сульфидов с переходом в растворимые сульфаты и сопровождается дальнейшей потерей массы твердого до 35%. В раствор переходят ионы Fe (II), Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Cd, редкоземельных элементов.

7. На основе анализа опасностей оценен уровень риска возникновения и развития аварий на исследуемых объектах ведения горных работ (Гайское, Сибайское, Сентачан, Шанучское, Тарньерское, Кызыл-Таштыгское, Весенне-Аралчинское месторождения), проведена идентификация опасностей. Установлено, что для объектов ведения открытых горных работ уровень риска возникновения и развития аварий, связанных с возгоранием отбитой горной массы (забой, отвал, рудный склад), характеризуется как приемлемый. При комбинированной разработке месторождений Гайское, Шануч, Кызыл-Таштыгское и Весенне-Аралчинское уровень риска характеризуется как «практически возможный» с катастрофическими последствиями.

8. Разработаны компенсирующие мероприятия, снижающих риск до приемлемого уровня, включающие установку термодатчиков в горном массиве между выработанным пространством карьера и выработками подземного рудника, обеспечение доступа работников и горнотранспортной техники для возможности тушения рудничных пожаров, мониторинг развития деформационных процессов, контроль параметров воздушной струи подземного рудника, меры по тушению рудничных пожаров в бортах и основании карьера. Риск развития аварии в результате реализации компенсирующих мероприятий снижается до уровня «маловероятный».

**Основные научные и практические результаты диссертации изложены в следующих опубликованных работах автора Айнбиндера Г.И.:**

***В изданиях, рекомендуемых ВАК России:***

1. **Айнбиндер Г.И.** Исследование химической совместимости Граммотола Т-20 и Граммонита ТММ с вмещающими горными породами и внутрискважинными водами подземного рудника ПАО «Гайский ГОК» / Г.И. Айнбиндер, М.Д. Демчишин, М.А. Зевакин, Н.Л. Полетаев, В.А. Соснин, Д.С. Печурина // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 4. С. 47–52. (индексирована в базах **Scopus**)

2. **Айнбиндер Г.И.** Исследование химической совместимости ВВ с сульфидной рудой в герметичной ампуле / Г.И. Айнбиндер, Н.Л. Полетаев, В.А. Соснин, Д.С. Печурина // Горный журнал. – 2017. – №3. С. 63–66. (индексирована в базах **Scopus**)

3. **Айнбиндер Г.И.** Исследование пожаровзрывоопасности образцов горных пород Кызыл–Таштыгского полиметаллического месторождения / Г.И. Айнбиндер, М.Д. Демчишин, Е.А. Губина, В.В. Вдовина, С.А. Зуев, М.О. Девликанов // Пожарная безопасность. – 2017. – № 4. С. 70–73.

4. **Айнбиндер Г.И.** Систематизация технологических методов предотвращения, локализации и ликвидации очагов возгорания сульфидов / М.В. Рыльникова, Г.И. Айнбиндер // Маркшейдерский вестник. – 2020. - №2 (135). С. 53-56.

5. **Айнбиндер Г.И.** Требования и факторы безопасной отработки месторождений колчеданных руд / М.В. Рыльникова, Г.И. Айнбиндер, Е.Н. Есина // Горная промышленность – 2020. - №2 (150). С. 82–85.

6. **Айнбиндер Г.И.** Оценка взаимосвязи самовозгорания пород с деформационными процессами при комбинированной разработке месторождений колчеданных руд / М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко, Г.И. Айнбиндер, Е.Н. Есина // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 2. С. 126–138. (индексирована в базах **Web of Science**)

7. **Айнбиндер Г.И.** Исследование закономерностей возгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождений / М.В. Рыльникова, Г.И. Айнбиндер, Н.А. Митишова, Л.А. Гаджиева // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 2. С. 139–155. (индексирована в базах **Web of Science**)