

*На правах рукописи*

**Киркин Александр Павлович**



**УПРАВЛЕНИЕ УДАРООПАСНОСТЬЮ МАССИВА  
СПЛОШНЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД БУРОВЗРЫВНЫМ  
СПОСОБОМ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО  
СОСТОЯНИЯ**

*Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Господариков Александр Петрович*

**Официальные оппоненты:**

*Еременко Виталий Андреевич*

доктор технических наук, профессор РАН, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», научно-исследовательский центр «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии», директор;

*Кузьмин Сергей Владимирович*

кандидат технических наук, акционерное общество «Сибирская угольная энергетическая компания», дирекция технических сервисов, руководитель по направлению.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2023 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 25 июля 2023 г.

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ**  
Диссертационного совета



Афанасьев  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** При добыче руд подземным способом на больших глубинах рудников Талнахского и Октябрьского месторождений в крепких скальных породах очистные работы зачастую ведутся на участках, склонных или опасных по горным ударам. На этих участках в соответствии с Федеральными нормами и правилами и практикой ведения горных работ требуется предварительное создание защищенных зон. В настоящее время наиболее эффективным методом решения данной проблемы является бурение строчки разгрузочных скважин. Основная цель такого бурения – инициация управляемого процесса разрушения в режиме пластического деформирования локальной области массива горных пород, приводящая его к снижению значений действующих напряжений. Применение при разработке удароопасных месторождений данного метода подтвердило свои надежность и эффективность при ведении горных работ. Отметим при этом имеющийся ряд недостатков метода: необходимость бурения скважин большого и, соответственно, потребность в специализированном буровом оборудовании; значительный объем буровых работ и высокая стоимость бурения скважин большого диаметра; технологические сложности при организации горных работ в подземных условиях.

В настоящее время возникла тенденция по снижению мощностей обрабатываемых рудных тел, сложенных из сплошных сульфидных руд. Так, 10 лет назад обрабатываемая мощность Хараелахской основной залежи составляла порядка 30 м, а введенные в последнее время в эксплуатацию залежи Северная третья и Северная четвертая Октябрьского месторождения имеют мощности в пределах 15-18 м. Поэтому для поддержания темпа производства необходимо увеличивать как площади ведения очистных работ, так

и увеличение площадей разгрузки, а следовательно, и объемов бурения. В 2015 году объем бурения разгрузочных скважин на руднике «Таймырский» составлял порядка 70 тыс. м, а на 2023 год были заложены объемы бурения порядка 90 тыс. м. На руднике «Скалистый» увеличение объема бурения разгрузочных скважин за последние 7 лет выросло с 30000 м до 55000 м, то есть увеличилось практически в 2 раза. На остальных рудниках Талнахского и Октябрьского месторождений значительного увеличения объемов бурения не происходит, но текущие показатели объемов бурения также высоки: порядка 20000 м (рудники «Октябрьский» «Комсомольский»).

Таким образом, совершенствование и применение метода разгрузочных скважин является очень актуальной задачей при разработке подземным способом месторождений, склонных и опасных по горным ударам.

#### **Степень ее разработанности**

Вопросам приведения массива горных пород в неудароопасное состояние посвящены работы ученых: Б.Н. Кутузова, И.М. Петухова, В.Н. Тюпина, Р.Р. Andrieux, Н. Mitri, М.Р. Saharan, В. Tang и другие.

Исследованию напряженно-деформированного состояния массива горных пород, в том числе и склонного к хрупкому разрушению, посвящены работы ученых: С.Г. Авершина, К.В. Ардашева, Н.С. Булычева, В.А. Еременко, А.П. Господарикова, В.П. Зубова, М.Д. Ильинова, М.А. Карасева, А.А. Козырева, А.М. Линькова, Т.И. Лазаревича, В.П. Марысюка, Н.Ю. Рассказова, В.Д. Палия, А.Г. Протосени, А.Н. Ставрогина, В.С. Сидорова, Д.В. Сидорова, Б.Г. Тарасова, А.П. Тапсиева, В.Л. Трушко, Г.Л. Фисенко, А.А. Филинкова, А.Н. Шабарова, Е.И. Шемякина и др.

**Объект исследования.** Удароопасность массива сплошных сульфидных руд.

**Предмет исследования.** Изменение физико-механических свойств удароопасных сплошных сульфидных руд при их разупрочнении взрывом.

**Цель работы.** Разработка способа снижения удароопасности массива сплошных сульфидных руд в условиях сложного напряженного состояния.

**Идея работы.** Понижение удароопасности массива сплошных сульфидных руд в условиях сложного напряженного состояния достигается буровзрывным способом с учетом изменения их физико-механических свойств при разупрочнении.

**Задачи:**

1. Обзор отечественного и зарубежного опыта в вопросах управления горным давлением и предупреждения горных ударов.

2. Обоснование оценки и критерия удароопасности массива горных пород на основе исследования основных физико-механических свойств сплошной сульфидной руды с учетом ее нарушенности.

3. Разработка эффективной методики проведения специализированных механических испытаний по оценке удароопасности массива горных пород при разработке месторождений сплошных сульфидных руд.

4. Обоснование и выбор основных параметров буровзрывных работ по приведению массива горных пород в неудароопасное состояние.

### **Научная новизна работы:**

1. Получена зависимость изменения прочностных свойств сплошных сульфидных руд при их разупрочнении взрывным способом рассредоточенными зарядами с воздушным промежутком в условиях действия напряженного состояния;

2. Получены зависимости изменения деформационных свойств сплошных сульфидных руд при их разупрочнении взрывным способом рассредоточенными зарядами с воздушным промежутком в условиях действия напряженного состояния.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Получены количественные оценки изменения прочностных и деформационных свойств сплошной сульфидной руды в результате применения мероприятий по предупреждению горных ударов.

2. Определено влияние напряжений в массиве горных пород на изменение физико-механических свойств сплошных сульфидных руд разупрочнением взрывным способом.

3. Разработаны методические рекомендации для обоснования основных параметров буровзрывных работ для разгрузки массива горных пород с применением рассредоточенных зарядов с воздушным промежутком и дополнительного инструментального контроля удароопасности массива в условиях рудников Октябрьского и Талнахского месторождений. Разработана программа для ЭВМ для обеспечения дополнительной оценки удароопасности.

4. Результаты диссертационной работы приняты к использованию в деятельности ООО «Институт Гипроникель» в рамках научного сопровождения по безопасной и эффективной отработке руд глубоких рудников Талнаха (акт о внедрении результатов от 23.05.2023).

**Методология и методы исследований.** Работа выполнена с использованием комплексного метода исследований, включающего анализ опубликованных источников и результатов исследований, оценку нарушенности массива горных пород эмпирическими подходами, физико-механические испытания руд и пород, специализированные модельные испытания. В качестве основного метода применен лабораторный эксперимент.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. При слабой нарушенности сплошных сульфидных руд, отличие упругих свойств в образце от аналогичных свойств в массиве находится в пределах 20%;

2. Изменения физико-механических свойств сплошных сульфидных руд при разупрочнении взрывом с применением рассредоточенных зарядов с воздушным промежутком в условиях действия сложного напряженного состояния описываются линейными зависимостями с коэффициентами детерминации, превышающими значение 0,93;

3. Применение предварительной разгрузки массива сплошных сульфидных руд взрывным способом с обоснованным применением рассредоточенных зарядов позволяет перевести его в неудароопасное состояние с пластическим режимом деформирования.

**Степень достоверности и апробация результатов** подтверждается представительным объемом выполненных испытаний по определению физико-механических свойств руд и пород Норильского промышленного района, значительным количеством данных о нарушенности массива горных пород, результатами специализированных модельных экспериментов и их удовлетворительной сходимостью с результатами по методикам других авторов.

Результаты исследований и основные научные положения докладывались на следующих конференциях:

- Всероссийский этап международного конкурса молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования (апрель 2021 года, г. Санкт-Петербург);

- Международно-практическая конференция Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование (октябрь 2021 года, г. Санкт-Петербург);

- XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2023» (февраль 2023 года, г. Москва).

**Личный вклад автора** заключается в постановке целей и задач исследования; формулировке научных положений; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, а также нормативной документации; проведении испытаний по определению физико-механических свойств пород и руд Норильского промышленного района; разработке методики и проведении специализированных механических испытаний по определению степени изменения физико-механических свойств сплошных сульфидных руд при применении противоударных мероприятий, анализе полученных экспериментальных результатов; разработке практических рекомендаций по выбору параметров для приведения массива горных пород в неудароопасное состояние буровзрывным способом.

**Публикации.** Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях - в изданиях, входящих в



международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований. Диссертация изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 37 таблиц и 3 приложения.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи исследований и научная новизна, раскрыты теоретическая новизна и практическая значимость исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор по управлению горным давлением на подземных рудниках в том числе и мероприятия по предотвращению горных ударов. Представлен мировой опыт по разгрузке удароопасных участков массива горных пород взрывным способом.

**Во второй главе** представлены результаты физико-механических испытаний руд и пород Норильского промышленного района. Произведена оценка нарушенности массива. Сопоставлены физико-механические свойства в массиве и в образце. Рассмотрены методы оценки удароопасности горных пород с привязкой к рудникам Норильского промышленного района.

**В третьей главе** проведены специализированные модельные испытания разгрузки массива горных пород, сложенных из сплошной сульфидной руды. Произведена количественная оценка изменения прочностных свойств и деформационных характеристик на образцах сплошной сульфидной руды.

**В четвертой главе** обоснованы основные параметры буровзрывных работ, разработаны рекомендации по применению разгрузки массива горных пород взрывом. Представлены результаты укрупненной оценки экономической эффективности предлагаемых мероприятий.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы, полученные при выполнении исследований.

Основные результаты исследований отражены при доказательстве следующих научных положений:

**1. При слабой нарушенности сплошных сульфидных руд, отличие упругих свойств в образце от аналогичных свойств в массиве находится в пределах 20%.**

Для сопоставления физико-механических свойств руд и горных пород Норильского промышленного района был произведен комплекс лабораторных испытаний, включающий в себя определение предела прочности  $\sigma_{сж}$  при одноосном сжатии и модуля упругости  $E_y$  образцов следующих литологических разновидностей: сплошная сульфидная руда; вкрапленные руды, представленные пикритовыми и такситовыми габбро-долеритами; роговики; безрудные габбро-долериты.

Рассмотрение данных литологий обусловлено тем, что значительный объем горных работ приходится на данные типы горных пород.

Определение физико-механических свойств массива горных пород производилась с учетом рейтинговых систем, подразумевающих оценку нарушенности массива на участках обнажения или по результатам геотехнического бурения.

За основу при проведении картирования горных выработок был принят рейтинг горных пород  $Q$  по Бартону. Показатель  $Q$  определяется по следующей формуле (1):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF^2} \quad (1)$$

где  $RQD$  - показатель качества породы,  
 $J_n$  – показатель количества систем трещин,  
 $J_r$  – показатель шероховатости поверхности трещин,  
 $J_a$  – показатель измененности (сцепления) трещин,  
 $J_w$  – водный фактор,  
 $SRF$  – фактор снижения напряжений.

Поскольку качественных исследований напряженно-деформированного состояния не производилось, учитывались только геологические особенности, которые характеризуются показателем  $Q'$ , не учитывающим показатель  $SRF$ .

Определение физико-механических свойств массива горных пород производилось путем расчета через показатель GSI (индекс геологической прочности). Связь между показателями GSI и  $Q$  определяется из следующего соотношения (2):

$$GSI = 9 \cdot \ln(Q') + 44, \quad (2)$$

Определение модуля упругости массива  $E_m$  с учетом показателя GSI производится по следующей формуле (3):

$$E_m = E_y \cdot \left( 0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60 + 15D - GSI}{11}}} \right), \text{ МПа}, \quad (3)$$

где  $D$  – фактор возмущения.

Предел прочности массива  $G_m$  на одноосное сжатие равен (4):

$$G_m = 0,036 \cdot \sigma_{сж} \cdot e^{GSI/30}, \text{ МПа}. \quad (4)$$

Сопоставление прочностных и упругих свойств образца и массива на примере рудников Талнаха представлено в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Сводные данные по физико-механическим свойствам в образце и в массиве (шахта «Верхняя», рудник «Скалистый») (фрагмент)

Литологический тип	$E_y$ , ГПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	$GSI$	$E_m$ , ГПа	$G_m$ , МПа
Сульфидная руда	51,8	68,8	85	47,9	42,0
Габбро-долериты	89,4	142,0	70	66,3	53,6
Роговики	53,1	89,7	79	46,3	45,3
Вкрапленные руды	72,3	107,0	69	51,6	38,4

Таблица 2 – Сводные данные по физико-механическим свойствам в образце и в массиве (шахта «Глубокая», рудник «Скалистый») (фрагмент)

Литологический тип	$E_y$ , ГПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	$GSI$	$E_m$ , ГПа	$G_m$ , МПа
Сульфидная руда	62,7	89,6	81,8	56,4	49,2
Роговики	79,7	173,5	62,3	45,7	49,9
Габбро-долериты	115,1	212,3	62,3	65,9	61,0
Вкрапленные руды	89,6	149,7	62,3	51,3	43,1

Таблица 3 – Сводные данные по физико-механическим свойствам в образце и в массиве (рудник «Таймырский») (фрагмент)

Литологический тип	$E_y$ , ГПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	$GSI$	$E_m$ , ГПа	$G_m$ , МПа
Сульфидная руда	60,8	82,9	72,97	47,7	34,0
Роговики	63,2	126,8	64,15	38,8	38,7
Габбро-долериты	103,0	150,7	61,95	58,1	42,8
Вкрапленные руды	74,3	126,6	61,95	41,9	35,9

Нарушенность массива горных пород, выраженная при помощи индекса GSI по формуле (2), показывает неравномерное снижение физико-механических свойств в зависимости от типа литологии. Так, модуль упругости сплошных сульфидных руд, как относительно монолитных, снижается всего лишь на 7,5-21,5 %; тогда как для вкрапленных руд снижение модуля упругости происходит в диапазоне 28,7-52 %; для роговиков в диапазоне 12,8-38,6 %; а для породных габбро-долеритов в диапазоне 25,8-43,6 %.

**2. Изменения физико-механических свойств сплошных сульфидных руд при разупрочнении взрывом с применением рассредоточенных зарядов с воздушным промежутком в условиях действия сложного напряженного состояния описываются линейными зависимостями с коэффициентами детерминации, превышающими значение 0,93.**

Для оценки изменения физико-механических свойств сплошных сульфидных руд при проведении противоударных мероприятий были проведены специализированные механические испытания, задача которых заключалась в имитации двух основных способов разгрузки массива: скважинами и взрывом.

Имитация скважинной разгрузки производилась путем сверления в продольном сечении образцов отверстий (рисунок 1а).

Для данного моделирования скважинной разгрузки были изготовлены следующие типы образцов:

стандартные цилиндрические образцы (без отверстий) диаметром 45 мм; образцы с отверстием  $\varnothing$  3 мм; образцы с отверстием  $\varnothing$  5 мм; образцы с отверстием  $\varnothing$  10 мм; образцы с двумя отверстиями  $\varnothing$  5 мм; образцы с двумя отверстиями  $\varnothing$  5 мм и поперечной трещиной между ними.

Имитация разгрузки взрывом производилось путем взрывания детонирующего шнура ДШЭ-12 в образцах, которые были

предварительно запрессованы в стальные обоймы (рисунок 1б). Шаги преднатяга составляли 0, 15, 30, 45 МПа.

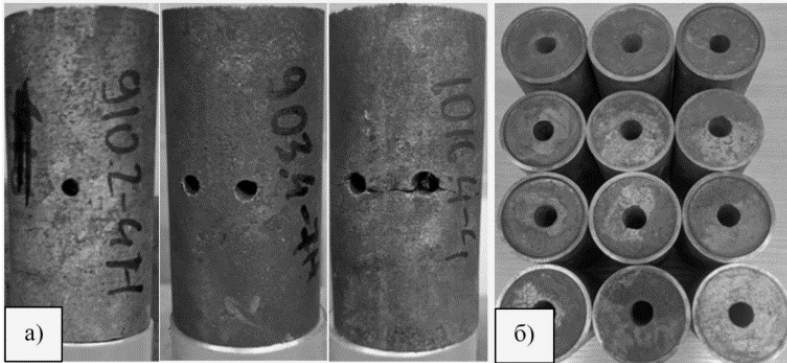


Рисунок 1 – Образцы для модельного эксперимента:

- а) образцы с отверстиями для моделирования скважинной разгрузки; б) образцы для разупрочнения взрывом

Учет влияния рассредоточения заряда на значение напряжений, действующих на стенки скважин в случае моделирования разгрузки взрывным способом производилось путем расчета диаметра отверстий в образцах по формуле (5):

$$\sigma_{rk} = P_c \cdot k_{pd} \cdot \left( \frac{d_{\text{патр}}^2}{d_k^2} \right)^\gamma \cdot \left( 1 + \frac{l_{\text{пр}}}{l_{\text{п}}} \right)^{-3}, \text{ МПа}, \quad (5)$$

где  $P_c$  - среднее давление продуктов детонации после взрыва, МПа,

$k_{pd}$  - коэффициент преломления в породе,

$d_{\text{патр}}$  - диаметр патрона ВВ гирлянды, м,

$d_k$  - диаметр скважины, м,

$\gamma$  - показатель изоэнтропы продуктов детонации,

$l_{\text{пр}}$  - длина промежутка между патронами, м,

$l_{\text{п}}$  - длина патрона ВВ, м.

При расчете на ДШ показатель рассредоточения  $\frac{l_{пр}}{l_n}$  не учитывался.

После подготовки образцов производился неразрушающий контроль (определение модулей упругости и деформации), а затем происходило их разрушение на одноосное сжатие в режиме контроля скорости роста поперечных деформаций, что является аналогом жесткого режима нагружения для получения графиков полного деформирования.

По образцам, разупрочненным взрывом, наблюдалась четкая линейная зависимость между коэффициентами снижения модулей деформации и упругости и влиянием бокового давления на образец (рисунок 2). Причем, снижение модуля деформации в виду эффекта обжатия трещин, возникших после испытаний более значительно, чем снижение модуля упругости.

Сравнение предела прочности образцов, разупрочненных взрывом, производилось с пределами прочности ранее исследуемых образцов сплошной сульфидной руды с приблизительно равными модулем упругости и плотностью. Полученные коэффициенты разупрочнения также зависели линейно от бокового обжатия образца (рисунок 3).

Таким образом, зависимости снижения физико-механических свойств при взрыве рассредоточенного заряда с воздушным промежутком от действующей нагрузки  $\sigma_l$  описываются следующими выражениями:

- для модуля деформации (с коэффициентом детерминации 0,93) (6):

$$K_{E_d} = -0,042\sigma_l + 4,69; \quad (6)$$

- для модуля упругости (с коэффициентом детерминации 0,98) (7):

$$K_{E_y} = -0,02\sigma_l + 2,79; \quad (7)$$

- для предела прочности на сжатие (с коэффициентом детерминации 0,99) (8):

$$K_{\sigma_{сж}} = -0,039\sigma_l + 4,21. \quad (8)$$

**3. Применение предварительной разгрузки массива сплошных сульфидных руд взрывным способом с обоснованным применением рассредоточенных зарядов позволяет перевести его в неудароопасное состояние с пластическим режимом деформирования.**

По результатам испытаний, представленных выше модельных образцов на одноосное сжатие в режиме контроля поперечных деформаций, были построены графики полного деформирования (рисунок 4).

Удароопасность образцов определялась по соотношению модуля деформации к модулю спада. При соотношении  $E/M > 1$ , образец принимался неудароопасным, а в случае  $E/M \leq 1$ , – удароопасным. Удароопасность образцов, не перешедших в предельное состояние, при котором было возможно оценить величину модуля спада, определялась по методу Я.А. Бича. В этом случае коэффициент удароопасности определялся по формуле (9):

$$K_y = \frac{\varepsilon_{упр}}{\varepsilon_{полн}}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{упр}$  – деформации в зоне упругости,

$\varepsilon_{полн}$  – полные деформации (до разрушения).

Порода считается удароопасной при  $K_y \geq 0,7$ .

Результаты оценки исследуемых образцов на удароопасность представлены в таблице 4.

Для оценки адекватности методики и качества выполненных лабораторных испытаний полученные данные об удароопас-



ности на контрольных образцах сравнивались с результатами определения потенциала удароопасности (рисунок 5), полученных на основе результатов испытаний на определение пределов прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  и растяжение  $\sigma_p$ . Испытания проводились как по методикам в соответствии с ГОСТ, так и по зарубежным стандартам

Таблица 4 – Оценка удароопасности образцов (фрагмент)

Образец	Процент удароопасных образцов
Контрольные образцы 45 мм	57,1
Образцы с отверстиями 3-5 мм	62,5
Образцы с отверстиями 10 мм	16,7
Образцы с двумя отверстиями 5 мм	0
Образцы с двумя отверстиями 5 мм + трещина	0
Натяг 0 МПа	0
Натяг 15 МПа	0
Натяг 30 МПа	0
Натяг 45 МПа	0

В выборке участвовало 43 пробы сплошных сульфидных руд. По результатам испытаний в соответствии со зарубежными стандартами, процент проб с низким и средним потенциалом удароопасности составил около 30%, а при испытаниях на запредельное деформирование процент удароопасных образцов составил 57,1%.

Образцы с отверстиями, имитирующие работу разгрузочных скважин, и образцы, предварительно разупрочненные взрывом, являлись неудароопасными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрено влияние воздействия взрывного нагружения на изменение как физико-механических свойств, так и степени склонности к удароопасности массива горных пород, сложенных из сплошных сульфидных руд. Полученные результаты могут быть использованы для решения актуальной научной задачи – разработки способа снижения удароопасности массива сплошных сульфидных руд в условиях сложного напряженного состояния, имеющей значение для развития горнодобывающей промышленности.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Упругие свойства сплошных сульфидных руд в массиве в виду своей слабой нарушенности незначительно отличаются от упругих свойств в образце. Это позволяет производить описание поведения массива при помощи модельных испытаний.

2. Установлена зависимость изменения прочностных свойств сплошных сульфидных руд при их разупрочнении взрывным способом рассредоточенными зарядами с воздушным промежутком от действия напряженно-деформированного состояния. Зависимость линейная и имеет вид:  $K_{\sigma_{сж}} = -0,039\sigma_l + 4,21$ .

3. Определены зависимости изменения деформационных свойств сплошных сульфидных руд при их разупрочнении взрывным способом рассредоточенными зарядами с воздушным промежутком от действия напряженно-деформированного состояния. Зависимости также линейные и имеют вид: для модуля деформации -  $K_{E_d} = -0,042\sigma_l + 4,69$ , для модуля упругости -  $K_{E_y} = -0,02\sigma_l + 2,79$ .

4. Получена количественная оценки уменьшения прочностных и деформационных свойств сплошных сульфидных руды в результате применения мероприятий по предупреждению горных ударов, произведена оценка удароопасности модельных образцов. В случае разупрочнения взрывом все образцы были неудароопасными.

5. Разработаны рекомендации для обоснования параметров буровзрывных работ для разгрузки массива горных пород с применением рассредоточенных зарядов с воздушным промежутком в условиях рудников «Октябрьского» и «Талнахского» месторождений. В качестве дополнительного метода прогноза удароопасности предлагается производить оценку напряженного состояния по состоянию стенок скважин, что обеспечит большую информативность без увеличения объемов бурения скважин.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение натурных исследований, связанных с корректировкой параметров буровзрывных работ и оценкой их влияния на напряженно-деформированное состояние разгруженного участка массива сплошных сульфидных руд.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК*

1. Господариков, А. П. О некоторых локальных методах предупреждения горных ударов / А. П. Господариков, **А. П. Киркин**, В. Н. Ковалевский // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2021. – №2. – С. 77-93.

2. Сабянин, Г.В. Разгрузка массива горных пород взрывным способом на глубоких рудниках ЗФ ПАО «ГМК

«Норильский никель / Г.В. Сабянин, С.Ю. Шиленко, А.В. Трофимов, **А.П. Киркин** // Горный журнал. – 2021. – №2. – С. 32-36.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3. Gospodarikov, A.P. Determination of physical and mechanical properties of rocks using anti-burst destress easures / A.P. Gospodarikov, **A.P. Kirkin**, A.V. Trofimov, V.N. Kovalevsky // Gornyi Zhurnal. – 2023. – № 1. – P. 26- 34.

4. Gospodarikov, A.P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading / A.P. Gospodarikov, A.V. Trofimov, **A.P. Kirkin** // Journal of Mining Institute. – 2022. – Is. 256. – P. 539-548.

5. Trofimov, A.V. Non-destructive ultrasonic method of testing the strength of backfill concrete at deep Talnakh mines / A.V. Trofimov, A.E. Romyantsev, A.P. Gospodarikov, **A.P. Kirkin** // Tsvetnye Metally. – 2020. – № 12. P. 28–32.

*Публикации в прочих изданиях*

6. Киркин, А. П. Формирование защищенных зон буровзрывным способом в условиях глубоких рудников Талнаха / **А. П. Киркин** // Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург, СПГУ – 2021. – С. 33-34.

*Свидетельство:*

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663971 Российская Федерация, Программа для оценки зоны разрушения массива горных пород вокруг скважины №2022663436: заявл. 19.07.2022: опубл: 21.07.2022 / Господариков А. П., **Киркин А. П.**; заявитель Горный университет». – 1 с.

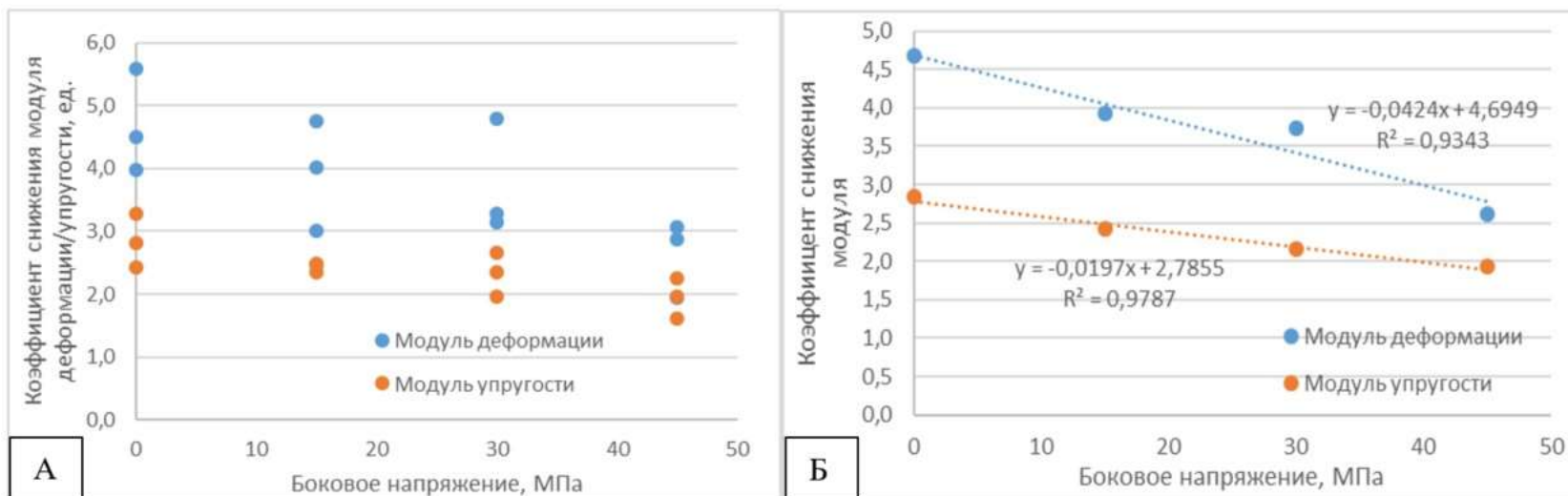


Рисунок 2 – Зависимость изменения модулей деформации/упругости в зависимости от боковой нагрузки на образец: а) по всем значениям; б) по средним значениям

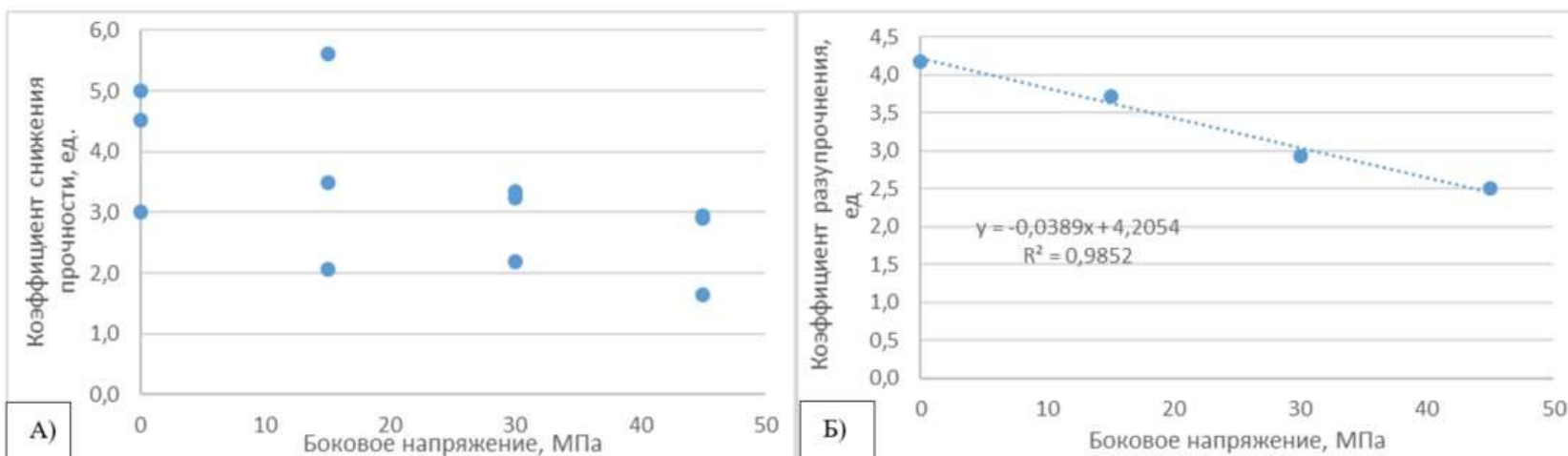


Рисунок 3 – Зависимость изменения предела прочности на сжатие в зависимости от боковой нагрузки на образец: а) по всем значениям; б) по средним значениям

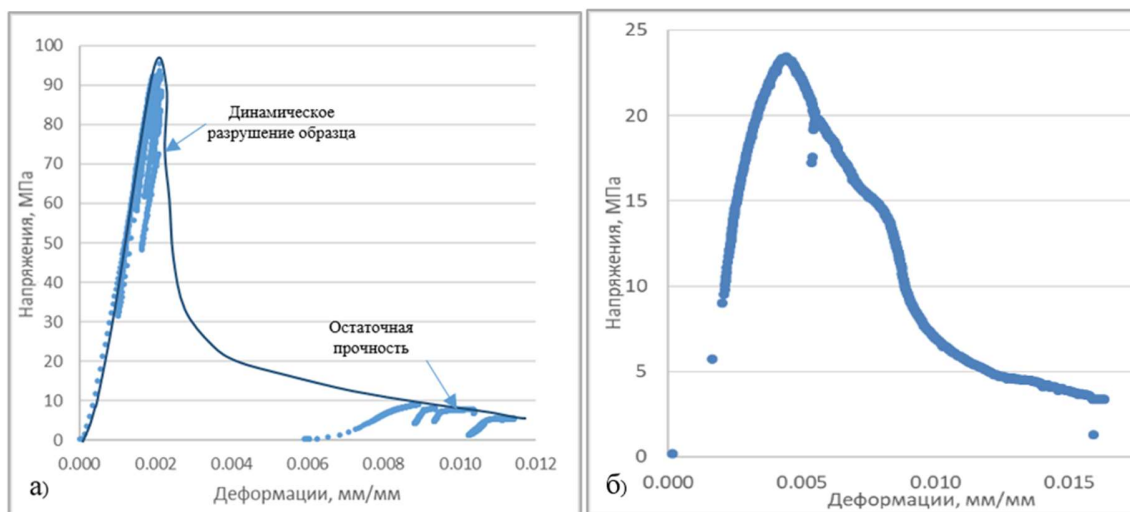


Рисунок 4 – Графики полного деформирования модельных образцов:  
а) удароопасных; б) неудароопасных

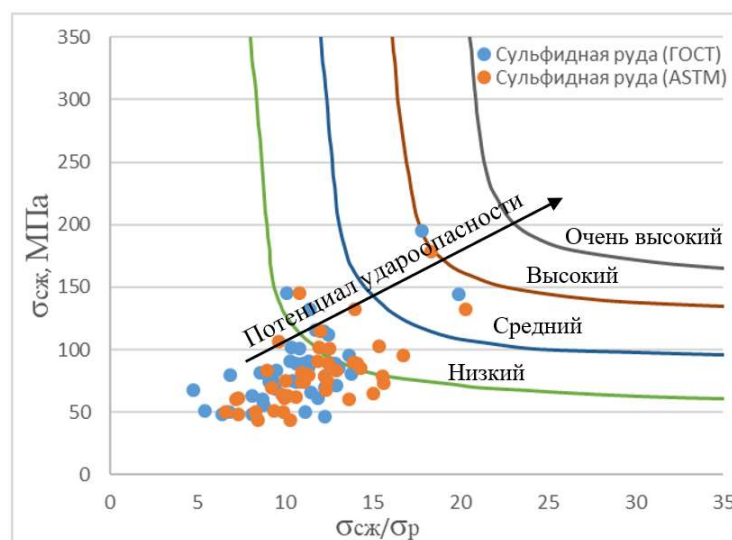


Рисунок 5 – Потенциал удароопасности основных литологических разновидностей (сплошная сульфидная руда) (фрагмент)