### Акционерное общество «Научный Центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли»

На правах рукописи

the

Ли Константин Хиунович

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

Специальность: 05.26.03 Пожарная и промышленная безопасность

(горная промышленность)

**ДИССЕРТАЦИЯ** 

на соискание ученой степени кандидата технических наук

> НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР ИВАНОВ В.В.

Кемерово 2020

### Оглавление

ГЛАВА 1. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА
РУДНЫХ И УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ РОССИИ. ОСНОВНЫЕ
ГИПОТЕЗЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СЕИСМИЧЕСКИХ СОБЫТИИ. ПРОГНОЗ
И КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИИ. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ.
ВЫВОДЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИИ 10
1.1 Динамические проявления горного давления. Основные понятия и
определения10
1.2 Характеристика железорудных месторождений Кузбасса 12
1.3 Горно-геологические условия отработки Таштагольского
месторождения14
1.4 Основные гипотезы возникновения очага сейсмических событий 22
1.5 Методы прогноза и контроля удароопасности горных пород26
Выводы и постановка задач исследования 30
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ ПРИНЦИПОВ ПРОГНОЗА
УДАРООПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА
ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПОДГОТОВКЕ
ГОРНЫХ УДАРОВ
2.1 Кинетические представления о разрушении горных пород и
подготовке горных ударов33
2.2 Теоретические исследования изменения удельного
электросопротивления горных пород рудных месторождений при их
механическом нагружении42
2.2.1 Изверженные горные породы земной коры как ионные и ионно-
ковалентные структуры42
2.2.2 Моделирование удельного электрического сопротивления
трещиноватых горных пород48
2.2.3 Лабораторные исследования изменения удельного
электросопротивления горных пород Таштагольского рудника в
предразрушенном состоянии51
Выводы и первое научное положение54
ГЛАВА 3. ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД И РУД НА
ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ ТАШТАГОЛЬСКОГО РУДНИКА67

3.1 Ретроспективный анализ результатов электрометрических измерений 67
Выводы и второе научное положение
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ПОРОД И РУД НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ КОНПЕПНИИ ПОЛГОТОВКИ ГОРНЫХ УЛАРОВ 88
4.1. Методы и средства измерений
4.2. Метод подземного электропрофилирования (ПЭП) выработок
4.3. Метод подземного электрозондирования (ПЭЗ) на крупных базах 89
4.4. Техника электрометрических измерений и методика обработки
4 5 Прогноз удароопасности массива по изменению параметров
электросопротивления
4.6 Оценка удароопасности пород вблизи разломов
4.7. Методика локального прогноза удароопасности электрометрическим методом
4.7.1 Об особенностях прогноза удароопасности в сейсмически активных зонах
4.7.2 Локальный прогноз удароопасности96
Выводы и третье научное положение103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ107

#### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Безопасность ведения горных работ на железорудных месторождениях представляет собой одну из важнейших составляющих политики в сфере горной промышленности. формы проявления Динамические горного давления, включая удароопасность при ведении горных работ, являются одной из причин нарушения нормальной работы предприятий и часто приводят к несчастным случаям на производстве. В настоящее время к опасным и склонным к горным ударам месторождениям отнесены 43 рудных месторождения России. К разрабатываемым железорудным месторождениям Кузбасса относятся Таштагольское, Шерегешское и Казское месторождения. В настоящее время Таштагольское месторождение с глубины 600 метров отнесено к удароопасным, а Шерегешское и Казское – к опасным и склонным к горным ударам. Среди рассмотренных месторождений выделяется Таштагольское, которое является наиболее удароопасным, кроме того, область, в которой расположены вышеперечисленные месторождения, характеризуется повышенной сейсмической активностью (до 7-8 баллов по Рихтера). Наиболее шкале важными причинами возникновения динамических явлений в массивах горных пород данных месторождений являются высокие тектонические напряжения и большие площади обнажения при ведении взрывных горных работ.

Начиная с 1959 года, на Таштагольском руднике регистрируются случаи динамических проявлений горного давления. Так с 1983 по 2011 год на этом руднике зарегистрировано 10 случаев горных ударов, 11 случаев микроударов, 18729 случаев толчков, 31 случай стреляния, 76 случаев интенсивного заколообразования, т. е. всего18857 динамических явлений. С 2015 года четырехэлектродный метод кажущегося удельного электросопротивления (КУЭС) является базовым при региональном и локальном прогнозе удароопасности на Таштагольском руднике. Однако, по признанию работников службы прогноза и предотвращения горных ударов

рудника, предлагаемая методика прогноза в 50 % случаев, начиная с 1985 года, не дает объективной оценки удароопасности. Причина, на наш взгляд, заключается в том, что методика прогноза удароопасности строится на абсолютных значениях кажущегося удельного электросопротивления пород, которые подвержены существенному влиянию влажности, вкраплений руды, вкраплений минералов разного электросопротивления и других факторов, что приводит к разбросу значений КУЭС на сотни и даже тысячи процентов.

В связи с вышесказанным, совершенствование методики электрометрического прогноза удароопасности железорудных повышающей месторождений, существенно точность прогноза И обеспечивающей безопасность ведения горных работ, является актуальной научной задачей.

Диссертационная работа выполнена в рамках целевой программы «Система обеспечения охраны труда, промышленной и экологической безопасности, предупреждения крупных аварий и катастроф на предприятиях утвержденной горной отрасли», генеральным директором АО «НЦ ВостНИИ», как отдельный этап работы «Разработка системы информационной поддержки контроля и управления технологическими и обеспечения производственными процессами ДЛЯ промышленной безопасности и охраны труда» (раздел 3, направление 4.1 целевой программы).

Целью работы является совершенствование методики электрометрического прогноза удароопасности железорудных месторождений на основе кинетической концепции подготовки горных ударов для обеспечения безопасных условий ведения горных работ.

#### Задачи исследований:

 установить характер изменения удельного электросопротивления железных руд и вмещающих пород при повышении напряжений, вплоть до разрушающих;

определить критические значения изменения удельного
 электросопротивления руд и пород при подготовке динамического события;

 ввести показатель удароопасности железорудного массива на основе изменения удельного электросопротивления и сравнения его с критическим значением.

**Идея работы** состоит в том, что повышение достоверности и точности прогноза удароопасности железорудных месторождений возможно путем установления количественных критериев изменения удельного электросопротивления рудного тела и вмещающих пород в процессе накопления трещин при повышении механических напряжений вплоть до разрушения.

Объект исследования – удароопасный железорудный массив горных пород.

**Предмет исследования** – электросопротивления руд и вмещающих пород в процессе нагружения и трещинообразования.

Методы В исследования. работе использованы методы теоретического анализа И статистической обработки результатов лабораторного и шахтного эксперимента – при исследовании зависимости КУЭС руд и вмещающих пород от механических напряжений и их трещиноватости, также метод ретроспективного анализа случаев а динамических форм проявлений горного давления (горных ударов и толчков) на Таштагольском руднике – при установлении критериальных изменений КУЭС руд и вмещающих пород на основе данных службы прогноза и предотвращения горных ударов рудника, начиная с 1985 года.

### Научные положения, выносимые на защиту.

1. В процессе повышения механических напряжений и подготовки горного удара удельное электросопротивление железорудных тел растет вследствие накопления трещин, а удельное электросопротивление вмещающих пород при этом уменьшается за счет накопления на поверхности трещин заряженных точечных дефектов кристаллической структуры.

2. Критическое увеличение удельного электросопротивления железорудных тел перед разрушением составляет 40 %, а критическое уменьшение удельного электросопротивления вмещающих пород при этом достигает 27–37 % в зависимости от их минерального состава.

3. Критерием удароопасности руд и пород может служить показатель, определяемый как отношение изменения удельного электросопротивления массива в тех одних И же точках ПО сравнению С начальным электросопротивлением В неудароопасном состоянии К начальному критическому электросопротивлению И изменению удельного электросопротивления данных участков в предразрушенном состоянии, определяемому предварительно. При значении показателя 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при значении ниже 0,5 – «неопасно».

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в работе, подтверждаются:

- представительным объемом статистической информации об изменениях КУЭС пород и руд перед горными ударами и толчками рудника Таштагол (1985–2019 гг.);

- достаточным объемом лабораторных экспериментальных данных и оценкой их результатов методами математической статистики (коэффициенты корреляции зависимостей изменений КУЭС пород и руд от механических напряжений от 0,69 до 0,96);

- значимым (с доверительной вероятностью 0,95) совпадением результатов опытно-промышленной проверки критических изменений КУЭС пород и руд в удароопасном состоянии с результатами лабораторных и теоретических исследований.

### Научная новизна работы.

1. Предложен кинетический подход к обоснованию процесса подготовки горных ударов и установлены количественные закономерности

влияния механических напряжений и процесса накопления трещин на КУЭС пород и руд железорудных месторождений.

2. Установлены масштабно нечувствительные количественные критерии изменений КУЭС пород и руд железорудных месторождений с начала процесса подготовки горного удара и до критического удароопасного состояния.

 В качестве количественного критерия удароопасности пород и руд железорудных месторождений предложен новый показатель удароопасности.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии кинетической теории прочности и разрушения горных пород, на основе которой сформулирован новый критерий удароопасности и установлены закономерности изменения КУЭС руд и вмещающих пород в удароопасном состоянии.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработана методика электрометрического прогноза удароопасности рудных тел и вмещающих пород железорудных месторождений, основанная на кинетической концепции прочности и разрушения горных пород, позволяющая существенно повысить точность прогноза и безопасность ведения горных работ.

2. На основе ретроспективного анализа данных электрометрических измерений на Таштагольском руднике (начиная с 1985 года и по настоящее время) проведена опытно-промышленная проверка методики электрометрического прогноза удароопасности пород и руд и проверены установленные критерии изменений их КУЭС в удароопасном состоянии.

 Результаты исследований рекомендованы службе прогноза и предотвращения горных ударов Таштагольского рудника и могут быть использованы для прогноза удароопасности других железорудных месторождений России.

Реализация результатов работы.

Научные положения, выводы и рекомендации диссертационного исследования были использованы при разработке методики удароопасности электрометрического прогноза железорудных месторождений И переданы внедрения службе прогноза для И предотвращения горных ударов рудника Таштагол.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и были одобрены на научно-технических семинарах и совещаниях АО «НЦ ВостНИИ» (в 2016–2020 гг.), на Международных конференциях «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс – 2018, 2019 гг.)», на Всероссийских научно-практических конференциях молодых ученых с Международным участием «Россия молодая» (г. Кемерово, 2019– 2020 гг.), на технических совещаниях ОАО «Евразруда» (2018–2019 гг.).

Публикации. Основные результаты работы отражены в 7 публикациях, в том числе в 5 работах, рекомендованных ВАК РФ, включая один патент на изобретение, выпущен один нормативный документ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав заключения, изложенных на 119 страницах, содержит 12 рисунков, 25 таблиц, список литературы из 115 наименований.

## ГЛАВА 1. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА РУДНЫХ И УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ РОССИИ. ОСНОВНЫЕ ГИПОТЕЗЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ. ПРОГНОЗ И КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ. ВЫВОДЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Динамические проявления горного давления. Основные понятия и определения

Динамические проявления горного давления по силе и характеру подразделяются на горно-тектонические удары и собственно горные удары (далее – горные удары), микроудары, толчки, стреляния. К внешним признакам динамического проявления горного давления относятся динамическое заколообразование и шелушение пород (руд) на контуре горных выработок. Согласно [1–3] **геодинамически активные зоны** – разрывы, по которым наиболее вероятно возникновение сейсмических явлений, горно-тектонических ударов, горных ударов и внезапных выбросов в горных выработках при разработке месторождений.

**Горно-тектонический удар** – мгновенная подвижка блоковых структур по разрывам. Горно-тектонический удар сопровождается сильным сотрясением массива, резким звуком, образованием пыли и воздушной волной, и нарушением технологического процесса.

Горный удар – мгновенное хрупкое разрушение целика или краевой части массива, проявляющееся в виде выброса руды (породы) в подземные выработки с нарушением крепи, смещением машин, механизмов, оборудования и вызывающее нарушение технологического процесса. Удар сопровождается резким звуком, сильным сотрясением горного массива, образованием пыли и воздушной волной.

Зона повышенного горного давления (зона ПГД) – часть рудного тела (вмещающих пород), испытывающая повышенное горное давление, передаваемое краевыми частями или целиками смежного (защитного) рудного тела (слоя).

Зона разгрузки – часть массива пород в зоне влияния очистных работ, в пределах которой напряжения меньше, чем в нетронутом массиве.

Интенсивное заколообразование – возникновение заколов вслед за их оборкой. Оно происходит по ненарушенному массиву, не связано с его видимой трещиноватостью (слоистостью, сланцеватостью) и сопровождается звуком. При этом образуются и отделяются от обнажения плиты, по форме повторяющие контур выработки.

Категория удароопасности – уровень напряженности рудного или породного массива в зоне максимума опорного давления и расстояния до этого максимума от обнажения рудного или породного массива.

Критическая глубина – глубина от земной поверхности, начиная с которой при производстве горных работ возникают горные удары или установлена категория «Опасно».

Локальный прогноз – определение удароопасности отдельных участков рудного (породного) массива, выработки, целика геомеханическими или геофизическими методами.

Микроудар – мгновенное разрушение целика или приконтурной части выработки, проявляющееся в виде выброса руды (породы) в подземные выработки, не вызывающее нарушение технологического процесса. Микроудар сопровождается сотрясением массива и образованием пыли.

Прогноз удароопасности – установление категории опасности, на основе которого участки породного или рудного массива относятся к одной из двух категорий удароопасности: «Опасно», «Неопасно».

**Региональный прогноз удароопасности** – выделение удароопасных зон в пределах шахтного поля или месторождения.

Стреляние – отскакивание с резким звуком от массива линзовидных или с острыми краями пластин различных размеров.

Сейсмическое событие – геодинамическое явление, характеризующееся появлением в массиве горных пород или руд сейсмических волн.

**Толчок** – разрушение руды (породы) в глубине массива без выброса в горную выработку, сопровождающееся звуком, сотрясением массива, образованием пыли.

Удароопасность месторождения или его части – наличие склонных к горным ударам пород и уровня напряжений, при котором возможно хрупкое разрушение пород в процессе ведения подземных горных работ.

Шелушение – разрушение породы по контуру выработки на отдельные пластины, имеющие чаще всего чечевицеобразную форму с заостренными краями. Место шелушения в выработке выглядит «свежим» из-за постоянного осыпания пластин. Сюда не относится шелушение некоторых типов пород, связанное с физико-химическими процессами.

В настоящее время к опасным и склонным к горным ударам месторождениям отнесены 43 рудных месторождения России [3].

### 1.2 Характеристика железорудных месторождений Кузбасса

К разрабатываемым железорудным месторождениям Кузбасса относятся Таштагольское, Шерегешское и Казское месторождения. В настоящее время Таштагольское месторождение с глубины 600 метров отнесено к удароопасным, а Шерегешское и Казское – к склонным и опасным по горным ударам.

Рудное поле Казского месторождения представлено двумя рудноскарновыми зонами широтного простирания. В зонах выделено шесть участков, вытянутых прерывистой полосой протяженностью 4 км и шириной 0,5 км. Средняя мощность рудных тел 10–15 м и длиной по простиранию 30–

40 м. Руды имеют прочность на одноосное сжатие 100–140 МПа. Вмещающие породы представлены гранатовыми, гранат – пироксеновыми, гранат – магнетит – пироксеновыми скарнами, диоритовыми порфиритами и мраморами. Предел прочности скарнов – 120–180 МПа, диоритовых порфиритов – 140–160 МПа, мраморов – 60–80 МПа.

В рудной зоне Шерегешского месторождения находятся пять участков – Главный, Болотный, Новый Шерегеш, Подрусловый, Новая промплощадка. Угол падения рудной залежи постепенно выполаживается от участка Главный (50–60°) к участку Новая промплощадка (25–30°). Вмещающие породы представлены диоритовыми порфиритами, диоритами, скарнами, песчано-сланцевой толщей пород.

Среди рассмотренных месторождений выделяется Таштагольское, которое является наиболее удароопасным, кроме того, область, в которой расположены вышеперечисленные месторождения характеризуется повышенной сейсмической активностью (до 7-8 баллов по шкале Рихтера). Наиболее важными причинами возникновения динамических явлений в горных месторождений пород данных являются массивах высокие тектонические напряжения и большие площади обнажения при ведении взрывных горных работ. По данным ВостНИГРИ, ИГД СО РАН и др. организаций [1, 4, 5, 7–9] соотношение главных напряжений в массиве Таштагольского вмещающих пород находится В пределах: для месторождения  $\sigma_1: \sigma_2: \sigma_3 = 2,5:1,3:1,0;$  для Шерегешского –  $\sigma_1: \sigma_2: \sigma_3 =$ 2,6:1,4:1,0; для Казского –  $\sigma_1: \sigma_2: \sigma_3 = 3,7:2,5:1,0$ . Абсолютная величина сжимающих напряжений на этих месторождениях по данным ВостНИГРИ [9, 11, 12] районе разрезного блока (гор.-350, глубина 900 м) В Таштагольского месторождения составляет 132–136 МПа, на Шерегешском месторождении (гор.+115) 39-22 МПа, на Казском месторождении – 55 МПа. В приведенных значениях напряжений первых две тектонических

компоненты соответствуют главным горизонтальным напряжениям, а третья соответствует вертикальной компоненте.

Начиная с 1959 года, на Таштагольском руднике регистрируются случаи динамических проявлений горного давления. Так, с 1983 по 2011 год на этом руднике зарегистрировано 10 случаев горных ударов, 11 случаев микроударов, 18729 случаев толчков, 31 случай стреляния, 76 случаев интенсивного заколообразования, т. е. всего18857 динамических явлений.

## 1.3 Горно-геологические условия отработки Таштагольского месторождения

История Таштагольского месторождения магнетитовых железных руд берет начало в 1931 г. Изначально подтвержденные ГКЗ СССР запасы железной руды составляли 33 млн т. Строительство рудника началось в 1939 г., а в 1941 г. была запущена временная схема транспортировки руды. Отгрузка первых тонн руды, добытых открытым способом, произошла 3 июля 1941 г., а с 1948 г. была начата выемка руды подземным способом. С 1948 г. и до 2015 г. было добыто более 180 млн т. руды, произведено 175 млн т. железорудного концентрата. На Таштагольском железорудном месторождении (рис. 1.1) и по настоящее время ведутся горные работы подземным способом. Ниже в табл. 1.1 приведены основные характеристики Таштагольского тел И вмещающих пород месторождения рудных [1, 4, 5, 11, 12]. В совокупности рудные тела образуют зону северо-западного простирания, длина которой на вскрываемых и подготавливаемых горизонтах составляет 730-750 м. Удельный вес руды колеблется от 3,3 до 4,9 т/м<sup>3</sup>. Среднее содержание железа примерно 37,4 %. Рудные тела и вмещающие породы разбиты густой сетью трещин и отдельностей. Имеются крупные тектонические трещины с амплитудой смещения более 120 м. Трещины в основном ориентированы в меридиональном направлении.

Система разработки Таштагольского месторождения – одностадийная, с массовым обрушением руды. Реализуется путем нарезания в блоке

бурового горизонта с рассечками, затем формируются выработки выпуска в основании и делается подсечка.

		-		
Рудные тела и	Восточный	Юго-	Западный	Северо-
породы	участок	восточный	участок	западный
_		участок		участок
Количество				
рудных тел	4	2	5	1
Состав рудных	Магнетит с	Магнетит с	Магнетит с	Магнетит с
тел	примесью	примесью	примесью	примесью
Предел				
прочности на	60–140 МПа	80–140 МПа	120–140 МПа	100–140 МПа
одноосное сжатие				
руды				
Горизонтальная				
мощность рудных	15-60 м	5—40 м	5—25 м	110 м
тел				
Угол падения	70–90°	70–90°	80–85°	70–90°
рудных тел				
Основные	Сиенит,	Сиенит, скарн,	Сиенит,	Сиенит, скарн,
вмещающие	скарн,	сланец,	скарн, сланец,	сланец,
породы	сланец,	порфирит	порфирит	порфирит,
	порфирит			известняк
Предел				
прочности пород	50–180 МПа	—	100–160 МПа	50–120 МПа
на одноосное				
сжатие				

Таблица 1.1 – Основные характеристики рудных тел и вмещающих пород Таштагольского месторождения



Рисунок 1.1 — Геологическая карта шахтного поля Таштагольского месторождения: 1 – предполагаемые тектонические нарушения; 2 – песчаники, алевролиты, сланцы; 3 – наблюдаемые тектонические нарушения; 4 – габбро – порфириты; 5 – сиениты, скарны пироксеновые; 6 – туфы, туфиты; 7 – известняки

Отбойка ослабленного массива производится уступами. Высота уступа принимается равной высоте этажа (70 м), ширина принимается равной мощности залежи (до 120 м), длина по простиранию 13,5 м. Одновременно производится отбойка до 100 и более тыс. м<sup>3</sup> руды. Моментальное высокоскоростное обрушение крупных масс руды, происходящее на достаточно большой площади, влечет за собой перераспределение напряжений в окружающем массиве. На данном участке образуется новая зона повышенного опорного давления, зоны же высоких напряжений во вмещающих породах с висячего и лежачего боков снимаются. Результатом этого является нарушение режима и параметров зоны сдвижения, крупные блоки структуры резко смещаются, происходят срывы и подвижки по разломам крупных тектонических трещин. При превышении скорости динамических нагрузок скорости вероятного деформирования окружающего массива, происходит непосредственно горный удар, в виде разрушение Из вышеизложенного вытекает крепких пород. следующий вывод: эффективно уменьшить вероятность горных ударов на месторождении помощью применения таких систем отработки можно с полезных выработанных ископаемых, при которых выполняется закладкой пространств.

Таштагольское железорудное месторождение Горной Шории разрабатывается подземным способом, глубина ведения горных работ в настоящее время достигает 1100 м. Само месторождение расположено в сейсмически активном районе Алтае-Саянской складчатой области, где имеют место современные тектонические движения земной коры и где каждое десятилетие происходят землетрясения с магнитудой 5–6. Все это отражается и на частоте горных ударов, происходящих на Таштагольском руднике.

Руды и вмещающие породы Таштагольского месторождения прочные, высокомодульные, хрупко разрушаются под нагрузкой, способны накапливать значительную упругую энергию.

Динамические проявления горного давления в форме стреляний горных пород на Таштагольском месторождении отмечены с глубины 300 м, а на глубине 600 м и более имеют место проявления горных и горно-

тектонических ударов большой разрушительной силы. С 1959 года на месторождении зарегистрировано более 18000 динамических явлений, в том числе 18 горных ударов, 40 микроударов.

Усилиями ученых Кузбасса по оценке уровней напряжений на различных глубинах получен большой объем информации о состоянии массивов горных пород месторождения [32, 33], так установлено, что на Таштагольском месторождении максимальные сжимающие напряжения действуют в северо-западном направлении и составляют  $\sigma_1 = 2,5 \gamma H$ ,  $\sigma_2 = 1,3 \cdot \gamma H$ ,  $\sigma_3 = \gamma H$ , что обусловлено высокой тектонической активностью в зоне ведения горных работ (в зонах, где очистные работы не оказывают влияния).

По совокупности данных, характеризующих физико-механические свойства пород и руд месторождения, уровню напряжений действующих в массиве, а также наличию количества и характера динамических проявлений, Таштагольское месторождение относится к опасным по горным ударам.

По интенсивности и характеру проявления динамические явления на Таштагольском руднике подразделяются на горно-тектонические удары и собственно горные удары (далее горные удары), микроудары, толчки и стреляния.

К внешним признакам, характеризующим склонность массива к динамическим проявлениям горного давления, относится интенсивное заколообразование и шелушение пород (руд).

Таштагольское месторождение с глубины 600 м (гор.–70 м) отнесено к опасным по горным ударам.

Удароопасными на Таштагольском месторождении являются магнетитовая руда, сиениты, скарны, диориты, туфосланцы.

Удароопасными считаются месторождения или его части, где достоверно подтверждены горные удары или микроудары, либо были выявлены категории «опасно» по результатам оценки степени удароопасности.

Удароопасные секторы месторождения, как и места проявления динамических явлений должны быть отображены на планах горных работ.

При разработке проектов на отработку новых горизонтов и участков месторождения предусматривается комплекс мер по предотвращению горных ударов.

По степени опасности участки горного массива вокруг выработок в настоящее время разделяют на две категории: «Опасно» и «Неопасно». Категория «Опасно» соответствует напряженному состоянию массива в приконтурной части выработки, при котором может произойти горный удар. Такой участок выработки должен быть приведен в неудароопасное состояние, по проекту, утвержденному главным инженером предприятия. До приведения выработки в неудароопасное состояние запрещается ведение горных работ и нахождение людей в выработке, не связанных с проведением профилактических мероприятий.

Категория «Неопасно» соответствует неудароопасному состоянию и не требует проведения противоударных мероприятий. При этом сохраняется необходимость прогноза удароопасности.

Прогноз степени удароопасности массива вокруг выработок, а также оценка эффективности мер борьбы с горными ударами осуществляется службой прогноза и предупреждения горных ударов рудника (ППГУ).

Руководитель службы ППГУ ежемесячно составляет план по выполнению прогноза удароопасности и определяет объем профилактических мер по предотвращению динамических явлений. План утверждается техническим руководителем предприятия.

В места контроля удароопасности на месторождениях, склонных к горным ударам, включают районы фактического проявления стреляний и интенсивного заколообразования, потенциально опасные участки, связанные с краевыми зонами очистного фронта и тектоническими нарушениями. Периодичность замеров определяется месячными планами работ службы прогноза.

Методами регионального прогноза определяется общая оценка состояния массива, а также выявление его пригруженных участков на удароопасных зонах выполняется методами регионального прогноза.

Методами локального прогноза устанавливается категория конкретных участков массива, склонных к горным ударам,

Методом глубинных и контурных реперов, а также методами микросейсмики и электрометрии ведется наблюдение за региональным изменением напряженно-деформированного состояния массива.

В зонах влияния горных работ методами регионального прогноза определяют пригруженные участки массива, в которых далее уточняются зоны для проведения локального прогноза удароопасности.

Микросейсмоакустический метод, метод геодинамического районирования, а также метод, основанный на оценке влияния тектонических нарушений с учетом временного фактора могут быть использованы в качестве вспомогательных при определении регионального изменения НДС массива.

Базовыми методами, применяемыми при локальном прогнозе удароопасности участков массива, прилегающих к горным выработкам, являются метод электрометрии, метод дискования керна и метод глубинных и контурных реперов.

В условиях, когда не могут быть применены базовые методы, применяется метод естественного электромагнитного излучения горных пород. Оценка степени удароопасности участков массива методами локального прогноза производится:

 выработках, где ведутся горные работы, если в районе их расположения методами регионального прогноза установлен опасный уровень напряжений в массиве;

 в зоне опорного давления на расстоянии 40 м от отрабатываемого блока;

– при проведении подготовительных горных выработок методом каротажа опережающих скважин через каждые 20 м их подвигания, неснижаемый интервал прогнозирования впереди забоя выработки составляет не менее 4 м.

При проведении капитальных и подготовительных горных выработок на криволинейных участках прогноз удароопасности осуществляется методом электрометрии (подземным электрическим зондированием или методом импульсного электромагнитного измерения) с интервалом 5 метров.

На участках выработок, попадающих в зону опорного давления от очистных работ, а также пройденных вблизи крупных разрывных нарушений (мощностью не менее 0,5 м и прослеживающихся на двух и более горизонтах) на расстоянии до 15–20 м от них и контактов удароопасных работ, находящихся в зоне влияния крупных разрывных нарушений, периодически не реже 1 раза в квартал производится контроль степени удароопасности частей массива.

Контроль степени удароопасности в руддворах, квершлагах и полевых штреках, пройденных вне зоны влияния очистных работ реализуется методом электрометрии с интервалом не реже 1 раза в полугодие.

Для уточнения зон высокой концентрации напряжений отстраиваются карты сейсмической активности каждый квартал.

По существующей методике прогноз динамических явлений ведется по абсолютным значениям удельного электросопротивления, что крайне негативно сказывается на его точности, т. к. удельное электросопротивление пород может существенно меняться в зависимости от многих факторов, таких как влажность, наличие минеральных включений в породе и др. Помимо этого, существующая методика не учитывает кинетический характер подготовки горных ударов и толчков.

### 1.4 Основные гипотезы возникновения очага сейсмических событий

Проблеме прогноза сейсмических явлений (горных ударов и землетрясений) посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых [1–102, 102–115].

Одним из пионеров исследования данных проблем, применившим понятие очага, является H.F. Reid [13, 15]. В своих трудах H.F. Reid рассматривает очаг как разрыв горных пород. В будущем эту модель использовал Н. Benioff [14]. Суть данной работы заключается в том, что разрушение в очаге происходит при достижении напряжений предела прочности породы в некотором объеме [14]. Разрушение происходит во всем объеме, т. е. непосредственно в очаге землетрясения. Высвободившаяся в процессе разрушения энергия отождествляется с энергией землетрясения. В своих трудах H. Benioff полагал, что суммарный объем очага основного толчка землетрясения содержит также и объемы очагов афтершоков. Поэтому, если энергия упругой деформации падает в результате разрушения в очаге, то она должна упасть также и в зоне, окружающей этот очаг. Отсюда следует вывод, что очаг – это не только тот объем, где непосредственно было разрушение но и весь объем, в котором высвобождается упругая энергия. K.E. Bullen [16] полагал, что очаг это тот объем, в котором перед землетрясением материал находится при напряжении, близком к пределу прочности. При этом данный объем превышает объем области разрушения в очаге не более, чем на порядок. На практике суммарный объем очага, как указывают в своих работах M. Bath и S. Duda [17, 18], все же принимается равным объему области афтершоков.

Все эти определения базируются на разрывной теории. Однако, как отмечает Б.В. Костров [21], возникший тем или иным способом разрыв может быть как устойчивым, так и неустойчивым [15]. Основной чертой первого является обязательное увеличение внешних нагрузок для его распространения, второй же распространяется без изменения величины

внешних нагрузок, причем это распространение происходит с достаточно большой скоростью. Таким образом, лишь при высокой скорости распространения разрыв можно считать очагом сейсмического события.

Согласно Б.В. Кострову [21] очаг сейсмического события это разрыв сплошности материала Земли по некоторой площадке; разрыв образуется под упругих напряжений, которые накапливаются в процессе действием деформации, и ведет к релаксации этих напряжений в указанной зоне; разрыв возникает сначала в малой области, а затем распространяется от нее со скоростью, не превосходящей скорости продольных сейсмических волн. Разрыв является разрывом скольжения; материал Земли вне самого разрыва остается линейно-упругим [15]. С.В. Гольдин с соавторами в работе [20] считает, что по измерениям смещений или деформаций на дневной зафиксировать поверхности параметры можно очага готовящегося сейсмического события; при этом под очагом понимается совокупность сил, сосредоточенных в некоторой области.

Изложенные выше гипотезы не рассматривают развитие процесса разрушения в очаге как кинетического, т. е. протекающего во времени процесса. Наиболее близкими современными гипотезами, на наш взгляд, являются кинетические теории, содержащиеся в работах В.И. Мячкина, Г.А. Соболева, О.Г. Шаминой [21], дилатантно-диффузионная модель D.L. Anderson'a, C.H. Scholz'a [25], модель с неоднородностью или консолидированным включением И.П. Добровольского [15, 26], кинетическая концепция прочности С.Н. Журкова, В.С. Куксенко, В.А. Петрова [22, 23, 24],

Кинетическая концепция прочности твердых тел указанных авторов, развиваемая в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, выделяет 2 стадии процесса. Первая стадия включает в себя хаотическое накопление трещин; вторая же стадия подразумевает собой непосредственно образование очага разрушения. Первая стадия перетекает во вторую при выполнении условия, которое получило название «концентрационный критерий разрушения » [27]:

$$\frac{\left(N^*\right)^{-1/3}}{L_0} = K \approx 3, \qquad (1.1)$$

где  $N^*$  – критическая концентрация трещин перед горным ударом;  $L_0$  – средний линейный размер трещин на данном иерархическом уровне разрушения (для исследуемых образцов горных пород  $L_0$  совпадает со средним размером зерна горной породы). Данный критерий, по утверждениям авторов, является масштабно нечувствительным и применим к любому размеру очага разрушения.

В работе [28] показано, что смысл условия (1.1) заключается в том, что макроразрушение происходит в случае достижения концентрацией трещин такой величины, при которой расстояние между ними примерно равно трем средним их размерам. Дальнейшее развитие кинетической теории прочности в работах В.В. Иванова [29, 30,31] позволило предложить масштабно двухстадийную нечувствительную кинетико-статистическую модель подготовки сейсмического события, включающую в себя Пуассоновскую статистику процесса накопления трещин на первой стадии подготовки, концентрационный критерий разрушения, уравнение для скорости трещинообразования и условие необратимости разрушения.

сотрудниками Другие более сложные модели разрабатываются института физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, в частности, модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ), предложенная И разработанная Б.В. Костровым, В.И. Мячкиным, Г.А. Соболевым, О.Г. Шаминой [21], и дилатантно-диффузионная (ДД) модель, которую предложили D.L. Anderson, C.H. Scholz [25] и существенно развили ученики Г.А. Соболева [32].

Модель ЛНТ характеризуется взаимодействием полей напряжений трещин и локализации процесса трещинообразования. В течение первой стадии происходит накопление трещин в некотором объеме; после

достижения критического для объема количества трещин наступает вторая стадия, при которой происходит консолидация трещин и увеличение их размеров; на завершающей стадии образуются неустойчивые деформации в узкой области будущего макроразрыва. По мнению Г.А. Соболева [32], на первой стадии свойства пород меняются слабо, что делает практически начала данной невозможным определение стадии при испытаниях. модели Г.А. Соболев утверждает, физические ЛНТ ЧТО основы не противоречат закономерностям кинетической теории прочности С.Н. Журкова. Таким образом, первые две стадии в модели ЛНТ, по сути, совпадают с первой стадией в рамках кинетической теории прочности С.Н. Журкова.

В работах [73-76] рассматриваются стохастические теории сейсмических процессов и приводятся компьютерные программы оценки стохастических параметров при подготовке землетрясений. Работы [77-79] посвящены моделированию движения грунта и оценке фокальной глубины землетрясения, приведены примеры определения этих параметров на примере Пиренейского землетрясения. Ослабление интенсивности колебаний грунта, а также соотношение между величиной, длиной разрыва, его шириной и площадью смещения рассматриваются в работах Лопеса Касадо и Уэллса [80-81]. Ряд работ посвящен реализации сейсмической энергии при соотношении размеров различных оценке структур И статистики землетрясений в Калифорнии [82-84].

В работах Гейгера и Грунталя [85-86] предлагается вероятностный метод определения эпицентров землетрясений и приводятся каталоги землетрясений в Германии. В классических работах Гутенберга и Рихтера [87-88] приводится классификация землетрясений по магнитуде, интенсивности, энергии и параметрам ускорения точек грунта.

В работе Хэнкса и Висса [89] исследуются спектры объемных волн с целью определения параметров сейсмических источников. Работы [89,90] посвящены исследованию региональной сейсмичности Центральной Азии,

Китая и Южной Монголии. Вероятностные методы оценки сейсмической опасности и нелинейная теория отклика грунта при промышленных взрывах и землетрясениях приведены в работах [91-94]. Многие работы [95-102] посвящены картам сейсмической активности различных регионов мира и России. В работе Павленко О.В. и К. Ирикуры [104] дается оценка нелинейного поведения грунта при его интенсивном смещении. В работе Ризенберга П. И Оппенгеймера Д. [105] приводятся компьютерные программы для расчета и отображения плоскости разлома землетрясения. Работы [106-110] посвящены оценке сейсмической опасности различных регионов мира Италии, Америки и Монголии (район Тянь-Шаня). Две работы Тэйлора С.Р. [110, 111]посвящены техногенной сейсмичности, обусловленной ведением горных работ. Работы [112–115] посвящены новым эмпирическим соотношениям между длиной разрыва, его площадью и смещением поверхности, а также корреляции сейсмических процессов с пиками записей движения грунта.

В дальнейшем мы будем использовать двухстадийную модель разрушения, предложенную В.В. Ивановым [29, 30, 31].

### 1.5 Методы прогноза и контроля удароопасности горных пород

Если не учитывать радиометрические методы прогноза удароопасности горных пород (гамма каротаж, гамма – гамма каротаж и др.), все методы прогноза удароопасности можно разделить на геомеханические и геофизические [3, 6–12, 32, 33–44, 45–51]. Геомеханические методы включают в себя струнные и тензометрические, метод дискования керна, метод реперного нивелирования, метод фотоупругих датчиков, метод частичной и полной разгрузки торца скважины, разгрузки керна центральной скважиной, метод гидроразрыва скважин, метод разности давлений, метод буровых скважин, метод параллельных скважин. Геофизические методы:

электрометрический, ультразвуковой, акустический; сейсмический, метод импульсного электромагнитного излучения горных пород и другие.

Метод дискования керна согласно Федеральным инструкциям является базовым методом регионального прогноза удароопасности пород [3, 11, 12]. Для прогноза удароопасности этим методом определяют среднюю толщину дисков по геологоразведочным скважинам на участке интенсивного дискования керна с одновременной привязкой его к скважине, затем устанавливают уровень напряжений в массиве по номограмме [3]. Месторождение относят к склонным по горным ударам, если условный уровень напряжений превышает 0,8.

Геомеханические методы прогноза весьма трудоемки, требуют значительных затрат материальных и человеческих ресурсов и поэтому применяются редко.

Чаще всего в практике горных предприятий используют геофизические методы.

Исследования в области разработки геофизических методов контроля и прогноза НДС и удароопасности массива горных пород проводятся многими ИПКОН PAH, ИГД СО РАН, научными коллективами: ИГД ИМ. Скочинского, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ВНИМИ, МГГУ, ВостНИИ, КузГТУ, ИГД УрО РАН и в других учреждения. Рассмотрим два наиболее часто геофизических применяеиых метода: акустический И электрометрический [15].

Акустические методы получили применение для анализа изменений НДС массива горных пород [35, 36, 42–44]. Это обусловлено тем, что проявления горного давления и, в частности, подготовка горного удара, сопровождается шумом, треском, шуршанием, причем эти звуки можно услышать без применения специальной аппаратуры.

Развитием применения акустического метода в горной отрасли занимались ученые: F. Birch, N.V. Buffulo, B.L. Juneja, D.S. Hughes, J.L. Kelly, D.A. Lockner, Meredith, K. Mogi, F.D. Murnaghan, G.A. Nariboli, L. Obert,

R. Rousler, C.H. Scholz, S. Tang, P.G., Tenselin, M. Terada, J.D. Weeks, Б.А. Вибенга и многие другие.

Акустический метод контроля НДС основан на измерении скорости распространения упругих волн, коэффициентов затухания или их изменений под действием механических напряжений [43]. В зависимости от частотного диапазона данные методы разделяются на сейсмический (до 200 Гц), сейсмоакустический (0,3-2 кГц), акустический (2-20 кГц) и ультразвуковой (свыше 20 кГц). Все акустические методы подразделяются на активные и пассивные. Активные методы используют искусственное возбуждение акустических колебаний и их прием, пассивные основаны на приеме естественных акустических шумов в горном массиве. Многие задачи горного производства решаются путем установления корреляционных зависимостей предела прочности пород на одноосное сжатие от скорости продольных волн [34, 35]. Однако, чувствительность этих методов к действующим в массиве напряжениям практически теряется при достижении напряжений 50–70 % от разрушающих.

Исследованиями в области электрометрических методов контроля занимались отечественные и зарубежные ученые S.A. Pulinets, A. Ramirez-Rojas, I. Tohbo, O. Weis, M. Uyeshima, M. Kinoshita, M.Б. Гохберг, Ю.А. Дашевский, В.В. Дырдин, П.В. Егоров, В.В. Иванов, В.В. Кебуладзе, М.В. Курленя, А.С. Лашхи, В.С. Могилатов, В.А. Моргунов, В.Н. Опарин, И.М. Петухов, П.В. Потапов и другие.

Электрометрические методы основаны на эффекте связи электрических свойств горных пород и минералов с механическими напряжениями [45–51], а также с возникающими при этом электрическими полями. К известным явлениям поляризации под воздействием нагрузок относятся явления пьезоэлектричества, сейсмоэлектрический эффект II рода, трибоэлектризация, электризация при хрупком разрушении кристаллических диэлектриков [46–50] и другие.

Первым, кто обратил внимание на взаимосвязь между напряженным состоянием горных пород и их удельным электросопротивлением в России был И.М. Петухов (1959 г.). Б.Г. Тарасов, В.В. Дырдин и В.В. Иванов [46-47] экспериментально установили свойство стационарного электрического поля в краевых зонах угольных массивов отражать их геомеханическое состояние. Первоначально это явление было установлено при измерениях в очистных и подготовительных выработках угольных шахт, на рудниках Таштагола И Норильска. Дальнейшие работы затем исследователей школы Б.Г. Тарасова (B.B. Дырдин, В.В. Иванов) экспериментально, а затем и теоретически [28, 30] показали, что потенциал стационарного электрического поля Земли и первый инвариант тензора механических напряжений связаны между собой линейной зависимостью. Также в работе [30] было показано, что направленная диффузия заряженных дефектов структуры горных пород и минералов под воздействием градиентов давления в породообразующих минералах может быть использована как универсальный критерий, связывающий возмущение электрического поля с механическими напряжениями [30].

В работе [51] М.Б. Гохберг с соавторами исследовали электромагнитные эффекты при подготовке землетрясений и разрушении земной коры, обусловленными крупномасштабными токовыми процессами дислокационной природы [15, 51].

Также активно развивающимися направлениями в области геофизических исследований являются научные исследования в области определения импульсного электромагнитного излучения во время подготовки динамических явлений.

При проведении экспериментов по регистрации ЭМИ определяют общее число импульсов за определенный промежуток времени, интенсивность ЭМИ (скорость счета импульсов), амплитуду сигнала. В работе [48] М. Gousheva с соавторами приводят результаты измерений квазистационарного электрического поля при активизации сейсмических

процессов. Показано, что вертикальная компонента напряженности поля возрастает на 2–10 мВ/м по сравнению с фоновыми значениями.

В работе [49] R. Teisseyre предложил модель перемещения зарядов в очаге землетрясения на основе движения заряженных дислокаций, так же, как это было предложено в работе М.Б. Гохберга [50].

В Таштагольского условиях рудника используется четырехэлектродный метод кажущегося удельного электросопротивления В вариантах подземного электрического зондирования И электропрофилирования [11, 12], причем с 2015 года этот метод является базовым при региональном и локальном прогнозе удароопасности [12]. Однако, по признанию работников службы прогноза и предотвращения горных ударов рудника, предлагаемая методика прогноза [11, 12] более чем в 50 % случаев, начиная с 1985 года, не дает объективной оценки удароопасности. Причина, на наш взгляд, заключается в том, что прогноз удароопасности строится на абсолютных значениях кажущегося удельного электросопротивления пород, которые подвержены существенному влиянию влажности, вкраплений руды, вкраплений минералов разного электросопротивления и других факторов.

#### Выводы и постановка задач исследования

1. Динамические проявления горного давления по силе и характеру подразделяются на горно-тектонические удары и собственно горные удары (далее – горные удары), микроудары, толчки, стреляния. К внешним признакам динамического проявления горного давления относятся динамическое заколообразование и шелушение пород (руд) на контуре горных выработок.

 К разрабатываемым железорудным месторождениям Кузбасса относятся Таштагольское, Шерегешское и Казское месторождения. Область,
 в которой расположены вышеперечисленные месторождения

характеризуется повышенной сейсмической активностью (до 7-8 баллов по шкале Рихтера).

3. Наиболее важными причинами возникновения динамических явлений в массивах горных пород данных месторождений являются высокие тектонические напряжения и большие площади обнажения при ведении взрывных горных работ. По данным измерений различных исследователей, горизонтальные компоненты тектонических напряжений на этих месторождениях в 2–4 раза превышают вертикальную компоненту.

4. Наиболее удароопасным месторождением из вышеперечисленных является Таштагольское железорудное месторождение. С 1983 года на этом месторождении зарегистрировано более 19000 случаев динамических проявлений горного давления.

5. Основные модели сейсмических событий основаны на гипотезе о разрыве сплошности материала земли по некоторой площадке. Наиболее близкими к реальности являются кинетические модели подготовки сейсмических событий.

6. Двух-трех стадийные модели сейсмических событий рассматривают процесс подготовки событий как кинетический процесс случайного накопления трещин, затем объединения этих трещин и образования макроразрыва, который распространяется затем с огромной скоростью, не превосходящей скорость упругих продольных волн в массиве.

7. Все методы прогноза и контроля удароопасности можно разделить на геомеханические и геофизические. Геомеханические методы весьма трудоемки и требуют больших затрат материальных и людских ресурсов. Наиболее применяемыми на практике методами являются такие геофизические методы как сейсмоакустический, электрометрический метод кажущегося электросопротивления и метод импульсного электромагнитного излучения горных пород.

8. В условиях Таштагольского рудника используется четырехэлектродный метод кажущегося удельного электросопротивления в

вариантах подземного электрического зондирования и электропрофилирования, причем с 2015 года этот метод является базовым при региональном и локальном прогнозе удароопасности. Однако, в силу несовершенства методики прогноза, не учитывающей кинетический характер процесса подготовки горных ударов и использующей абсолютные значения удельного электросопротивления, подверженные сильному влиянию различных примесей, методика не дает объективного прогноза.

Цель работы – совершенствование методики электрометрического прогноза удароопасности железорудных месторождений на основе кинетической концепции подготовки горных ударов для обеспечения безопасных условий ведения горных работ. В связи с этим были поставлены следующие задачи исследований:

 установить характер изменения удельного электросопротивления железных руд и вмещающих пород при повышении напряжений, вплоть до разрушающих;

определить критические значения изменения удельного
 электросопротивления руд и пород при подготовке динамического события;

 ввести показатель удароопасности железорудного массива на основе изменения удельного электросопротивления и сравнения его с критическим значением.

## ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ ПРИНЦИПОВ ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПОДГОТОВКЕ ГОРНЫХ УДАРОВ

# 2.1 Кинетические представления о разрушении горных пород и подготовке горных ударов

Разрушение сегментов горных пород любого уровня является следствием процесса накопления повреждений меньшего размера. На этот процесс оказывает влияние множество различных горно-геологических и горнотехнических факторов. Процесс накопления трещин в естественных условиях является квазистационарным случайным процессом, при этом периоды стационарности описываются пуассоновским распределением, когда вероятность появления m событий за время  $\Delta$ t находится следующим образом [30, 53, 54]:

$$P(\xi(\Delta t) = m) = \frac{(\lambda \Delta t)^{m}}{m!} e^{-\lambda \Delta t}, \qquad (2.1)$$

где  $\lambda$  – среднее число трещин, возникающих в данном объёме за единицу времени. На начальной стадии нестационарности происходит локальное повышение уровня напряжений и резкое нарастание числа трещин, причём интенсивность пуассоновского потока становится возрастающей функцией времени. На данной стадии разрушения вероятность появления m событий за время  $\Delta t$  есть [30, 53, 54]:

$$P(\xi(\Delta t) = m) = \frac{\alpha^m e^{-\alpha}}{m!} , \qquad (2.2)$$

где

$$\alpha = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda(t) dt , \qquad (2.3)$$

а интенсивность случайного потока трещин оценивается с помощью кинетического уравнения прочности С.Н. Журкова, уточненного В.В. Ивановым [13, 30, 52]:

$$\lambda(t) = \frac{N^*}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma\sigma(t) - U_0}{kT}\right],$$
(2.4)

где  $\sigma$  – интенсивность действующих напряжений;  $\tau_0 \cong 10^{-13}$ , с. – период тепловых атомных колебаний; U<sub>0</sub>,  $\gamma$  – константы материала и условий нагружения; T – абсолютная температура материала; k – постоянная Больцмана. Разрушение блока происходит при выполнении концентрационного критерия [52–54]:

$$\frac{(N^*)^{-1/3}}{L_0} = K \approx 3, \qquad (2.5)$$

где  $N^*$  – критическая концентрация трещин;  $L_0$  – средний линейный размер трещин на данном иерархическом уровне разрушения. Формулы (2.1) – (2.5) положены в основу кинетико-статистической модели разрушения для любых условий нагружения и любых масштабных уровней разрушения [30] (от образцов горных пород до крупных структурных блоков земной коры). При этом долговечность материала определяется из условия необратимости накопления повреждений Бейли [33–35]:

$$\int_{0}^{\tau} \frac{\mathrm{d}t}{\tau[\sigma(t)]} = 1, \qquad (2.6)$$

которое в контексте вышеизложенного записывается следующим образом [28, 30]:

$$\int_{0}^{\tau} \dot{N}dt = \int_{0}^{\tau} \frac{N^{*}}{\tau_{0}} \exp\left[\frac{\gamma\sigma(t) - U_{0}}{kT}\right] dt = N^{*}, \qquad (2.7)$$

где  $\tau$  – долговечность материала под нагрузкой;  $\lambda(t) = \dot{N}$  – скорость трещинообразования.

На всех стадиях разрушение горных пород сопровождается акустической эмиссией (АЭ) и электромагнитным излучением (ЭМИ) [30, 54] в очень широком диапазоне частот. Электромагнитные и акустические предвестники используются для прогноза разрушения участков массива горных пород по следующей схеме.

На удароопасном участке массива выбирается пространственное окно с размерами, примерно на порядок превышающими размер готовящегося очага разрушения. Связь энергии прогнозируемого события (в джоулях) с размерами очага (в метрах) можно определить по эмпирической формуле К. Касахары [56]:

$$lg L = 0,33 lg W - 0,4 , \qquad (2.8)$$

где L – линейный размер очага, м; W – энергия прогнозируемого события, Дж.

Участки массива, опасные по горным ударам, можно выделить на ранних стадиях по следующим параметрам:

– потенциал квазистационарного электрического поля

– повышенный уровень электромагнитного излучения

– аномально высокие значениям импульсов ЭМИ и т. п.

Породы на таких участках несвойственно хрупкие и имеют ряд других нестандартных свойств.

Поскольку отношение энергий двух соседних иерархических уровней разрушения составляет примерно четыре порядка, по выбранной энергии W прогнозируемого события легко определить энергию предвестников и размер трещин, кинетику которых необходимо отслеживать в процессе мониторинга участка массива. Например, прогноз события с энергией  $10^5$  Дж осуществляют по кинетической кривой накопления событий с энергией  $10^1$  Дж, что соответствует размеру образующихся трещин L<sub>0</sub> ≈ 0,9 м [30, 58].

Для интерпретации этих данных была составлена таблица 2.1, в которой приведены иерархические уровни разрушения и соответствующая им выделяемая энергия.

По заданному размеру L<sub>0</sub> и концентрационному критерию разрушения (2.5) определяется число N\* трещин – предвестников полного разрушения в контролируемом объёме.

Для решения реальной задачи прогноза горных ударов проведём некоторые упрощения. Обозначим

$$U_* = \frac{U(\sigma)}{kT} , \qquad (2.9)$$

где U( $\sigma$ ) – функция состояния горной породы в массиве [30, 57].

Тогда найденная методом наименьших квадратов оценка для U<sub>\*</sub> будет выглядеть следующим образом:
$$U^{*} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \ln \left( \frac{N^{*} \Delta t_{i}}{\tau_{0} N_{i}} \right).$$
(2.10)

Условие необратимости накопления повреждений Бейли (2.7) можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^{n} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{N^*}{\tau_0} \exp(U_i^*) dt + \int_{t_n}^{\tau} \frac{N^*}{\tau_0} \exp(U_n^*) dt = N^*.$$
(2.11)

Размер трещины (линейный размер очага разрушения или очага горного удара), L, м	Сейсмическая энергия, выделяемая при разрушении горных пород, W, Дж
0,04	10 <sup>-3</sup>
0,86	10
1,82	10 <sup>2</sup>
3,89	10 <sup>3</sup>
8,31	$10^{4}$
18,6	10 <sup>5</sup>
39,8	106
85,3	107
183,6	10 8
397,8	109

Таблица 2.1 – Иерархия структур в массиве горных пород [30]

В таблице 2.11 предполагается, что последняя найденная оценка  $U_n^*$  остаётся неизменной до полного разрушения материала. Но, так как наблюдение ведётся непрерывно, то и оценка  $U^*$  постоянно уточняется, отражая все изменения, происходящие в контролируемом блоке массива горных пород. Из (2.11) находим оценку даты горного удара на момент времени  $t_n$  на основании оценок  $U_n^*$  в предыдущих n (n  $\ge$  2) точках [30]

$$\tau = t_n + \left[\tau_0 \exp\left(U_n^*\right) - \exp\left(U_n^*\right) \sum_{i=1}^n \exp\left(-U_i^*\right) \Delta t_i\right], \quad (2.12)$$

что позволяет получить реальную оценку времени наступления динамического явления по непосредственным наблюдениям за процессом трещинообразования.

На Таштагольском месторождении сейсмические наблюдения проводятся сейсмостанцией «Таштагол». На основе анализа данных с этой сейсмостанции, была проведена опытная проверка вышеизложенных принципов.

Для решения проблемы долгосрочного хранения и удобного доступа к данным сейсмостанции, Пимоновым А.Г. разработана статистическая [57] автоматизированная dBASE-совместимая база данных «SEISMIC», в которой хранится информация о дате, времени, координатах и величине энергии событий, регистрируемых сейсмостанцией (табл. 2.2). Автоматизированная база **«SEISMIC»** разрабатывалась, образом, ланных главным ЛЛЯ статистической обработки хранящейся в ней информации с целью изучения процесса подготовки горных ударов, но, благодаря своей открытости и возможности бесконечного усовершенствования, может быть использована и для сейсмологического мониторинга в рамках программы по обеспечению сейсмобезопасности Кузбасса.

Сформулированные принципы прогноза реализованы в программном обеспечении АБД «SEISMIC» [53, 54], с помощью которой был проведён ретроспективный анализ и прогноз горных ударов по каталогу наблюдений сейсмостанции Таштагольского рудоуправления.

Табл. 2.3 содержит предвестники горного удара (27.03.94) с энергией W=10<sup>5</sup> Дж, а результаты ретроспективного прогноза приведены на рис. 2.1.

Аналогичные результаты получаются и при прогнозировании событий большего энергетического уровня (рис. 2.2).

Таким образом, приведённые данные свидетельствуют об удовлетворительной точности прогноза горных ударов по сейсмическим предвестникам и правильности предложенной кинетико-статистической модели, сформулированной в работах [30, 55]. По мере накопления информации прогноз становится всё более точным вследствие приближения теоретической кривой накопления событий к экспериментальной.

Как видно из приведенных данных, решение задачи прогноза горных ударов требует точного определения координат предвестников в массиве. До середины девяностых годов прошлого века эту задачу решала система сейсмоакустического контроля, которая включала в себя стационарную сейсмостанцию на земной поверхности, датчики акустической эмиссии, размещаемые под землей в массиве горных пород Таштагольского рудника, а также проводную систему связи подземных павильонов с сейсмостанцией.

N⁰	Содержимое поля	Имя поля	Тип	Длина	Дробная
п/п					часть
1	Дата сейсмического	Day_Se	Date	8	
	события				
2	Часы	HH	Numeric	2	0
3	Минуты	MM	Numeric	2	0
4	Секунды	SS	Numeric	2	0
5	Координата Х	Х	Numeric	5	0
6	Координата Ү	Y	Numeric	5	0
7	Координата Z	Ζ	Numeric	4	0
8	Мантисса энергии	E_mnt	Numeric	4	2
9	Характеристика	E_chr	Numeric	1	0
	энергии				

Таблица 2.2 – Структура АБД «SEISMIC»[57]

Таблица 2.3 – Сейсмические предвестники горного удара (27.03.1994) с

N⁰	Дата,	Время,	Энергия,	Расстояние до ближайшего
п/п	ДД.ММ.ГГ	чч:мм:сс	Дж	соседа, м
1	21.11.93	12:20:00	1,60.105	79,1
2	17.01.94	15:28:27	$5,97 \cdot 10^{1}$	94,5
3	23.01.94	06:10:16	$8,56 \cdot 10^{1}$	101,8
4	03.02.94	03:20:06	$5,50 \cdot 10^{1}$	99,6
5	11.02.94	10:45:48	$5,50 \cdot 10^{1}$	101,8
6	11.02.94	12:57:55	$7,00.10^{1}$	23,6
7	11.02.94	15:22:17	$9,70 \cdot 10^{1}$	23,6
8	13.02.94	20:44:49	$7,50.10^{1}$	46,4
9	16.02.94	05:07:25	6,99·10 <sup>1</sup>	57,7
10	20.02.94	01:07:07	$5,50 \cdot 10^{1}$	198,1
11	20.02.94	01:17:16	$5,50 \cdot 10^{1}$	58,2
12	24.02.94	15:58:41	$1,70 \cdot 10^{1}$	57,7
13	24.02.94	19:49:08	$1,10.10^{1}$	113,4
14	25.02.94	06:11:05	$6,22 \cdot 10^{1}$	284,3
15	28.02.94	14:18:33	3,99·10 <sup>1</sup>	154,0
16	07.03.94	02:29:59	9,68·10 <sup>1</sup>	58,2
17	07.03.94	03:58:02	$8,72 \cdot 10^{1}$	109,9
18	13.03.94	01:05:02	$5,50 \cdot 10^{1}$	109,9
19	15.03.94	11:44:19	$1,79 \cdot 10^{1}$	40,1
20	21.03.94	15:32:05	$3,70 \cdot 10^{1}$	94,5
21	21.03.94	16:45:22	9,30·10 <sup>1</sup>	40,1
22	22.03.94	15:19:18	9,68·10 <sup>1</sup>	99,6
23	23.03.94	14:15:32	$5,50 \cdot 10^{1}$	53,8
24	27.03.94	00:00:50	$1,00.10^{5}$	53,8

энергией W=10<sup>5</sup> Дж



Рисунок 2.1 – Прогноз горного удара (27.03.1994) с энергией W=10<sup>5</sup> Дж (1 – прогнозируемое время до разрушения, 2 – ошибка прогноза) [53, 57]



Рисунок 2.2 – Прогноз горного удара (25.05.1994) с энергией W=3,5·10<sup>7</sup>, Дж. (1 – прогнозируемое время до разрушения, 2 – ошибка прогноза) [53, 57]

В настоящее время эта система не работает, поэтому наиболее простым и оперативным методом прогноза горных может служить электрометрический метод. Однако, существующая методика прогноза, основанная на электрометрических измерениях, не учитывает новейших представлений о процессе подготовки горных ударов и требует серьезной корректировки.

## 2.2 Теоретические исследования изменения удельного электросопротивления горных пород рудных месторождений при их механическом нагружении

## 2.2.1 Изверженные горные породы земной коры как ионные и ионноковалентные структуры

Земная кора состоит из трех слоев (осадочного, гранитного и базальтового). Горизонтальная неоднородность земной коры определяется ее делением на континентальную, океаническую и кору переходного типа (сочетание первых двух типов слагает области шельфа, океанических хребтов и островных дуг).

В результате магматических, метаморфических, тектонических процессов и процессов осадкообразования земная кора резко дифференцирована, в ней протекают сложные процессы концентрации и рассеяния химических элементов, приводящие к образованию различных типов пород: магматических, метаморфических, осадочных и др.

Наиболее распространенным химическим элементом твердой оболочки земной коры является кислород, массовая доля которого составляет 46,6 %. За ним следуют в порядке убывания кремний (27,7 %), алюминий (8,1 %), железо (5 %), кальций (3,6 %), натрий (2,8 %), калий (2,6 %) и магний (2 %), составляющие вместе примерно 98 % всех элементов земной коры (табл. 2.4).

Объемная доля ионов кислорода в кристаллах таких породообразующих минералов, как кварц, ортоклаз, мусковит, составляет 87– 97 %, поэтому не подлежит сомнению, что геометрия размещения сфер, представленных кислородными анионами, имеет решающее значение в строении этих кристаллов.

Наиболее распространенные породообразующие минералы относятся к группам силикатов и карбонатов. В дальнейшем при описании структуры и химического состава таких пород будем следовать работам [59, 60]. Устойчивость структуры определяется отношением ионных радиусов анионов и катионов, связанных между собой, и условием минимума свободной энергии решетки. Одним из факторов, уменьшающих свободную энергию, является максимальное сближение структурных единиц и их плотнейшая упаковка.

Химический	Распространенность в		Химический	Распространенность в	
элемент	земной коре, %		элемент	земной коре, %	
	по Мэйсону	Мэйсону по Кларку и		по Мэйсону	по Кларку и
		Вашингтону			Вашингтону
Кислород	46,6	46,41	Титан	0,44	0,72
Кремний	27,72	27,58	Водород	0,14	0,13
Алюминий	8,13	8,08	Фосфор	0,12	0,16
Железо	5	5,08	Марганец	0,1	0,12
Кальций	3,63	5,61	Cepa	0,05	_
Натрий	2,83	2,83	Углерод	0,03	_
Калий	2,59	2,59 2,58		0,88	1,13
Магний	2,09	2,09			
Всего	98,59	98,26			

Таблица 2.4 – Распространённость химических элементов в земной коре [59]

Структуру кристалла обычно строят из таких многогранников. Тетраэдр и октаэдр являются многогранниками с плотнейшими кубической и гексагональной упаковками, с координационными числами катионов

соответственно 4 и 6. Тетраэдрический радикал [SiO<sub>4</sub>] является главной составной частью силикатов. Структура данного иона образуется тетраэдрической координацией четырех ионов кислорода и одного иона кремния Si<sup>4+</sup>. При этом ион кремния находится внутри тетраэдра, в вершинах которого располагаются ионы кислорода O<sup>2</sup>. Так как валентность кремния в кремнекислородном тетраэдре равна четырем, то только один заряд кислородных анионов нейтрализуется кремнием и каждый кислород сохраняет по одному отрицательному заряду для связи с другими катионами кремния. Это обеспечивает возможность обобществления кислорода двумя сложными ионами и представляет собой один из важных механизмов формирования силикатных структур. Связь в радикале [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> носит смешанный ионно-ковалентный характер и относительно прочна. По способу соединения тетраэдров между собой все силикаты можно разделить на островные, включающие ортосиликаты (группы граната и оливина), в которых изолированные тетраэдры [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> связаны между собой катионами металла, и диортосиликаты (эпидот, гемиморфит), в которых сдвоенные тетраэдры [Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>]<sup>6-</sup> связаны в цепочки одним кислородным ионом, и, образованные таким образом анионы, имеющие форму песочных часов, соединены металлическими или гидроксильными ионами; цепочечные силикаты (амфиболы, пироксены), в которых тетраэдры объединены общими ионами кислорода в одиночные, двойные или тройные цепочки; кольцевые силикаты (берилл, турмалин), в которых тетраэдрические группировки образуют замкнутые кольцевые структуры, состоящие из трех, четырех или шести тетраэдров; слоистые силикаты и алюмосиликаты (слюды, хлориты, глинистые минералы), в которых тетраэдры расположены сетками или слоями, в пределах которых существует прочная связь, а между слоями связь более слабая); каркасные (кварц, полевые шпаты, цеолиты), в которых тетраэдры соединяются кислородными анионами, расположенными В вершинах тетраэдров, в трехмерные каркасы.

Группа полевых шпатов – каркасные алюмосиликаты Ca, Na, K, Ba, широко распространенные минералы, составляющие около 60 % массы всех изверженных пород. Геометрически полево-шпатовая структура, подобно кварцевой, состоит из трехмерного каркаса, образованного кислородными тетраэдрами с угловыми контактами. В тетраэдрах полевых шпатов 25–50 % позиций иона Si<sup>4+</sup> замещает ион алюминия A1<sup>3+</sup>. В результате в каждом алюминиевом тетраэдре ощущается дефицит в один положительный заряд, чтобы скомпенсировать этот недостаток и обеспечить электрическую нейтральность, необходимо ввести в решетку катионы металлов, например K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>.

Полевые шпаты делятся на три группы: калиево-натриевые (щелочные), кальциево-натриевые (плагиоклазы) и калиево-бариевые. К первой группе относятся ортоклаз К [AlSi<sub>2</sub>O<sub>8</sub>], образующий прерывный изоморфный ряд с альбитом Na [AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>], микроклин К [AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>] и санидин К [AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>], в котором альбитовая составляющая доходит до 41 %. Но строение их разное и определяется положением иона калия. Плагиоклазы представлены серией твердых растворов от богатого натрием альбита до богатого кальцием анортита Ca (AlSi<sub>2</sub>O<sub>8</sub>). Промежуточное положение в этой серии по содержанию данных компонент составляют олигоклаз, андезит и лабрадор. Взаимная смесимость обеих серий весьма ограниченная.

Поскольку ионный радиус алюминия больше, чем ионный радиус кремния, эквивалентный кислородный радиус увеличен, а связь соответственно ослаблена. Присутствие металлических катионов также способствует искажению кислородных упаковок, поэтому полевые шпаты данной серии менее прочны, чем кварц, и, выветриваясь, превращаются в глинистые материалы, а кварц сохраняется в виде песка.

В группе слюд кремнекислородные тетраэдры объединяются только по вершинам, причем основания тетраэдров все находятся в одной плоскости, а свободные вершины – в другой. В результате такого соединения получаются слоистые листовые структуры. Особенностью слюд является то, что

1/4 кремниевых позиций всегда занята ионами алюминия A1<sup>3+</sup> и, кроме того, позиции алюминия в октаэдрах могут быть замещены ионами Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>. Тип слюды зависит от характера этих замещений.

Мусковит – минерал группы слюд Al<sub>2</sub> (AlSi<sub>3</sub>0<sub>10</sub>) (OH, F)<sub>2</sub>. Основным элементом структуры мусковита является трехслойный пакет, состоящий из двух кремнеалюмокислородных тетраэдрических слоев и внутреннего октаэдрического слоя с двух- или трехвалентными катионами  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Al<sup>3+</sup> и др. При этом из трех атомов A1 один находится в четверной, а два – в шестерной координации. Пакеты связываются между собой атомами калия. Прочность слюды зависит от силы калиевой связи, которая, в свою очередь, зависит от характера искажения решетки, вызванного процессом замещения, поэтому слюда обладает способностью расщепляться вдоль калиевых слоев сравнительно легко.

Карбонаты образуют другой класс породообразующих минералов. В карбонатах основной структурной единицей является плоский изолированный треугольный радикал [CO3]<sup>2-</sup>, в котором катион углерода симметрично окружен тремя ионами кислорода. Некоторые карбонаты имеют цепочечную или слоистую структуру. Углероднокислородная связь в основном ковалентная и более прочная, чем кремнекислородная. Поскольку заряд углеродного катиона C<sup>4+</sup> недостаточен для нейтрализации шести отрицательных зарядов трех кислородных ионов O<sup>2-</sup>, карбонатный ион ведет себя как анион с двумя отрицательными зарядами.

Наиболее распространенным карбонатным соединением является кальцит CaCO3, в котором катион кальция Ca<sup>2+</sup> находится в октаэдрической координации с кислородными анионами. Рассматривая карбонатный ион отдельно, можно заметить, что кальциевые и углеродные ионы расположены в том же порядке, что и в структуре NaCl. Другими минералами класса карбонатов являются сидерит FeCO<sub>3</sub> и доломит CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

В качестве примера в табл. 2.5 приведены данные минералогопетрографического анализа образцов горных пород золоторудных месторождений, полученные ПГО «Запсибгеология».

Таблица 2.5 – Минералого-петрографический состав горных пород золоторудных месторождений

Минерал	Массовая доля минерала в горных породах, %						
	Кварце	Гранодиорит	Плагиогранит	Метасоматическая			
	вый			карбонатная			
	диорит			порода			
Плагиоклаз	59,3	64	60	_			
Биотит	10,1	13	8	_			
Роговая обманка	21,7	1,5	_	_			
Кварц	9	20,5	30	_			
Калиевый шпат	-	—	1	_			
Кальцит	—	—	—	96			
Мусковит	-	—	_	< 1			
Серпентин –	_	—	_	1–3			
хлорит							
Амфибол	_	_	_	< 1			
Апатит, сфен,	1,2	1	_	-			
магнетит							

Таким образом, основные породообразующие минералы являются ионными или ионно-ковалентными структурами, поэтому закономерности электризации щелочно-галоидных соединений имеют место и в горных породах Таштагольского рудника.

Кристаллическая решетка природных минералов может искажаться от разных факторов, таких как температура, механические напряжения и др. Точечные дефекты являются простейшими дефектами структуры.

При механическом нагружении минерала увеличивается как число точечных дефектов структуры (оно может составлять 1 дефект на 10–100 атомов (ионов)), так и число дислокаций (наибольшая регистрируемая в кристаллах плотность дислокаций составляет 10<sup>12</sup>–10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>) и микротрещин.

Отсутствие в узле решетки катиона металла эквивалентно отрицательно заряженной катионной вакансии. Замещение металлов одной валентности в структуре решетки на металлы другой равноценно не скомпенсированному заряду ячейки того или иного знака. Краевые дислокации в минералах, несут линейный заряд, который в равновесном состоянии скомпенсирован облаком дефектов структуры, что может проявиться в процессе быстрого перемещения дислокаций.

В ионных кристаллах наиболее распространены дефекты структуры по Шоттки и Френкелю. Дефекты структуры по Френкелю образуются путем срыва катиона металла со своего места в решетке и перехода его в междоузлие, при этом образуется пара «межузельный ион – катионная вакансия» и ячейка остается в целом электрически нейтральной. Дефекты по Шоттки образуются путем удаления равного количества катионов и анионов на поверхность кристалла, в результате чего внутри кристалла остаются пары вакансий разных знаков, и элементарная ячейка, а также внутренние объемы кристалла остаются в целом электрически нейтральными [59–61].

Кварцсодержащие горные породы Таштагольского рудника обладают высоким сопротивлением при механическом нагружении, и при образовании трещин возрастает число заряженных точечных дефектов структуры на их берегах, удельное электрическое сопротивление таких пород должно падать с накоплением числа трещин. Наоборот, в породах с низким электрическим сопротивлением с ростом нарушенности пород их электрическое сопротивление должно расти.

# 2.2.2 Моделирование удельного электрического сопротивления трещиноватых горных пород

Рассмотрим удельное электросопротивление высокопроводящих горных пород [62–65]. Поскольку в процессе подготовки горного удара в материале пород накапливаются трещины, то с ростом числа трещин

электрическое сопротивление породы должно расти. Применив теорию линейных цепей (законы параллельного и последовательного соединения проводников), можно получить для эффективного удельного электросопротивления трещины [30, 65]  $\rho = \rho_2 / \zeta$ , где  $\rho_2$  – удельное электросопротивление ненарушенной породы, ζ – относительная среднестатистическая площадь скальных контактов берегов трещин, которая примерно 3.10<sup>-4</sup>. Далее, рассчитывая удельное согласно [24] равна электросопротивление горной породы с трещинами, получаем [64]

$$\rho = \rho_2 \left( 1 + \delta / h\zeta \right), \qquad (2.13)$$

где δ – среднестатистическое раскрытие трещин; h – расстояние между трещинами системы; ρ<sub>2</sub> – удельное электросопротивление ненарушенной породы.

критерию разрушения (2.5)Согласно концентрационному В предельном предразрушающем состоянии расстояние между трещинами h не может быть произвольным и равно примерно 3L, где L – длина трещин. [24], Согласно результатам эксперимента, приведенным В работе среднестатистическое отношение  $\delta / L = 3.6 \cdot 10^{-4}$ . Учитывая все сказанное, формулу (2.13) можно привести к виду

$$\rho = 1, 4 \cdot \rho_2 \,. \tag{2.14}$$

Таким образом, в предразрушающем состоянии удельное электросопротивление высокопроводящих пород должно возрастать примерно на 40 %.

Далее рассмотрим удельное электросопротивление низкопроводящих пород (диориты, порфириты, скарны и др). Т. к. с ростом механических напряжений в минералах, слагающих эти породы, растет число точечных дефектов структуры – ионов калия, магния, алюминия и их вакансий,

особенно вблизи поверхности образующихся трещин, то удельное электросопротивление таких пород должно падать. Вычислим предельное значение удельного электросопротивления таких пород в предразрушающем состоянии.

Аналогичным способом, как и при выводе формулы (2.13), получаем

$$\rho = 0.5 \cdot \rho_2 (1 + \rho_1 h / \rho_2 \delta), \qquad (2.15)$$

где ρ<sub>1</sub> – удельное электросопротивление породы вблизи поверхности трещин (в зоне концентрации заряженных точечных дефектов структуры). Остальные обозначения совпадают с пояснениями к формуле (2.13).

В этом случае относительное изменение удельного электросопротивления в предразрушающем состоянии породы будет равно примерно

$$\Delta \rho / \rho = 8,33 \cdot 10^3 \cdot (\rho_1 / \rho_2) . \qquad (2.16)$$

Обобщив вышеизложенное, можно сделать следующий вывод: относительное изменение электросопротивления удельного слабопроводящих пород существенно зависит от отношения электросопротивлений самой породы и заряженных зон вблизи поверхности образующихся трещин в процессе нагружения породы. Далее, из результатов лабораторного эксперимента это соотношение будет получено для разных горных пород. Приведенные формулы нечувствительны к масштабу разрушения, как это следует из их вывода [62–65].

## 2.2.3 Лабораторные исследования изменения удельного электросопротивления горных пород Таштагольского рудника в предразрушенном состоянии

Для измерения удельного электросопротивления горных пород была собрана установка, показанная на рисунке 2.3 [64, 65]. Испытания проводились согласно ГОСТ 25494-82. Для испытаний были изготовлены образцы правильной цилиндрической формы. Измерения проводились двухэлектродной установкой (рис. 2.3), ток через образец и измерение падения напряжения на нем производились с помощью цифровых вольтметра и амперметра. Для улучшения контакта электродов с поверхностью образцов их торцы графитизировались.

Расчет УЭС породы проводился по формуле

$$\rho = US/Ib, \qquad (2.17)$$

где U – падение напряжения на образце, В; I – ток, измеряемый амперметром, А; S – площадь сечения образца, м<sup>2</sup>; b – расстояние между электродами AB, м (высота образца).

Ниже в таблицах 2.6, 2.7, 2.8 приведены результаты испытаний образцов горных пород Таштагольского рудника.

Испытания проводились следующим образом. Сначала измерялось электросопротивление образца в ненагруженном состоянии. Затем образец нагружался до некоторого напряжения, вынимался из нагружающего устройства (из плит 10-ти и 50-тонного пресса) и производилось повторное измерение его электросопротивления.

Следующий этап нагружения заключался в том, что образец приводился в состояние, близкое к полному разрушению и в этом состоянии измерялось его электросопротивление[62–64]. Затем образец полностью разрушался, собирался из кусков в цилиндрическую форму (если это было

возможно после полного разрушения) и снова измерялось его электросопротивление.

При обработке результатов измерений рассчитывалось изменение в процентах электросопротивления образца на каждом этапе нагружения (см. табл. 2.6, 2.7, 2.8).



Рисунок 2.3 – Двухэлектродные установка для измерения электрического сопротивления образцов горных пород по методу охранного кольца: 1 – плита пресса; 2 – изолирующая прокладка; 3 – токопроводящий пластинчатый электрод *A*; 4 – образец; 5 – токопроводящий пластинчатый электрод с «охранным кольцом» *B*; PV – вольтметр; PA – амперметр; G – батарея питания [63, 64]

Анализ результатов, показанных в табл. 2.6 и на рис. 2.4–2.9, говорит о том, что для высокопроводящих пород при нагружении характерно увеличение удельного электросопротивления с ростом прикладываемой нагрузки, т. к. при этом число накапливаемых трещин в образце растет, как и следует из теории, приведенной выше. Для предельного состояния (максимальное напряжение о на образце, но образец еще не разрушен полностью) характерно увеличение удельного электросопротивленого электросопротивления пород

на 30–50 %, среднее значение изменения электросопротивления образцов в предразрушающем состоянии из табл. 2.8 составляет 37 %, что практически совпадает с теоретическим значением Δρ / ρ (40 %).

При полной потере несущей способности образца, т. е. при полном его разрушении удельное электросопротивление может возрастать в 3–8 раз и более.

Результаты образцов исследования с высоким удельным электросопротивлением (табл. 2.7, рис. 2.6–2.9) показывают, что изменение для разных пород при механическом нагружении происходит в основном в направлении уменьшения электросопротивления на 32-42 % и более. В этом случае существенное влияние на результаты измерений оказывает отношение удельных электросопротивлений зон повышенной проводимости на берегах трещин к удельному электросопротивлению ненарушенной породы ( $\rho_1 / \rho_2$ ). Как показывает табл. 2.8, во всех случаях эти электросопротивления отличаются примерно на пять порядков, причем для разных пород это отношение варьирует в пределах одного порядка. Исходя из этого, по величине этого отношения для разных пород по формуле (2.16) могут быть определены критические значения изменений электросопротивления в предразрушающем состоянии.

В табл. 2.8 приведены средние значения изменения удельного электросопротивления горных пород в предразрушающем состоянии, полученные на основе теоретических исследований и обработки результатов эксперимента.

Результаты измерений на образцах высокопроводящих горных пород также лают возможность оценить изменение удельного электросопротивления пород, полностью потерявших несущую свою способность (см. табл. 2.6). В этом случае рост удельного электросопротивления составляет сотни и даже тысячи процентов. Такого рода изменения ранее регистрировались службой ППГУ Таштагольского рудника на участках массивов с низким удельным электросопротивлением.

Таким образом, как это следует из табл. 2.8, измеренный рост удельного электросопротивления высокопроводящих руд непосредственно перед полным разрушением с учетом стандартной ошибки измерений составляет примерно 40 %, т. е. достигает величины, предсказанной Породы с высоким электросопротивлением теоретически. удельным показывают в предразрушенном состоянии его уменьшение на 15-37 % в зависимости от содержания в породах низкопроводящих минералов и кварца и отношения удельных электросопротивлений вблизи поверхности трещин и минерального скелета породы. На рис. 2.4–2.9 приведены зависимости приведенных электросопротивлений данных пород и руд от приложенных к образцам напряжений, а также уравнения регрессии и коэффициенты корреляции этих статистических зависимостей. Данные рисунки также подтверждают ранее установленные в п. 2.2.2 и 2.2.3 теоретические закономерности.

#### Выводы и первое научное положение

1. Наиболее приемлемой концепцией процесса подготовки горных ударов является кинетическая концепция разрушения. В соответствии с этой концепцией процесс подготовки горного удара представляет собой двухстадийный кинетический процесс накопления трещин вплоть до критического предразрушенного состояния участка массива горных пород и случайного объединения формирования очага разрушения путем накопленных трещин и формирования магистрального разрыва, который скоростью, превосходящей далее распространяется со не скорость продольных упругих волн (собственно горный удар или толчок).

2. Теоретические и лабораторные исследования изменений кажущегося удельного электрического сопротивления (КУЭС) рудных тел и вмещающих пород Таштагольского месторождения позволили установить, что с ростом напряжений на образцах и накопления трещин КУЭС рудных тел растет и его

изменение достигает 40 % в предразрушенном состоянии за счет критического накопления трещин. Электросопротивление вмещающих пород уменьшается и его изменение достигает 15–42 % в зависимости от минерального состава, содержания кварца в этих породах и отношения удельных электросопротивлений вблизи поверхности трещин и на удалении от этой поверхности.

3. Падение электросопротивления вмещающих пород при их нагружении обусловлено множественным накоплением заряженных точечных дефектов структуры в поле механических напряжений трещин.

На основании вышеизложенного, сформулировано первое научное положение.

В процессе повышения механических напряжений и подготовки горного удара удельное электросопротивление железорудных тел растет вследствие накопления трещин, а удельное электросопротивление вмещающих пород при этом уменьшается за счет накопления на поверхности трещин заряженных точечных дефектов кристаллической структуры.

Тип породы	Электросопротивление,	ρ, ом·м	$\Delta \rho / \rho, \%$	Напр. на образце,	Прим.
	ОМ			МПа	
Магнетит, 60 %	5,53	0,187	0	0	
Орт 23	6,60		19,3	50,5	
	8,63		56	97,4	
	7,17		30	180,5	Трещины
	22,7		484	108,3	Образец сильно разрушен
Магнетит, 60 %	2,01	0,065	0	0	
Орт 2	3,01		49,7	108,3	
	2,78		38,3	117,7	Скол края образца
	2,92		45,3	198,5	Множественные трещины
Магнетит, 60 %	5,72	0,176	0	0	
Орт 2	7,18		25,5	108,3	
	9,17		60,3	180,5	Скол и трещины
	53,9		840	129,9	Сильное разрушение
16 рудное тело	68979,6	2024	0	0	
23 орт руда	94729,7		37,3	72,2	Сколы
	107878,8		56,4	162,4	Сильно разрушен

# Таблица 2.6 – Высокопроводящие породы [65]

Продолжение таблицы 2.6

Тип породы	Электросопротивление R, ом	Δρ /ρ, %	ρ, ом∙м	σ, МПа	Примечание
16 рудное тело 23 орт руда	13833,3	0	405,9	0	
	14041,7	15		72,2	
	19305,6	39,6		126,3	Скол и трещины
Руда, содержание менее 50 %, СЗУ 3 орт	155490,2	0	4683	0	
	185348,8	19,2		65	
	638181,8	310		122	Сильно разрушен
Руда, содержание менее 50 %,	125,8	0	3,87	0	
СЗУ 3 орт	133,0	5,7		72,2	
	166,0	31,9		67.1	Множественные трещины
Руда, содержание менее 50 %,	17970,6	0	553,3	0	Плохой контакт ?
СЗУ З орт	5505,2	0		72,2	
	4532,8	17,7		108,3	
	6221,1	13,0		90,2	Множественные трещины
Руда, содержание менее 50 %,	7,58	0	0,233	0	
СЗУ 3 орт	7,89	4,1		108,3	
	9,21	21,5		114	Большая трещина
Руда, содержание менее 50 %,	175	0		0	
	178,5	2		51,2	Трещина по всей длине образца

Тип породы	Электросопроти	Δρ / ρ, %	ρ, 10 <sup>6</sup> ,	σ, МПа	Примечание
	вление, 10 <sup>6</sup> , ом		ом м		
Диорит	11,2	0	337	10,8	
	3,33	71		18,8	Сильно разрушен
Диорит	38,5	0	1160	0	
	46,1	-		36,1	Скол края
	19,4	50		63,5	Сильно разрушен
Диорит	35,85	0	1014	0	
	40,37	12,6		21,6	
	30,28	15,5		43,3	
	25,5	28,9		65	
	25,5	28,9		65	Через 10 мин. образец
	14,14	60,5		90,2	сильно
					разрушился
Диорит	19,7	0	608	0	
	17,6	10,8		21,6	
	16,4	17		43,3	Вертикальная
					трещина по длине
Порфиритовый	29,4	0	927	0	
диорит	26,9	8,5		21,6	
	25,3	14,1		43,3	
	22,2	24,5		65	
	17,9	39,2		108,3	
	18,4	37,6		97,4	Образец сильно
					разрушен
Порфиритовый	37,11	0	1142	0	
диорит	33,68	9,2		21,6	
	34,6	6,8		43,3	
	33,63	9,4		42,6	Образец не
					разрушился
Метасоматит	6,8	0	183	0	
	5,98	12,1		47	Трещина
	6,12	10		72,2	Множественные
					трещины
Метасоматит	7,1	0	209	0	
	6,15	12,9		47	
	7,8	10,5	<u> </u>	54,7	Множественные
Метасоматит	6,33	0	183	0	

Таблица 2.7 – Породы с высоким удельным электросопротивлением [65]

Тип породы	Электросопроти вление 10 <sup>6</sup> ом	Δρ / ρ, %	ρ, 10 <sup>6</sup> , οм·м	σ, МПа	Примечание
	5.2	17.0		17	
	5,2	17,9		47	
	5,12	19,1		72,2	Большая трещина
Метасоматит	4,09	0	121	0	
	3,92	3,9		47	
	6,03	47,4		93,8	Не разрушился
	8,01	0	247	0	
Метасоматит	6,65	17		36,1	
	5,6	30		32,5	Множественные трещины
Скарн рудный,	2,64	0	83	0	
13 орт	2,16	18,1		47	Множественные трещины
Скарн рудный,	2,14	0	64	0	
13 орт	1,89	12,1		54,1	
	1,54	28		108,3	Не разрушился

Таблица 2.8 – Усредненные значения отношения  $\rho_1 / \rho_2$  для пород

Таштагольского рудника и среднее изменение их удельного электросопротивления в процентах в предразрушенном состоянии по данным лабораторных измерений [64]

_ I _ I	-	
$(\rho_1 / \rho_2)_{cp}$ ,	Δρ / ρ,	Примечание
10-5	%	
5.06	31.6	
5,90	54,0	Электросопротивление
0.5	0.4	падает
0,5	0,4	~
4,7	37,1	Электросопротивление
		падает
0,3	0,5	
2,22	15,2	Электросопротивление
		падает
0,2	0,6	
2,77	28,3	Электросопротивление
		падает
0,4	0,5	
_	42,0	При полном запредельном
		разрушении сопротивление
	0,8	возрастает в 4-8 раз
_	32,1	Электросопротивление
		растет, при запредельном
	0,5	разрушении рост в 3–5 раз
	,	
_	37,0	Электросопротивление
	, ,	растет
		L. L.
	3.1	
	$\begin{array}{c} (\rho_{1} / \rho_{2})_{cp} , \\ 10^{-5} \\ 5,96 \\ 0,5 \\ 4,7 \\ 0,3 \\ 2,22 \\ 0,2 \\ 2,77 \\ 0,4 \\ - \\ - \\ - \\ - \\ \end{array}$	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$



Рисунок 2.4 – Зависимость приведенного электросопротивления руд с содержанием менее 50 % от приложенного к образцу напряжения



Рисунок 2.5 – Зависимость приведенного электросопротивления (к электросопротивлению в ненагруженном состоянии) магнетитов от приложенного к образцу напряжения



Рисунок 2.6 – Зависимость приведенного электросопротивления от приложенного к образцу напряжения для рудных скарнов



Рисунок 2.7 – Зависимость приведенного электросопротивления от приложенного к образцу напряжения для метасоматитов



Рисунок 2.8 – Зависимость приведенного электросопротивления от напряжения на образце для порфиритовых диоритов



приложенного к образцу напряжения для диоритов

## ГЛАВА 3. ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД И РУД НА ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТАХ ТАШТАГОЛЬСКОГО РУДНИКА

## 3.1 Ретроспективный анализ результатов электрометрических измерений

Опытно-промышленная проверка разработанных принципов прогноза удароопасности ПО электрометрическим измерениям осуществлялась, главным образом, на основе данных службы прогноза и предотвращения горных ударов рудника (ППГУ), начиная с 1985 года и по настоящее время. При шахтных измерениях и обработке результатов мы использовали материалы, изложенные в работах [64-70]. Результаты мониторинга службы ППГУ выбирались исходя из тех условий, чтобы они были проведены, вопервых, за несколько месяцев перед горным ударом или толчком, во-вторых, в непосредственной близости от места гипоцентра сейсмического события (на расстоянии не более 100–180 м). Причем главным условием было, чтобы измерения осуществлялись в одних и тех же точках массива и при одной и той же глубине зондирования АВ/2 (или на одной и той же глубине скважины, если измерения осуществлялись по скважине), хотя и в разное время (обычно – за один-два месяца до сейсмического события, либо чуть больше). Особый интерес собой вблизи представляли измерения тектонических нарушений, поскольку при попадании нарушения в зону повышенных напряжений, связанных с перераспределением напряжений при промышленных взрывах, как правило, происходят горные удары, либо толчки большой силы.

Для увязывания размеров очага горного удара или толчка непосредственно в гипоцентре события с его энергией, ниже в таблице 3.1 приведена связь энергии сейсмического события по энергетической шкале с размерами зоны разрушения при горных ударах на основе известных

эмпирических законов сейсмологии [56, 70]. Как видно из приведенной таблицы, размер очага горного удара восьмого или девятого энергетического класса составляет от 180 до 400 метров и, таким образом, охватывает несколько этажей между горизонтами, что и наблюдается на практике. Толчки же с энергией от 10<sup>5</sup> до 10<sup>7</sup> Дж. приводят к образованию зон разрушения в массиве горных пород от 19 до 85 метров.

Линейный размер очага горного Сейсмическая энергия, выделяемая при разрушении горных пород, удара, L, м. W, Дж.  $10^{-3}$ 0,04 10 0,86  $10^{2}$ 1,82  $10^{3}$ 3,89  $10^{4}$ 8,31  $10^{5}$ 18,6 106 39,8  $10^{7}$ 85,3  $10^{8}$ 183,6  $10^{9}$ 397,8

Таблица 3.1 – Связь размера очага горного удара с энергией сейсмических волн [56,65]

Поскольку процесс подготовки горного удара представляет собой кинетический, т. е. протекающий во времени процесс накопления трещин, то удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород, согласно результатам главы 2, должно для пород с большим электрическим сопротивлением (сиениты, сланцы, скарны, диориты, порфириты и др.) убывать непосредственно перед горным ударом или толчком на 15–37 %, а для высокопроводящих пород (магнетиты и руды) – возрастать примерно на 40 %.

Далее в таблице 3.2 приведены результаты шахтных измерений изменения удельного электросопротивления вмещающих пород и руд Таштагольского рудника непосредственно перед горными ударами и

толчками [64]. Измерения осуществлялись как методом подземных электрических зондирований с полуразносом питающих электродов AB/2 = 20 м (эти данные приведены в таблице 3.2 также вблизи тектонического разлома на горизонтах–350 и 280), так и методом каротажа в скважинах. На рисунках 3.1 и 3.2 приведены центры четырехэлектродной установки для электрических зондирований вдоль северо-западного полевого штрека и порожнякового квершлага на горизонтах–350 и 280 вблизи тектонического разлома, обозначенные как п. 10, 54, 102 и т. д.

Рассмотрим некоторые результаты электрометрических измерений в шахтных условиях, вытекающих из таблицы 3.2 [65].

Измерения осуществлялись в скарнах, сиенитах и микросиенитах 11.01.99–18.10.99 в северо-западном полевом штреке, п. 6, п. 8 (см. рис. 3.1, 3.2) на горизонте-350 и в порожняковом квершлаге в п. 50 перед горным ударом с энергией 2,3·10<sup>9</sup> Дж, который произошел в орте 15 (центр) 24.10.99 на горизонтах-280/-210. Согласно табл. 3.1, очаг разрушения достигал 400 метров и захватывал сразу несколько горизонтов, в том числе, гор. – 280 и 350 и вышеуказанные пункты измерений (п. 6, п. 8, п. 50). Как видно из таблицы 3.2, удельное электрическое сопротивление скарнов, процессе измерений сиенитов И микросиенитов В уменьшается И непосредственно перед горным ударом это изменение составляет 17-43 %.

Горный удар 29.03.98 с энергией  $6,2 \cdot 10^8$  Дж орты 21–25, измерения удельного электросопротивления осуществлялись 20.01.98–13.03.98 в скарнах в северо-западном полевом штреке, в п. 6. п. 8 (гор.–350), на расстоянии не более 70 метров под местом горного удара (размер очага 180 метров и охватывает оба горизонта–280 и 350). Как видно из табл. 3.2, изменение удельного электросопротивления скарнов непосредственно перед горным ударом составляет 37–48 %.

Толчок с энергией 1.1·10<sup>7</sup> Дж 02.04.95 в ортах 21–22 гор.–280. Измерения осуществлялись с 01.02.95 по 28.03.95 в порожняковом квершлаге в п. 54 (см. рис. 3.2) в сиенитах и скарнах на расстояниях от 100 до 200

метров до гипоцентра очага разрушения (размер очага разрушения согласно табл. 3.1 составлял 85 метров). Как видно из табл. 3.2, удельное электросопротивление уменьшается и непосредственно перед толчком его изменение составляет 42 %.

Толчок с энергией  $1.4 \cdot 10^7$  Дж 07.04.01 на горизонте–350 в ортах 25–26 (восток). Измерения осуществлялись в северо-западном полевом штреке в п. 16 с 09.02.01 по 06.03.01 в сиенитах, сланцах и скарнах на расстоянии от гипоцентра от 100 до 200 метров (размер очага разрушения примерно 85 метров). Как видно из табл. 3.2, удельное электросопротивление этих пород в процессе измерений уменьшается и его изменение непосредственно перед толчком составляет 30 %.

Горный удар с энергией 6,2·10<sup>8</sup> Дж 29.03.98 в ортах 21-25 на горизонтах-280/210. Измерения осуществлялись с 10.02.98 по 23.03.98 в сланцах и сиенитах в северо-западном полевом штреке, п. 100, на расстоянии не более 120 метров от гипоцентра горного удара (размер очага разрушения примерно 180 метров). Как видно ИЗ табл. 3.2, удельное электросопротивление этих пород уменьшается в процессе измерений, причем непосредственно перед горным ударом это уменьшение составляет 71 %.

Толчки с энергией  $1,4\cdot10^7$  и  $1,6\cdot10^5$  Дж 07.04.01 (через 23 с. один за другим) на горизонте–350, орты 25–26 (восток). Измерения осуществлялись в скарнах с 12.02.01 по 06.03.01 в п. 62 порожнякового квершлага с центром установки непосредственно в разломе на расстоянии примерно 150–200 метров от гипоцентра события. Как видно из табл. 3.2, удельное электросопротивление в указанный период времени уменьшается, причем его изменение непосредственно перед толчками составляет 45 %.

Горный удар 24.10.99 с энергией 2,3·10<sup>9</sup> Дж на горизонтах–280/–210/– 350 с центром в орте 15. Измерения осуществлялись в скарнах с 22.09.99 по 18.10.99 в порожняковом квершлаге в п. 54, 66 на расстоянии от 120 до 180 метров от гипоцентра события (заметим, что размер очага разрушения

составляет примерно 400 метров). Как видно из табл. 3.2, удельное электросопротивление падает в рассматриваемый период, причем его изменение непосредственно перед горным ударом составляет 23–34 %.

Толчок с энергией  $1,9 \cdot 10^8$ , который произошел 22.04.98 в орте 27 на горизонте–350. Заметим, что в силу размеров очага разрушения примерно 180 метров зона разрушения достигает гор.–280 и 210, т. к. расстояние между горизонтами составляет примерно 70 метров. Измерения осуществлялись в сланцах в северо-западном полевом штреке на гор.–280, п. 102, поэтому место измерений попадало в зону очага разрушения. Как показывает табл. 3.2, удельное электросопротивление сланцев в рассматриваемый период уменьшается, причем его изменение за весь период и непосредственно перед толчком составляет 32 %.

Горный удар с энергией 2,3·10<sup>9</sup> Дж 24.10.99, этаж – 280/ –210, центр орта 15. Измерения осуществлялись в сиенитах, микросиенитах в северозападном полевом штреке на гор.–280, п. 94, с 25.08.99 по 02.09.99 на расстоянии примерно 130 метров от гипоцентра очага разрушения (заметим, что размер зоны разрушения примерно 400 метров). Как следует из табл. 3.2, удельное электросопротивление сиенитов и микросиенитов падает, причем его изменение за указанный период перед горным ударом составляет 32 %.

Толчок с энергией 1,4·10<sup>7</sup> Дж 07.04.01, гор.–350, орты 25–26. Очевидно, как это следует из табл. 3.1, зона разрушения охватывает и горизонт-280. Измерения осуществлялись в сиенитах и сланцах на горизонте–280 в северо– западном полевом штреке, п. 98 с 06.10.01 по 02.03.01 на расстоянии около 120 гипоцентра. Как следует табл. 3.2, удельное метров от ИЗ электросопротивление данных пород в указанный период времени падает, причем в силу удаленности от гипоцентра более 90 метров, перед сейсмособытием электросопротивление изменяется всего на 14 %.

Толчок с энергией 7,5·10<sup>7</sup> Дж, который произошел на гор.–350 03.02.02 в створе орта 22. Измерения в сиенитах и микросиенитах осуществлялись с 21.12.01 по 21.01.02 на гор.–280 в северо-западном полевом штреке в п. 94 на

расстоянии примерно 100 метров от гипоцентра события (заметим, что в силу энергии события оно охватывало оба горизонта–350 и 280). Во все время текущих измерений удельное электросопротивление падало, причем непосредственно перед событием его изменение составило 42 %.

Толчок с энергией 1,1·10<sup>7</sup> Дж 02.04.95 на горизонте–280, с гипоцентром в середине ортов 21–22. Измерения осуществлялись с 10.02.95 по 22.03.95 в сиенитах и скарнах на горизонте–350 в порожняковом квершлаге, п. 64. Расстояние до гипоцентра события (на нижележащем горизонте составляло не более 80 метров). Изменение удельного электросопротивления за указанный период составило 25 %.

Горный удар с энергией 6,2·10<sup>8</sup> Дж 29.03.98 на этаже –280 / –210 в районе ортов 21–25. Измерения осуществлялись в сиенитах и скарнах на гор.–350 с 10.02.98 по 23.03.98 в порожняковом квершлаге в п. 66. В силу того, что событие охватывало сразу три горизонта–350, 280, 210, расстояние от гипоцентра события (зоны разрушения) до места измерений не превышало 100 метров (заметим, что размер очага разрушения составил примерно 180 метров). Как видно из табл. 3.2, уменьшение удельного электросопротивления за весь период измерений составило 49 %.

Толчок с энергией 1,9·10<sup>8</sup> Дж 22.04.98 на горизонте–350 с гипоцентром в орте 27. Измерения осуществлялись в скарнах на этом же горизонте с 19.02.98 по 08.04.98 в северо-западном полевом штреке в п. 14 на расстоянии от гипоцентра около 200 метров (см. рис. 3.1). Как показывает табл. 3.2, за весь период измерений удельное электросопротивление скарнов уменьшается, причем изменение за весь период составляет 40 %.

При измерениях в рудном теле перед событием с энергией1,5·10<sup>3</sup> Дж, как это следует из табл. 3.2, удельное электросопротивление растет и это изменение непосредственно перед событием (примерно за полмесяца до него) изменяется на 32 % (как следует из теории, этот рост достигает значения 40 %).
Таким образом, как следует из анализа результатов шахтного эксперимента, за один–два месяца до горного ударов или толчков (иногда этот период составляет три–четыре месяца), в процессе подготовки сейсмического события, в породах с высоким электрическим сопротивлением наблюдается однонаправленное изменение УЭС, а именно – уменьшение электросопротивления, причем непосредственно перед горным ударом или толчком это уменьшение составляет по данным таблицы 3.3 от 27 до 33 %.

Данная закономерность повторяется как для измерений по методу ПЭЗ, так и по результатам измерений в скважинах № 3, № 4 и № 5 (гор.–210, орты 2, 3 и 4), приведенным в таблице 3.2.

Анализ результатов измерений группы прогноза и предотвращения горных ударов рудника с 1985 года показал, что во многих случаях при измерениях за большой промежуток времени на участках массивов слабопроводящих пород наблюдаются существенные колебания УЭС – от уменьшения в несколько раз до его роста иногда в десятки и сотни раз. Это связано не только с ошибками эксперимента, обусловленными плохим контактом электродов с породами или с существенным изменением влажности поверхности скважин или поверхности выработок, из которых осуществляется зондирование, но И с изменением напряженнодеформированного состояния участков массива ИЛИ С ИХ полным разрушением после горного удара, толчка ИЛИ сотрясения при промышленном взрыве.

На первый взгляд, при рассмотрении результатов измерений группы ППГУ за длительный промежуток времени, изменения УЭС кажутся хаотичными и не заключающими в себе никакой закономерности, однако, если рассматривать эти результаты за небольшой промежуток времени непосредственно перед сейсмическим событием (за один–два месяца до него) и в непосредственной близости от гипоцентра, то можно заметить вполне четкую закономерность – уменьшение удельного электросопротивления на

27–33 % для вмещающих пород слабой проводимости и рост УЭС в среднем на 40 % для рудных тел (см. таблицу 3.3), как это и следует из теоретических представлений, расчетов и лабораторных измерений, приведенных в главе 2.

Особый интерес представляют собой измерения вблизи тектонического разлома (см. таблицу 3.2, рисунки 3.1, 3.2). Здесь при зондировании пород вне разлома непосредственно перед горным ударом или толчком (в таблице 3.2 представлены результаты измерений перед горными ударами с энергией 10<sup>8</sup>-10<sup>9</sup> Дж и толчками большой силы – от 10<sup>5</sup> до 10<sup>7</sup> Дж.) наблюдается уменьшение удельного электросопротивления слабопроводящих горных пород в тех же пределах, что и на других участках измерений. Для рудных тел непосредственно перед сейсмическим событием наблюдается рост УЭС. При зондировании пород в самом тектоническом разломе или при такой глубине зондирования, при которой часть пород разлома попадает в зону зондирования, непосредственно перед сейсмическим событием наблюдается падение УЭС вмещающих пород, а после удара или горно-тектонического толчка – резкий рост электросопротивления по всем пунктам зондирования, иногда в несколько раз.

Приведем пример более подробный анализ наблюдений перед горным ударом 24.10.99 с энергией  $2,3\cdot10^9$  Дж, который произошел на этаже гор. – 210/–280 с гипоцентром в орте 15 (центр). Район удара был представлен рудными телами 1 и 6+9 с нарушением между ними. При комиссионном обследовании обнаружены нарушения крепи, поднятия почвы и рельсовых путей, нарушение бетонной крепи, коммуникаций с выбросом горной массы в ортах 8, 9. Как видно из этого описания, разрушения затронули орты, располагающиеся на расстоянии не менее 250 метров от гипоцентра (вспомним, что согласно таблице 3.1, размер очага этого события достигает 400 метров). Наблюдения электрометрическим методом проводились с 25.08.99 по 01.09.99 и затем – после горного удара. Начиная с 25.08.99 наблюдения вне зоны нарушения в п. 94, 102, п. 46, 48, 50 (рисунок 3.2) показали уменьшение УЭС на 26–60 %, в самом разломе в п. 12 и 14 гор.–350

(рисунок 3.1) также наблюдалось уменьшение УЭС пород до горного удара, а затем по всем пикетам сразу после удара наблюдался резкий рост УЭС в несколько раз. Это может быть объяснено следующим образом. Сначала при попадании пород массива в зону повышенных напряжений, обусловленных перераспределением горного давления в массиве при промышленном взрыве, в прилегающей к нарушению зоне идет уменьшение УЭС слабопроводящих пород согласно установленной закономерности, в самой зоне нарушения идет закрытие трещин и пор, что также приводит к уменьшению УЭС. Затем в результате накопления напряжений до критического уровня в зоне нарушения происходит критическое же накопление трещин, резкий сдвиг по разлому (горный удар), что приводит к разрушениям в зоне очага и в прилегающих породах. В результате чего электросопротивление разрушенных пород резко растет (на порядок и более). Ниже в таблице 3.3 приведены среднестатистические критериальные значения изменения УЭС пород и рудных тел непосредственно перед сейсмическими событиями на основе анализа лабораторных и шахтных измерений. Заметим, что с учетом стандартных ошибок среднего, изменения КУЭС магнетитов и рудных тел близки к теоретически предсказанному значению (40 %) как по данным лабораторных, так и по данным шахтных измерений. Данные этой таблицы позволяют ввести уточненные критериальные значения изменений удельного электросопротивления в состоянии предразрушения, которые далее используются в методике электрометрического прогноза горных ударов.



Гор.-350 Масштаб 1:5000

Рисунок 3.1 – Схема расположения центров электрических зондирований пород вблизи разлома установкой с полуразносом AB / 2 = 20 м



Гор.-280 Масштаб 1:2000

Рисунок 3.2 – Схема расположения центров электрического зондирования пород вблизи разлома установкой с полуразносом AB/2= 20 м.

Сейсмическое событие	Энергия, Дж	Дата, время	Место события	Литотип пород, Изменение удельного электросопротивления (VЭС) р, Ом <sup>.</sup> м		Изменение р непосредственно перед событием, %
Горный удар	2,3·10 <sup>9</sup>	24.10.99	Орт 15, центр, этаж -280/-210	Скарны 1884 – 1287,4	11.01.99-28.07.99 Гор. – 350,СЗПШ,п.6 28.07.99 – 18.10.99	32
			Рудное тело 1 и 6+9	1287,4 - 1099 Сиенит, микросиенит	Гор350 ,СЗПШ,п.8	17
				254,34-188,4	Гор280, СЗПШ,п.94	26
Толчок	$1,1.10^{7}$	02.04.95	Гор. – 280, орты 21-22, центр	Скарны 533,8-240,7	01.02.95 – 10.04.95 Гор350, СЗПШ,п.8	55
Горный удар, толчки	$ \begin{array}{r} 6,2\cdot10^8 \\ 1,3\cdot10^6 \\ 6,3\cdot10^6 \end{array} $	29.03.98 Через 18 с. и через 34 с.	Этаж -280 /-210, орты 21-25 Рудные тела 6+9,16,22 Гор350, орт25, восток	Скарны 596,6-376,8 471 – 244,9 Сиениты, скарны 942 – 565,2 1256-942	20.01.98 – 13.03.98,п.8 20.01.98 – 13.03.98,п.6 Гор. – 350,СЗПШ 19.01.98-23.03.98 19.01.98- 10.02.98,порожняковый квершлаг,	37 48 40 25
Толчок	2,4.104	23.11.03	Гор350, орт16, центр	Скарны 329 – 282,6 502,4 – 376,8	гор- 280, п.56,54 05.06.03 – 19.11.03,п.6 05.06.03 – 19.11.03,п.4 СЗПШ	14 25
Толчок	1,1.107	02.04.95	Гор. – 280, орты 21-22, центр	Сиениты,скарны 816,3-471	01.02.95 – 28.03.95, гор280, порожняковый квершлаг,п.54	42
Толчок	$1,5 \cdot 10^3$	18.07.12	Гор280, орты 13-14, восток	Руда 319,68 – 376,29	Гор280, блок 13-14, 5 <sup>й</sup> подъэтаж, вост.сб.	04.07.12 – 10.07.12 18

Таблица 3.2 – Изменение удельного электросопротивления горных пород Таштагольского рудника по данным шахтных \_\_\_\_\_\_\_измерений перед сейсмическими событиями

Сейсмическое событие	Энергия, Дж	Дата, время	Место события	Литотип пород, Изменение удельного электросопротивления (УЭС) ρ, Ом·м		Изменение р непосредственно перед событием, %
Горный удар	2,3.109	24.10.99	Этаж-280 /-210, Орт 15, центр, рудные тела 1 и	Скарны 1695,6-973,4	01.09.99-18.10.99 Гор280, порожняковый квершлаг, п. 50	43
			6+9, между ними	565.2-216,7	Там же, п. 46	62
			нарушение	471-226,1	Там же, п. 48 01.09.99	52
				Скарны, сланцы	Гор350, СЗПШ, п. 12	
				942-471	-	50
				2260,8-1256	Там же, п.14	44
Серия толчков	$2,22 \cdot 10^4$	05.06.11	Гор280,орт 3 -4	Сиениты	Измерения по скважине 5,	
	8 68.10 <sup>4</sup>	, P	$\Gamma_{\rm OD} = 210$ opt	18840-9646.08	$75 \times 14.03 11_{-}29.04 11$	49
	0,0010	nashoe	1 ор210, орт 4 центр	18840-17257 44	7,5 м, 14.05.11-27.04.11 Там же глубина 6.5 м	8
	$1.10^{5}$	разное	-7, 4 Con $-210$ ont	18840-13828 56	Там же, глубина 6,5 м	27
	1.10	суток	1 ор210, орт 3 центр	18840-10296.06	Tam we $08.04.11-29.04.11$	45
	5,4·10 <sup>4</sup>	Cyrok	Гор280, орт 4, центр	10040 10290,00	глубина 4 м	77
Толчок	1,65·10 <sup>5</sup>	11.06.12	Гор210, орт 4, центр	Сиениты	Измерения по скважине 5, 30.03.12-13.06.12, гор	
			*	18840-13922,76	210, орт 4, глубина 5 м.	26
				18840-13169,16	Там же, глубина 8,5 м.	30
				18840-15561,84	22.05.12 – 13.06.12, там	17
					же, глубина 9,5 м.	
Толчок	$1,4.10^{7}$	07.04.01	Гор350,орты 25-	Сиенит, сланцы, скарны	Гор350, СЗПШ, п. 16	
			26, восток	254,34-178,98	09.02.01-06.03.01	30
Толчок	$8,5 \cdot 10^{6}$	12.04.04	Гор350, орты 17-	Скарны	23.03.04-07.04.04	
			18, восток	207,24-178,98	Гор-350,СЗПШ, п. 10	14
Толчок	$3,2 \cdot 10^{6}$	01.09.99	Гор350,орт 14,	Скарны	30.06.99-28.07.99	
			центр	502,4-339,12	Гор350,СЗПШ, п. 10	33
	-			273,18-226,08	Там же, п. 12	17
Толчок	$1,1.10^{7}$	02.04.95	Гор280, орты 21-	Сланцы, сиенит	Гор280, СЗПШ, п. 100	

Сейсмическое событие	Энергия, Дж	Дата, время	Место события	Литотип пород, Изменение удельного электросопротивления (УЭС) ρ, Ом·м		Изменение р непосредственно перед событием, %
			22, центр	157-122,4 Сиенит, микросиенит	16.01.95-09.03.95 Там же. п. 96	22
				188,4-150,72	16.01.95-09.03.95	20
				Сланцы 450,1-235,5	1ам же, п. 102 16.01.95-09.03.95	48
Толчок	1,62.105	26.11.98	Гор 280,орта 19-	Сиенит, микросиенит	17.11.98-23.11.98	••
			20, центр	113,04-81,64	Гор280, СЗПШ, п. 96	28
				235,5-141,3	Там же, п. 102	40
Толчок	$1,11 \cdot 10^5$	28.09.96	Гор280, орт 17,	Сланцы	Гор280,СЗПШ,п.102	
			запад	125,5-97,34	05.08.96-27.09.96	22
				Сиенит, микросиенит	Там же, п. 94	50
ΓΥ	$(2.10^8)$	20.02.00	D 280 /	4/1-198,8/	05.08.96-27.09.96	58
1 орный удар	6,2.10	29.03.98	Этаж гор2807-	Сланцы, сиенит	10.02.98-23.03.98	71
Топчки	$1.3 \cdot 10^{6}$	<b>U</b> ene3	Σ10, 0p1a 21-25 Γop350, opt 25	Спанцы	Там же. п. 102	/1
1 000 0000	$6,31 \cdot 10^6$	18 и 34	запад, орт 26,	502,4-197,82	10.02.98-23.03.98	61
	,	с.	восток	Сиенит, микросиенит	Там же, п. 96	
				596,4-169,56	10.02.98-23.03.98	72
Толчки	1,4.107	07.04.01	Гор. – 350,орты	Скарны	12.02.01-06.03.01	
	$1,6 \cdot 10^5$	через	25-26, восток	533,8-292,02	Гор. – 280, порож	45
		23 c.			няковый квершлаг, п. 62	
					(в разломе)	
				Сиениты, скарны 795 565 2	12.02.01-06.03.01	28
Толиок	$1.25.10^{6}$	23 03 03	Fon 350 opt 30		27 02 03 14 03 03	28
TOTION	1,2510	25.05.05	1 ор350, орт 50, центр	329 7-188 4	Гор -350 порожняковый	43
			P		квершлаг, п. 66	
Толчок	$1,4.10^{7}$	18.09.03	Гор350,	Скарны	27.07.03-10.09.03	
			ств.ЮСВШ,	216,7-188,4	Гор. – 350, порожняковый	
			восток		кверш-	13

Сейсмическое событие	Энергия, Дж	Дата, время	Место события	Литотип пород, Изменение удельного электросопротивления (УЭС) р, Ом·м	Период измерения, место измерения	Изменение р непосредственно перед событием, %
					лаг, п. 60 (в раздоме)	
Толчок	$1.10^{5}$	25.12.03	Гор350,	Скарны	19.11.03-01.12.03	
			орты 17-18,центр	533,8-385,6	Гор. – 350,порожняковый	28
					квершлаг,п.58	
					(вне разлома)	
					19.11.03-10.12.03	24
				292,0-188,4	там же, п. 60	36
Толиок	1.105	12 11 11	For 280 ort 22	Matagonotutu	(B pa3JIOMe)	
ТОЛЧОК	1.10	13.11.11	1 ор280, орт 22, восток	$2310 - 1826 (\Delta B/2 = 1.2 M)$	1 ор280, собика на 22 блок	21
			BOCTOR	2310 1020 (1072 1,2 M) 2756 16 -	21 10 11- 28 10 11	25
				2055,68(АВ/2=1,5 м)	Блок 21, 5 <sup>й</sup> подэтаж	36
				2544,12 - 1625,04(AB/2=2		
				м)		
Толчок	$8,49 \cdot 10^{6}$	12.04.04	Гор350,орты 17-	Скарны	Гор 350	
			18, восток	690,8-502,4	02.03.04-07.04.04	27
					Порожняковый квершлаг,	
				Сиениты, скарны	п.54	20
				548,54-244,9	02.03.04-07.04.04	30
		Скариц		02 03 04-07 04 04		
				282.6-169.6	Там же. п. 62	40
Горный удар	$2,3 \cdot 10^9$	24.10.99	Этаж-280/-	Скарны	Гор350	
			210,орт15,центр	565,2-372,09	22.09.99-18.10.99	34
			гор350,		Порожняковый квершлаг,	
			Рудные тела 1 и	Скарны	п. 54	
			6+9,между	816,4-628.0	01.09.99-18.10.99	23
Τ	2 4 4 1 0 4	24 10 00	ними нарушение.		Порожняковый квершлаг,	
1 ОЛЧОК	2,44.10	24.10.99	OPT 15 HOUTS		11. 30	
		, uenes 5	орттэ,центр			
		часов				

Сейсмическое событие	Энергия, Дж	Дата, время	Место события	Литотип пород, Изменение удельного электросопротивления (УЭС) ρ, Ом·м		Изменение р непосредственно перед событием, %
Толчок	1,3.106	24.09.20 00	Гор350,ств.орта 25-26	Сиениты,скарны 628-376,8	Гор350 14.07.00-13.09.00 Порожняковый квершлаг, п. 66	40
				Скарны 471-263,76 Скарны	14.07.00-13.09.00 Там же, п. 62	44
				216,66-197,88	14.07.00-13.09.00 Там же, п. 60	9
Толчок	1,2.106	30.12.20 00	Гор350, орты 26- 27, восток	Скарны 879,2-659,4	Гор350 12.10.00-22.12.00	25
Толчок	3,12.105	30.12.20 00, через 33 с.	Гор350, орт 25, восток		Порожняковый квершлаг,п.66	
Толчок	$1,9.10^{8}$	22.04.98	Гор350, орт 27, запад	Сланцы 197,82-135,02	23.03.98-02.04.98 Гор280, СЗПШ,п.102	32
Толчок	$3,2\cdot 10^{6}$	01.09.99	Гор350,орт 14,центр	Сиенит, сланцы 251,2-197,82	Гор280,СЗПШ,п.98	21
Горный удар	2,3·10 <sup>9</sup>	24.10.99	Этаж – 280 /-210, орт 15.центр.рулные	Сиенит, микросиенит 254,34-188,4 Сиенит, сланны	25.08.99-02.09.99 Гор280,СЗПШ,п.94 25.08.99-02.09.99	26
Толчки	$3,74 \cdot 10^4$ 2,44 \cdot 10^4	Через 30 и 38 с.	тела1 и 6+9 с нарушением между ними Гор210 и гор 350, ств.11 орта и орт 15, центр	197,82-160,14	Там же, п.98	19
Толчок	1,3.106	24.09.00	Гор350, ств.ортов 25-26	Сланцы 659,4-565,2 Сиенит, сланцы	04.07.00-08.09.00 Гор280,СЗПШ,п.102 04.07.00-08.09.00	14
				628-395,64	Там же, п.98	37

Сейсмическое событие	Энергия, Дж	Дата, время	Место события	Литотип пород, Изменение удельного электросопротивления (УЭС) р, Ом·м	Период измерения, место измерения	Изменение р непосредственно перед событием, %
Толчок	$1,4 \cdot 10^{7}$	07.04.01	Гор350,орты 25- 26	Сиенит, сланцы 263,76-226,08	06.10.00-02.03.00 Гор280, СЗПШ, п.98	14
Толчок	7,49·10 <sup>7</sup>	03.02.02	Гор350, ств.орта 22, восток	Сиенит, микросиенит 502, 4-292, 02 Сланцы	21.12.01-22.01.02 Гор280, СЗПШ, п.94 21.12.01-22.01.02	42
				722,2-502,4 Сланцы, сиенит 282 6-263 76	Там же, п.102 21.12.01-24.12.01	30 7
Толчок	$1,5.10^{3}$	18.07.12	Гор280, орт 13- 14, восток	Руда (AB / 2 = 2,5 м) 468,46-616,4	Гор280, 13-14блок, вост. сб,5 <sup>й</sup> подъэтаж	04.07.12- 05.07.12 32
Толчок	8,5.106	12.04.04	Гор350,орты 17- 18, восток	Скарны 690,8-502,4	02.03.04-07.04.04 Гор350 Порожняковый квершлаг,п.54	27
Толчок	1,1.107	02.04.95	Гор280, орты 21- 22, центр	Сиенит, скарны 167,5-125,5	16.01.95-28.03.95 Гор350, порожняковый квершлаг, п.64	25
Горный удар	2,3.109	24.10.99	Этаж-280 /-210, орт 15, центр, рудное тело 1 и 6+9 между ними - нарушение	Сланцы, скарны 753,6-502,4	25.08.99-22.10.99 Гор350 Порожняковый квершлаг (ПК), п.60	33
Горный удар	6,2·10 <sup>8</sup>	29.03.98	Этаж-280 /-210 орта 21 – 25, Рудное тело	Сиениты, скарны 216,66-109,9	Гор350 10.02.98-23.03.98 ПК и 66	49
Толчки	$1,3 \cdot 10^6$ $6,3 \cdot 10^6$	через 18 и 34 с.	6+9,16,22 Орты 25-26 (толчки)	565,2-348,54	10.02.98-23.03.98 ПК, п.60	38
Горный удар	$2,3.10^9$	24.10.99	Этаж -280 /-210,	Сланцы, скарны	25.08.99-22.10.99	

Сейсмическое событие	Энергия, Дж	Дата, время	Место события	Литотип пород, Изменение удельного электросопротивления (УЭС) р, Ом·м	Период измерения, место измерения	Изменение р непосредственно перед событием, %
			орт 15, центр, рудные тела 1 и 6+9 с нарушением между ними	753,6-502,4	Гор350,порожня- ковый квершлаг, п.60	33
Толчок	4.6.106	15.04.02	Гор280,орты 25- 26,центр	Сиениты, скарны 722, 2-690, 8	18.02.02-14.03.02,гор 350,порожняковый квершлаг,п.66	4
Толчок	1.102	05.06.11	Гор210,орт 3,центр	Сиениты 18840-17210,34	13.04.11-30.05.11, гор210,скв.4,орт 3,измерения по скважине, глубина 3.5 м, 10.05.11-30.05.11, глубина	9
				8600,46-7140,36 3815 1-1761 54	6,5 м 10.05.11-30.05.11, глубина 8 м	17
Толчок	1,1.107	02.04.95	Гор280,орт 21- 22,центр,порожня ковый квершлаг	Скарны 1998,67-1570	01.02.95-01.03.95 гор350,порожняковый квершлаг,п.44	21
Горный удар	$6,2\cdot10^{8}$	29.03.98	Этаж-280 /- 210,орты 21-25,	Скарны 2543,4-1381,6	Гор350, порожня- ковый квершлаг,п.48	46
ТОЛЧКИ	$6,5\cdot10^{5}$	через 18 и 34 с.	гор550.орты 25- 26	Скарны, сланцы 471-348,54	C311111, 11. 14	26
Толчок	1,9·10 <sup>8</sup>	22.04.98	Гор350, орт 27	Скарны 471-282,6	19.02.98-08.04.98 Гор350,СЗПШ, п.14	40

## Таблица 3.3 – Критериальные значения изменений удельного электросопротивления пород Таштагольского рудника в предразрушенном состоянии по данным лабораторного и шахтного эксперимента [64]

Литотип породы	По данным	По данным шахтного
	лабораторного	эксперимента, %
Лиориты среднее	35	
Стандартная ошибка среднего	55	
	0,4	
	27	
Станлартная ошибка среднего	57	_
	0,5	
Метасоматиты, среднее	18,5	27,3
Стандартная ошибка среднего		
	0,6	4,5
Скарны, среднее	28,3	32
Стандартная ошибка среднего	0.5	2.7
	0,5	2,7
Сиениты, сланцы, среднее	_	29,3
Стандартная ошиока среднего		0.8
Сиениты, срелнее	_	28.2
Стандартная ошибка среднего		,_
		5,2
Сиениты, микросиениты,	_	32,7
среднее		
Стандартная ошибка среднего		6,1
Скарны сланцы среднее		31.6
Стандартная ошибка		5.9
Сиениты, скарны, среднее	_	31,8
Стандартная ошибка		2,9
Сланцы, среднее	_	31
Стандартная ошибка		3,9
Магнетиты, рудные тела,	37,1	39
среднее, станд. ошибка	3,1	2,5

Таким образом, ведя систематический мониторинг изменений удельного электросопротивления пород и руды, можно выделить опасные участки массивов по однонаправленному его изменению. Так участки с повышенным горным давлением во вмещающих породах показывают однонаправленное уменьшение удельного электросопротивления и его рост в магнетитах и рудных телах, причем критерием удароопасности могут служить изменения в процессе измерений, представленные в таблице 3.3.

#### Выводы и второе научное положение

1. опытно-промышленной разработанных Результаты проверки удароопасности показали, ЧТО В соответствии ранее критериев с установленными теоретически В лабораторном эксперименте И закономерностями, непосредственно перед горными ударами и толчками наблюдается закономерное падение УЭС вмещающих пород вплоть до критических значений и рост УЭС при измерениях в рудных телах.

2. При измерениях непосредственно в разломной зоне сначала заметно уменьшение УЭС слабопроводящих пород согласно установленной закономерности; в самой зоне нарушения идет закрытие трещин и пор, что также приводит к уменьшению УЭС. Затем в результате роста напряжений до критического уровня в зоне нарушения происходит критическое же накопление трещин, резкий сдвиг по разлому (горный удар или толчок), что приводит к разрушениям в зоне очага и в прилегающих породах. В результате чего электросопротивление разрушенных пород резко растет (на порядок и более).

3. Лабораторными и шахтными исследованиями установлены критические значения изменений удельного электросопротивления вмещающих пород и рудных тел:

 в порфиритах, скарнах, сиенитах, сланцах, диоритах и других вмещающих породах высокого электросопротивления непосредственно перед горным ударом или толчком наблюдается изменение УЭС на 27–37 % в зависимости от минерального состава пород;

 в рудных телах критическое изменение удельного электросопротивления перед горным ударом или толчком составляет с учетом стандартной ошибки среднего примерно 40 %.

На основании вышеизложенного, сформулировано второе научное положение.

Критическое увеличение удельного электросопротивления железорудных тел перед разрушением составляет 40 %, а критическое уменьшение удельного электросопротивления вмещающих пород при этом достигает 27–37 % в зависимости от их минерального состава.

# ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА УДАРООПАСНОСТИ ПОРОД И РУД НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ ПОДГОТОВКИ ГОРНЫХ УДАРОВ

#### 4.1. Методы и средства измерений

Электрометрические измерения производятся методами подземного электропрофилирования (ПЭП) и электрозондирования (ПЭЗ) с помощью симметричной четырехэлектродной установки (AM = BN) аппаратурой АНЧ–3, ЭРА с использованием переносных (прижимных) реперов – электродов.

Прижимные электроды выполняются в виде чашечек, закрепленных на электроизоляционных рукоятках и заполняемых поролоном, пропитанным раствором соли. Измерительная линия состоит из прижимных электродов и электропроводящих кабелей.

#### 4.2. Метод подземного электропрофилирования (ПЭП) выработок

Методом электропрофилирования выработок вмещающего массива контролируется **региональная** напряжённость массива, определяются пригруженные участки (блоки) массива, в пределах которых необходимо проведение работ по **локальному прогнозу** удароопасности [71]. Наблюдения методом ПЭП проводятся в квершлагах, подводящих к рудным телам, и в полевых штреках на всех эксплуатируемых и вновь вскрываемых горизонтах.

На участках пород с низким удельным электросопротивлением, к которым относятся магнетиты и рудные тела, пригруженные участки отличаются от остальных **более высокими** значениями электросопротивления. Причем при повторных измерениях в одних и тех же

точках массива наблюдается монотонный рост электросопротивления. Непосредственно перед горным ударом или толчком рост УЭС составляет примерно 40 %. Полностью разрушенные участки рудных тел, потерявшие несущую способность, отличаются в несколько раз (иногда более чем на порядок) от остальных пород по электросопротивлению в сторону его роста.

Наоборот, на участках пород с **высоким** электросопротивлением, к которым относятся диориты, скарны, метасоматиты, порфириты и др. породы, **пригруженные** части массива отличаются по электросопроотивлению от остальных на 27–37 % в сторону **уменьшения** удельного электросопротивления.

Поскольку сравнение абсолютных значений УЭС на разных участках массивов горных пород не может привести к правильным выводам относительно пригруженных зон, т. к. на результаты измерений очень сильно влияют неоднородность пород в массиве, влажность контура выработок (при зондировании) или поверхности скважин (при измерениях по скважине) и другие факторы, зоны повышенных напряжений при профилировании следует искать по монотонному росту или убыванию УЭС на каких-либо участках массивов при повторных измерениях в одних и тех же точках выработки или скважины.

Вдоль профилей электрометрических наблюдений размечаются пикеты с шагом AB = 20-25 м, причем точки установки электродов необходимо размечать так, чтобы они были **легко найдены при повторных** измерениях даже через большой промежуток времени. Два соседних пикета используются для установки питающих электродов AB. Приемные электроды MN с расстоянием между ними MN = 1, м. устанавливаются на равном расстоянии между питающими электродами, при этом AM=NB=(AB – 1) / 2, м. Для измерений используют переносные линии и прижимные электроды.

#### 4.3. Метод подземного электрозондирования (ПЭЗ) на крупных базах

Метод крупнобазового ПЭЗ предназначен для глубинного контроля массива в районах тектонических нарушений и прогноза горных ударов с энергией 10<sup>7</sup> – 10<sup>9</sup>, Дж.

Замеры производятся по следующей схеме. Приёмные электроды MN устанавливают на расстоянии 3 м друг от друга. На равном расстоянии от них устанавливаются питающие электроды AB. Величины разносов приведены в таблице 4.1, заимствованной их работ [10, 11]

АВ/2 м	Геометрический коэффициент установки К
11D/2, W	
7	48,92
9	82,44
11	124,32
13	174,44
15	233710
20	416,19
25	651,67
30	940,28
35	1280,00
40	1672,50

Таблица 4.1 – Величины разносов питающей линии и соответствующие геометрические коэффициенты установки

# 4.4. Техника электрометрических измерений и методика обработки результатов измерений

Работа с электрометрической установкой проводится согласно инструкциям по работе с приборами АНЧ-3 или ЭРА. При измерениях в шахте для уменьшения искажающего влияния индуктивного поля питающей линии необходимо следить, чтобы провода питающей и приёмной линий находились не ближе 1 м друг от друга. Данные электрометрических измерений заносят в базу данных (таблица 4.2).

Дата измерений	
Горизонт	
Выработка	
Привязка	
Метод измерений	
Замерный центр	
Величина разноса питающей линии, м.	
Расстояние между приёмными электродами, м.	
Сила тока, мА	
Измеренная разность потенциалов, мВ	
Измеренное электросопротивление, р, ом м	

Таблица 4.2 – Поля базы данных[11]

Вычисление электросопротивления пород на участках массива производится по формуле

$$\rho = \mathbf{K} \cdot \mathbf{C} \cdot \Delta \mathbf{U} / \mathbf{I}, \mathbf{O}_{\mathbf{M}} \cdot \mathbf{M}, \tag{4.1}$$

где  $\Delta U$  – измеренная разность потенциалов между электродами, мВ; I – измеренная величина тока, мА; К, С – геометрический коэффициент установки и поправочный коэффициент С – коэффициент, учитывающий геометрические размеры выработки. Для квершлагов и штреков при методе ПЭП С=2, т. к. АВ/2 превышает размер сечения выработки более чем в 2 раза, т. е. происходит пространственное распространение электрического тока по массиву.

Коэффициент К вычисляется по формуле

$$\mathbf{K} = \pi \cdot \mathbf{A} \mathbf{M} \cdot \mathbf{A} \mathbf{N} / \mathbf{M} \mathbf{N}, \tag{4.2}$$

где AM, AN, MN – расстояние между электродами.

По формуле (4.1) вычисляется р для каждого замера.

При повторных измерениях в одних и тех же точках массива вычисляются изменения  $\rho_i$  в процентах, причем разница УЭС в повторных измерениях относится к первоначальному значению  $\rho_{in}$ , по которым для профиля целиком и для каждого структурного блока строится график, отражающий изменение  $\rho$  во времени в процентах. По вертикальной оси откладываются значения ( $\Delta \rho / \rho$ )·100, по оси абсцисс – календарное время в сутках.

Производится сравнение изменений электросопротивления  $\rho_i$  по профилю и по участкам профиля с предыдущими измерениями для выявления зон пригрузки и разгрузки, установления активных структурных блоков по знакопеременным изменениям р в зонах контакта литологических разностей пород и тектонических нарушений, смыканию или их размыканию по аномальным значениям р. Если на каком-то участке массива происходит монотонный рост (в рудных телах) или монотонное уменьшение УЭС (для слабопроводящих вмещающих пород), то ПО результатам анализа определяется необходимость усиленного контроля нагружаемого участка массива и принятия мер безопасности.

## 4.5 Прогноз удароопасности массива по изменению параметров электросопротивления

Удароопасность массива определяется степенью его напряженного состояния. За критерий удароопасности для электрометрического метода прогноза может быть принят показатель удароопасности [72]

$$\mathbf{P} = |(\rho_i - \rho_{i_H})| / \rho_{i_H} \cdot \mu, \qquad (4.3)$$

где  $\rho_i$  – электросопротивление, получаемое повторными измерениями в одних и тех же нагруженных участках профиля, либо в одних и тех же точках ПЭЗ;  $\rho_{iH}$  – начальное электросопротивление данных участков при

неудароопасном состоянии массива (в начальном слабо нагруженном состоянии); µ – критериальное значение изменения электросопротивления участка массива в предразрушенном состоянии, которое определяется для разных горных пород по таблице 4.3. При значении показателя 0,5 и более участок массива считается удароопасным и на таком участке требуется применять профилактические меры борьбы с горными ударами. При значении показателя менее 0,5 участок считается неудароопасным. В формуле (4.3)разность конечного начального значений И электросопротивления берется по абсолютному значению без учета знака этой разницы.

#### 4.6 Оценка удароопасности пород вблизи разломов

Оценка уровня напряженного состояния в районе тектонических разломов электрометрическим В варианте подземного методом электрического зондирования основана на том, ШОВ ЧТО разлома проводящей средой, являетсяэлектрически ПЛОХО изменяющейся В зависимости от уплотнения или разуплотнения контактов его берегов в результате тектонических подвижек. Изменение плотности контакта берегов разлома приводит к изменению электросопротивления на несколько порядков на исследуемых участках шахтного поля вдоль плоскости сместителя разрывного нарушения. Так как основным фактором, влияющим на возникновение динамических явлений, является положение фронта очистных работ, то измерения рекомендуется выполнять как на уровне выработок, бурового, так И откаточного горизонтов, В пределах пересекающих разлом. Замеры рекомендуется выполнять посредством подземных зондирований, позволяющих производить измерения в глубине массива. При этом рекомендуется разметить точки установки электродов для повторных измерений так, чтобы глубина зондирований была не менее 20 м (AB/2 = 20 м). Часть центров установки должна быть выбрана так, чтобы при

данной глубине зондирований отсутствовало существенное влияние разлома (вблизи разлома, но не захватывая самого разлома). Причем эти пикеты должны быть расположены по обе стороны разлома. Один–два пикета (центры установки зондирования) должны быть на каждом горизонте расположены так, чтобы питающие электроды располагались по разные стороны разлома. Расстояние MN должно быть много больше мощности разлома, а расстояние AB определяется максимально необходимой глубиной зондирования.

Первым признаком роста напряженного состояния на границах разлома является однонаправленное изменение УЭС во времени как на пикетах вне зоны влияния разлома, так и на пикетах, захватывающих разлом (рост УЭС для пород с высокой электрической проводимостью и уменьшение – для вмещающих пород со слабой проводимостью). В этом случае рекомендуется повторные измерения проводить чаще и при достижении вероятностью сейсмического явления значения 0,5 принимать меры борьбы с горными ударами.

Таблица 4.3 – Критериальные значения изменения удельного электросопротивления µ пород в предразрушенном состоянии [64]

Диориты	0,35	С нагрузкой электросопротивление падает
Порфиритовые лиориты	0.37	Электросопротивление палает
Метасоматиты	0,273	Электросопротивление падает
Скарны	0,32	Электросопротивление падает
Сиениты, сланцы	0,293	Электросопротивление падает
Сиениты	0,282	Электросопротивление падает
Сиениты, микросиениты	0,387	Электросопротивление падает
Скарны, сланцы	0,316	Электросопротивление падает
Сиениты, скарны	0,318	Электросопротивление падает
Сланцы	0,31	Электросопротивление падает
Магнетиты, рудные тела	0,39	С нагрузкой электросопротивление растет, при
		запредельном деформировании и потере несущей
		способности электросопротивление возрастает в 4–10
		раз

Количество электрометрических наблюдательных станций определяется положением фронта очистных работ. Глубинность зондирований определяется протяжённостью выработок вблизи исследуемой зоны. Все замеры по наблюдательным станциям начинают выполнять до начала ведения очистных работ.

По электрометрическим станциям изменение уровня напряженного состояния и степени удароопасности определяют по разности измеренных значений  $\rho_i$ ,  $\rho_{iH}$ , отнесенных к первоначальной измеренной величине  $\rho_{iH}$  по формуле (4.3).

# 4.7. Методика локального прогноза удароопасности электрометрическим методом

# 4.7.1 Об особенностях прогноза удароопасности в сейсмически активных зонах

По карте сейсмического районирования территории Кузбасса, составленной Алтае-Саянской сейсмологической службой СО РАН, вся его площадь относится к сейсмически опасной зоне. За последние два столетия землетрясения силой в 6–7 баллов по шкале Рихтера неоднократно фиксировались на территории Кузбасса и прилегающих областей. Наиболее значительные сейсмические события произошли в 1898, 1903, 1995 годах.

Общая площадь сейсмических зон Кузбасса превышает 32 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет около 1/3 всей площади региона, на которой находится 65 населенных пунктов с общей численностью населения более 1,7 млн чел.

Кузбасс является динамично развивающимся промышленным регионом, традиционно специализирующимся на добыче каменного угля. Однако, в Таштаголе, Казе и Шерегеше ведется также добыча железных руд подземным способом.

С 2005 года на ряде шахт и разрезов стали происходить техногенные землетрясения. Эти явления замечены на небольших глубинах в районе

г. Осинники, г. Полысаево, г. Междуреченска (шахта Распадская), г. Белово (разрез Бачатский). Детальные исследования сейсмичности в районе г. Полысаево, проведенные Алтае-Саянской геофизической службой СО РАН с помощью автономной сейсмической аппаратуры альфа-геон, которая устанавливалась на поверхности, позволили установить, что техногенные землетрясения энергетического класса 3–5 происходят на небольших глубинах (до одного километра) под действующими и над действующими выработками, причем максимум сейсмичности наблюдается в период работы добычных комбайнов. В ремонтную смену сейсмичности не наблюдается, однако, в этот период иногда происходили более сильные землетрясения, обусловленные глобальными процессами. Наблюдаемую техногенную сейсмичность можно объяснить как спусковой механизм глобальных сейсмических активизаций в Алтае-Саянской горной области.

К районам с наиболее высокой степенью техногенной сейсмической опасности можно отнести: Гурьевский, Прокопьевский, Новокузнецкий, Кемеровский, Таштагольский районы, города: Анжеро-Судженск, Белово, Прокопьевск, Березовский, Калтан, Кемерово, Киселевск, Осинники, Ленинск-Кузнецкий. Поэтому при прогнозировании горных ударов на рудниках необходимо учитывать текущую сейсмологическую обстановку и сейсмической активности региона при нарастании чаще проводить локальный и региональный прогноз удароопасности.

## 4.7.2 Локальный прогноз удароопасности

Для проведения локального прогноза удароопасности при выполнении инструментальных наблюдений методом электрометрии необходимо, чтобы расположение измерительных и генераторных электродов совпадало с направлением действия максимальных главных напряжений, действующих в массиве.

Оценка напряженного состояния и степени удароопасности руды и вмещающих пород основана на повторных измерениях в одних и тех же точках массива И на закономерном росте, либо уменьшении электросопротивления по мере увеличения напряжений и роста числа трещин под действием горного давления. Если нагрузки близки к пределу прочности породы (предразрушенное состояние), происходит развитие микротрещиноватости, перерастающее лавинообразный В процесс, приводящий к динамическому проявлению и резкому возрастанию электросопротивления в запредельном состоянии как для руды, так и для вмещающих пород с высоким удельным электросопротивлением.

Оценка удароопасности участка массива производится на основе измерений и **расчета показателя удароопасности** по формуле (4.3) [72].

По степени удароопасности участки массива, примыкающие к выработкам, подразделяются на две категории:

**При значении показателя более 0,5 «Удароопасно».** Участки опасные по проявлению горных ударов, толчков и микроударов, а также опасные по проявлению стреляния и интенсивного заколообразования. Выработка должна приводиться в безопасное состояние.

<u>При значении показателя менее 0,5 «Неопасно».</u> Не представляющие непосредственной опасности проявления горного удара, толчка, микроудара, стреляния и заколообразования пород. Выработка может эксплуатироваться без применения профилактических мероприятий. Фактически категория «Удароопасно» говорит о возможности проявления горного давления в динамической форме.

Таким образом, при Р более 0,5 могут происходить динамические проявления. Наблюдения показывают, что характер и интенсивность проявлений признаков и форм горных ударов определяются глубиной и размером очага разрушения. Очаг удара всегда расположен в зоне опорного давления и чем ближе эта зона к обнажению, тем меньше интенсивность горного удара. В одном случае разрушение протекает в глубине массива и

при этом нарушается участок между очагом удара и контуром выработки (микроудар, собственно горный удар), а в другом – непосредственно на контуре выработки (стреляние и т. п.).

После проведения выработок в прилегающем массиве устанавливается напряженное состояние, соответствующее той или иной вероятности сейсмических событий. Однако при этом выработка может эксплуатироваться без применения профилактических мероприятий, если вокруг нее не происходит изменения уровня напряженного состояния, т. е. однонаправленного изменения УЭС, особенно в виде динамической пригрузки (взрывные работы, проведение выработок, очистная выемка и т. д.).

Как правило, опасность проявления горных ударов возникает при ведении горных работ на расстоянии до 50 м от участка массива с установленным уровнем «удароопасно». Причем, в результате изменений напряженного состояния участка, массив из категории «неопасно» может перейти в уровень «удароопасно». Такие ситуации возникают при попадании выработок в зону опорного давления от фронта очистных работ после проведения массовых взрывов.

Величина  $\rho$  определяется по формуле  $\rho = K \cdot \Delta V / I$ , где K – коэффициент, учитывающий влияние выработки и геометрические размеры установки;  $\Delta V$  – измеряемая разность потенциалов между электродами MN; I – ток, измеряемый между питающими электродами AB.

Наиболее оптимальные расстояния между питающими и измерительными электродами для получения более полных сведений о состоянии массива в зоне опорного давления, а также соответствующий им коэффициент К для различных параметров выработок, даны в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Рекомендуемые разносы при ПЭЗ и коэффициент К, учитывающий влияние размеров выработки и геометрически размеры

установки

j - I - I - Dhill									
АВ/2,м	MN/2,м	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	
0,5	0,2	1,54	1,54	1,52	1,5	1,48	1,48	1,48	
0,7	0,2	3,53	3,53	3,29	3,25	3,21	3,21	3,18	
1	0,2	7,8	7,57	7,04	7,04	6,96	6,96	6,96	
1,2	0,2	11,7	11,2	11	10,2	10,2	10,2	10,2	
1,5	0,2	19	18,2	17,6	17,3	17,3	16,1	16,1	
2	0,2	40,2	34,5	33,3	32,3	32	31,4	29,2	
2,5	0,2	74,5	59,9	53,6	52,1	50,6	50,2	48,7	
3	0,2	116,3	102,2	86,7	77,5	75,4	74	71,9	
4	0,2	222,5	206,2	187,5	160	143,7	137,5	132,5	
5	0,2	368	343	323	300	265	241	216	
6	0,2	550	522	488	465	437	409	338	
7	0,2	760	730	699	661	634	599	518	
9	0,2	1270	1251	1213	1175	1118	1080	1003	
11	0,2	1000	1891	1872	1824	1767	1710	1606	
13	0,2	2652	2652	2639	2599	2546	2480	2346	
13	0,4	1326	1326	1319	1299	1273	1240	1173	
15	0,2	3530	3530	3530	3495	3460	3389	3265	
15	0,4	1765	1765	1765	1746	1729	1693	1632	
17	0,4	2268	2268	2268	2268	2245	2222	2155	
19	0,4	2832	2832	2832	2832	2818	2789	2704	
22	0,4	3798	3798	3798	3798	3798	3798	3741	
25	0,4	4904	4904	4904	4904	4904	4904	4855	
30	0,4	7064	7064	7064	7064	7064	7064	7064	

Четырёхэлектродный зонд монтируется по схеме A 0,37 M 0,06 N 0,37 В или A 0,3 M 0,2 N 0,3 В в зависимости от свойств горных пород; соответственно K=16,65 и 4,72.

Методика наблюдений с помощью ПЭЗ для оценки степени удароопасности массива заключается в следующем. Для выявления удароопасных участков в зоне влияния очистных работ на протяжении 100 и более метров от зоны обрушения производят по профильным линиям определение значений удельного электрического сопротивления до начала ведения очистных работ, как на уровне горизонта подсечки, так и на буровом горизонте, при условии отработки разрезного блока. Такие наблюдения выполняют также до начала проведения технологических операций по образованию подсечки, отрезной щели, массового взрыва. Первый замер

обозначается через  $\rho_{ih}$  и является базовым замером исходного напряжённого состояния.

После, проведения какой-либо из перечисленных технологических операций замер повторяется в **тех же самых пунктах и точках установки электродов**. При этом должно быть соблюдено полное совпадение установки измерительных электродов.

Разность измеренных значений, отнесенная к базовой из измеренных величин, отражает истинный характер изменения напряженного состояния на участках, где горные породы обладают существенным различием электрических свойств в пределах профиля.

По электрометрическим станциям изменение уровня напряженного состояния участков массива определяют по разности измеренных значений, отнесенных к измеренной начальной величине  $\rho_{ih}$  по формуле [72]

$$\rho_i - \rho_{iH} \mid /\rho_{iH}$$
,

где ρ<sub>iн</sub> – значения первоначального замера, который рекомендуется выполнять в период минимума сейсмической активности; ρ<sub>i</sub> – значение второго и последующего замеров. Затем производится расчет показателя удароопасности по формуле (4.3).

При этом значение **P~0,1** соответствует границе влияния производственных процессов; при значении показателя менее **0,3** массив **разгружен**; при значении показателя удароопаснсти **0,5** и более массив опасен по горным ударам; при значении показателя более **8–10** произошла потеря несущей способности и устойчивости части массива. Положение удароопасного участка определяется по глубине зондирования в зависимости от значений параметра вероятности.

Единичные измерения ПЭЗ, проведенные в однородном массиве, соответствуют характеру изменения напряженного состояния в пределах исследуемого региона. Участки, на которых отмечено монотонное

уменьшение УЭС, либо увеличение р для данной разновидности пород, должны периодически проверяться.

Для оценки степени удароопасности необходимо знать такие параметры, как величина удельного электрического сопротивления пород нетронутого массива р<sub>ін</sub>. Значения р<sub>ін</sub> определяются из кривой ПЭЗ. Определить р<sub>ін</sub> можно либо по электрокаротажным диаграммам на данном участке массива, либо по кривой ПЭЗ на глубине свыше 7 м. (вне зоны влияния очистных выработок). При этом величину р<sub>ін</sub> рекомендуется определять в период минимума сейсмической активности массива.

При установлении категории «ударопасно» в одном из направлений выработка приводится в неудароопасное состояние. В выработках, проводимых на капитальных и подготовительных работах, где прогноз осуществляется по передовой скважине, необходимо знать ориентировку главных напряжений. Для этих целей должно выполняться азимутальное подземное электрическое зондирование (АПЭЗ), которое позволит узнать ориентировку главных напряжений и если измерительные и генераторные электроды не совпадают с направлением, то в результаты скважинных измерений вводятся поправочные коэффициенты.

Если выработка проводится вдоль направления действия главных напряжений, то каротаж по передовой скважине дает правильное представление об уровне напряженного состояния и степени удароопасности. Однако если выработка меняет направление на 90° или приближается по нормали к району крупного тектонического нарушения (район рудных тел), то наряду со скважинным каротажем необходимо выполнять азимутальные зондирования по забою. Если значения р в плоскости забоя (как правило, это горизонтальное направление) существенно ниже аналогичных каротажных значений по глубине зондирования, то определяется отношение  $K_1 = \rho_{a_{\Pi 33}}$  / р<sub>каротаж</sub> для интервалов 0,5; 0,7; 1,0; 1,2; 1,5 м. и т. д., а затем рассчитывается среднее значение поправочного коэффициента К<sub>1</sub> как отношение полученной суммы к их общему количеству.

Так, для сиенитов и скарнов эмпирически полученные коэффициенты равны соответственно 0,2–0,25 и 0,31–0,35. Такие поправочные коэффициенты должны определяться для всех разновидностей удароопасных пород, в том числе и для магнетитовой руды.

Результаты каротажных измерений умножаются на поправочный коэффициент и только по расчетным значениям можно осуществлять прогноз степени удароопасности.

Для осуществления надёжного и качественного прогноза необходимо измерительные и генераторные электроды располагать в направлении действия главных напряжений. Если это условие невыполнимо, то в результаты наблюдений необходимо ввести поправочные коэффициенты.

После осуществления мероприятий по приведению выработок в неудароопасное состояние производится оценка их эффективности. Повторные измерения выполняются в тех же пунктах наблюдения, где была зафиксирована категория «удароопасно». Если результаты замеров показывают категорию «неопасно», то необходимость в применении мероприятий отпадает.

Сущность методики определения направления действия главных напряжений посредством АПЭЗ состоит в том, что электроды измерительной аппаратуры размещают на забое, стенке, кровле или почве выработки и производят определение значений р в трех взаимно перпендикулярных плоскостях посредством ПЭЗ в нескольких направлениях в одной плоскости (например, через 45, 30, 15° и менее) с центром расположения измерительных и генераторных электродов в одной точке.

По полученным значениям с учётом коэффициента анизотропии выполняют построение полярных диаграмм в измеренных плоскостях, в которых малая (для Горной Шории) или большая ось эллипса (в зависимости от свойств горных пород) соответствует максимальным или минимальным напряжениям в данной плоскости. Построение диаграмм осуществляется путем проведения из центра измерительной установки расходящихся лучей,

отвечающих линии расположения электродов, с последующим откладыванием в определенном масштабе полученных значений р относительно центра всей установки.

Определение значений р для получения коэффициента анизотропии производят в разгруженном массиве или в зоне разгрузки от выработки на малых разносах генераторных электродов, размещаемых на одной линии с измерительными, либо с помощью микроустановки. Зона разгрузки определяется по кривой ПЭЗ.

Необходимо еще раз отметить, что надежный прогноз методом электрометрии, может быть достигнут лишь при расположении измерительных и генераторных электродов в направлении действия главных напряжений.

#### Выводы и третье научное положение

1. Методом электропрофилирования выработок (ПЭП) вмещающего массива контролируется региональная напряжённость массива, определяются пригруженные участки (блоки) массива, в пределах которых необходимо проведение работ по локальному прогнозу удароопасности. Наблюдения методом ПЭП проводятся в квершлагах, подводящих к рудным телам, и в полевых штреках на всех эксплуатируемых и вновь вскрываемых горизонтах.

2. При контроле региональной напряженности массива проводятся повторные измерения в одних и тех же точках массива и при закономерном электросопротивления росте В рудных телах уменьшении И породах электросопротивления BO вмещающих участок считается необходим участке локальный напряженным И прогноз на ЭТОМ удароопасности.

3. За критерий удароопасности руд и пород может приниматься показатель, определяемый как отношение изменения удельного электросопротивления массива в одних и тех же точках по сравнению с

начальным электросопротивлением в неудароопасном состоянии к критическому изменению удельного электросопротивления данных участков в предразрушенном состоянии, определяемым предварительно. При вероятности 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при вероятности ниже 0,5 – «неопасно».

4. Далее, после выполнения мероприятий проводится оценка их эффективности. Повторные измерения выполняются в тех же пунктах наблюдения, где была зафиксирована категория «удароопасно». Если результаты замеров показывают категорию «неопасно», то необходимость в применении мероприятий отпадает.

На основании вышеизложенного, сформулировано третье научное положение.

Критерием удароопасности руд и пород может служить показатель, определяемый как отношение изменения удельного электросопротивления В же точках сравнению массива одних И тех ПО С начальным электросопротивлением неудароопасном В состоянии К начальному электросопротивлению И критическому изменению удельного электросопротивления данных участков в предразрушенном состоянии, определяемому предварительно. При значении показателя 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при значении ниже 0.5 -«неопасно».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи по совершенствованию прогноза удароопасности электрометрического метода железорудных месторождений, основанного на кинетической концепции подготовки горных ударов, включающей двухстадийную модель накопления трещин и их влияния на изменение удельного электросопротивления вмещающих пород высокого сопротивления и рудных тел, закономерности изменения электросопротивления пород и руд в напряженных зонах месторождений и методику прогноза удароопасности, позволяющей существенно повысить точность прогноза, безопасность ведения горных работ на железорудных месторождениях России и имеющей существенное значение в области наук о земле.

Основные научные результаты и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Лабораторные исследования изменений кажущегося удельного электрического сопротивления (КУЭС) рудных тел и вмещающих пород Таштагольского месторождения позволили установить, что с ростом напряжений на образцах и накоплении трещин КУЭС рудных тел растет и его изменение достигает 40 % в предразрушенном состоянии за счет критического накопления трещин. Электросопротивление вмещающих пород падает, что обусловлено множественным накоплением заряженных точечных дефектов структуры в поле механических напряжений трещин, и его изменение достигает 15-42 % в зависимости от минерального состава, содержания кварца В этих породах И отношения удельных электросопротивлений вблизи поверхности трещин и на удалении от этой поверхности.

2. Проверка разработанных критериев удароопасности в условиях Таштагольского рудника показала, что в соответствии с установленными теоретически и в лабораторном эксперименте закономерностями,

непосредственно перед горными ударами и толчками наблюдается закономерное падение УЭС вмещающих пород вплоть до критических значений и рост УЭС при измерениях в рудных телах.

3. Научными исследованиями в условиях Таштагольского железорудного месторождения установлены критические значения изменений удельного электросопротивления вмещающих пород и рудных тел:

 в порфиритах, скарнах, сиенитах, сланцах, диоритах и других вмещающих породах высокого электросопротивления непосредственно перед горным ударом или толчком наблюдается изменение УЭС на 27–37 % в зависимости от минерального состава пород;

в рудных телах критическое изменение удельного
 электросопротивления перед горным ударом или толчком составляет с
 учетом стандартной ошибки среднего примерно 40 %.

4. За критерий удароопасности для электрометрического метода прогноза может быть принят показатель удароопасности как отношение изменения электросопротивления, получаемое в одних и тех же точках профиля по сравнению с начальным электросопротивлением данных участков при неудароопасном состоянии, К начальному электросопротивлению критическому изменению И ЭТОГО электросопротивления в предразрушенном состоянии, определяемому по таблице для разных пород и рудных тел. При вероятности 0,5 и выше устанавливается категория «удароопасно», при вероятности ниже 0,5 -«неопасно».

После осуществления мероприятий по приведению выработок в неудароопасное состояние производится оценка ИХ эффективности. Повторные измерения выполняются в тех же пунктах наблюдения, где была зафиксирована Если категория «удароопасно». результаты замеров показывают категорию «неопасно», то необходимость в применении мероприятий отпадает.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проект вскрытия и отработки запасов руды Таштагольского месторождения до горизонта –350 м для поддержания мощности 3,0 млн т. сырой руды в год. – Новокузнецк: ОАО Сибгипроруда, 1997. – Т. I–VII.

 Петухов И.М. Горные удары на угольных шахтах. – М.: Недра, 1972. – 229 с.

3. Положение безопасному работ ПО ведению горных на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам: федеральные нормы и правила В области промышленной безопасности: приказ федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору N 576 от 2 декабря 2013 года. Доступ из справ.-правовой системы «Техэскперт».

4. Лазаревич Л.М., Егоров П.В., Ардашев Н.Н., Коваленко В.А. Опыт разработки месторождений на рудниках Горной Шории // Безопасность труда в промышленности. – 1979. – № 7. – С. 35–38.

Кручинин В.А., Егоров Б.Ф. Отработка Таштагольского месторождения в сложных горногеологических условиях // Горный журнал. – 1981. – № 8. – С. 13–15.

6. Бич Я.А. Горные удары и методы их прогноза. – М.: Недра, 1972. – 100 с.

7. Влох Н.П., Липин Я.И. Влияние остаточных напряжений на результаты измерений методами разгрузки // Физико-технологические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1977. – JS. – С.122–130.

8. Егоров П.В., Шаманская А.Т. Естественное поле напряжений массива пород Горной Шории // Измерение напряжений в массиве горных пород. Материалы III семинара. – Новосибирск, 1972. – С. 140–143.

9. Влох Н.П., Зубков А.В., Леликов В.П. Определение напряжений в днище при системах этажного обрушения с отбойкой руды на зажатую

среду // Физико-технологические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1980. – № 5. – С. 83–89.

10. Исаев А.В. Разработка метода оценки напряженного состояния удароопасных пород по дискованию керна и выходу буровой мелочи: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Исаев А.В. – Л.: ВНИМИ, 1983. –18 с.

Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных и опасных по горным ударам // Изд-во ВостНИГРИ. – Новокузнецк: 2001. – 55 с.

12. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях горной Шории, склонных и опасных по горным ударам // Новосибирск – Новокузнецк, 2015. – 72 с.

Reid H.F. The California earthquake of April 18, 1906. –The CIW. –
 1910. – Vol. 2. – 192 p.

14. Benioff H. Earthquakes and rock creep // Bull. Seismol. Soc. America. – 1951. – V. 41. – No. 1. P. 31–62.

15. Сирота Д.Ю. Совершенствование геоэлектрического метода прогноза зон концентрации напряжений и разрушения угольных пластов по измерениям поля на земной поверхности: дис. ... канд. техн. наук / Сирота Д.Ю. – Кемерово: КузГТУ, 2010. – 153 с.

16. Bullen K.E. On strain energy and strength in the Earth's upper mantle // Trans. Amer. Geophys. – Union, 1953. – Vol. 34. – No. 1. – P. 107–109.

17. Bath M., Benioff H. The aftershock sequence of the Kamchatka earthquake of Nov. 4 1952 // Bull. Seismol. Soc. America. – 1958. – Vol. 48. – No. 1. P. 1–15.

18. Bath M., Duda S. Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation and related quantities // Ann.geofis. – 1964. – Vol. 17. – No. 3. – P. 353–368.

19. Еременко В.А. Обоснование параметров геотехнологии освоения удароопасных железорудных месторождений Западной Сибири: дис. ... доктора технических наук / Еременко В.А. – Новосибирск, 2011. – 333 с.
20. Гольдин С.В., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Козлова М.П. Оценка параметров очага готовящегося сейсмического события по данным о деформациях свободной поверхности // ФТПРПИ. – 2007. – № 3. – С. 25–35.

21. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясения // Физика очага землетрясений. – М.: Наука. – 1975. – С. 104–117.

22. Куксенко В.С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности. – Л.: Наука. – 1986. – С. 36–41.

23. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А., Савельев В.Н. О прогнозировании разрушения горных пород // Изв. АН СССР. Физика Земли.– 1977. –№ 6. – С. 11–18.

24. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // ДАН СССР. – 1981. – Т. 259. – № 6. – С. 1350–1353.

25. Scholz C.H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting. – Cambridge University Press, 2002. – 471 p.

26. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: ИФЗ АН СССР, 1991. – 217 с.

27. Гор А.Ю., Куксенко В.С., Томилин Н.Г. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов // ФТПРПИ. – 1989. – № 3. – С. 54–60.

28. Тарасов Б.Г., Дырдин В.В., Иванов В.В., Фокин А.Н. Физический контроль массивов горных пород. – М.: Недра, 1994. – 238 с.

29. Иванов В.В., Егоров П.В., Пимонов А.Г. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений // ФТПРПИ. – 1990. – № 4. – С. 59 – 65.

30. Иванов В.В., Егоров П.В., Пимонов А.Г. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных

породах и задача прогнозирования динамических явлений // ФТПРПИ. – 1990. – № 4. – С.59–65.

31. Иванов В.В. Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разрушения в массиве горных пород: дис. докт. техн. наук / В.В. Иванов. – Кемерово, 1994. – 366 с.

32. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука. – 2003. – 281 с.

33. Ваганова В.А. Разработка и обоснование комплексной системы прогноза горных ударов (на примере Таштаг. железоруд. месторождения): дис. ... канд. техн. наук в виде науч. докл. / Ваганова В.А. – Кемерово, 1998. – 26 с.

34. Егоров П.В., Иванов В.В., Коваленко В.А. Справочное пособие для служб прогноза и предотвращения горных ударов на шахтах и рудниках. – Кемерово, 2000. – 294 с.

35. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Янланский А.А. Глушко Геофизические методы контроля в угольных шахтах и тоннелях. – М.: Недра, 1987. – 224 с.

36. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства. – М.: Недра, 1988. – 446 с.

37. Кузнецов Г.Н., Слободов М.А. Определение методом разгрузки напряжений, действующих в междукамерных целиках каменной соли Артемовских рудников // В кн. «Исследования по вопросам горного и маркшейдерского дела». – Труды ВНИМИ. – 1950. – Вып. 22. – С. 32–39.

38. Нестеренко Г.Т., Барковский В.М., Черников А.К. Исследование метода разгрузки для определения напряженного состояния массива горных пород // В кн. «Измерение напряжений в массиве горных пород». – Новосибирск, 1970. – С. 15–23.

39. Hast N. The measurement of rock pressure in mines. – Sver geol. unders. – 1958. – Vol. 52. – No 3. - P. 183.

40. Leeman E.R. The borehole deformation type of rock stress measuring instrument. – Int. J. Rock. Mech. and Mining Sci. – 1967. – Vol. 4. – P. 23–44.

41. Курленя М.В., Устюгов М.Б. К вопросу определения напряжений
в осадочных горных породах методом буровых скважин // ФТПРПИ. –
1968. – № 6. – С. 3–7.

42. Лукьянов К.В., Федосов А.А. Изучение напряженного состояния угольных целиков методом буровых скважин // В кн. «Измерение напряжений в массиве горных пород». – Новосибирск, 1970. – С. 170–174.

43. Мячкин В.И. Ультразвуковые исследования напряженного состояния и свойств горных пород в массиве: дис. ... канд. технических наук / Мячкин В.И. – М.: 1965. – 225 с.

44. Ватолин Е.С., Бородин В.П., Помашев О.П. Изучение
взаимосвязи акустических и прочностных свойств песчаников
Карагандинского бассейна // ФТПРПИ. – 1972. – № 3. – С. 94–97.

45. Ватолин Е.С., Бородин В.П. Статистические связи скорости продольных волн с некоторыми прочностными свойствами горных пород // Науч. сообщ. Ин-та горного дела им. А. А. Скочинского. – 1972. – Вып. 96. – С. 15–19.

46. Тарасов Б.Г. Применение метода электрометрии для контроля за состоянием горных выработок в условиях рудника «Октябрьский» // В сб. «Вопросы рудничной аэрологии». – 1976. – Вып. 4. – С. 250–257.

47. Тарасов Б.Г., Дырдин В.В., Иванов В.В. Геоэлектрический контроль состояния массивов. – М.: Недра. – 1983. – 216 с.

48. Uyeshima M., Kinoshita M., Iino H., Uyeda S. Earthquake prediction research by means of telluric potential monitoring // Bulletin of the earthquake research institute university of Tokyo. – 1989. – Vol. 64. – P. 487–515.

49. Gousheva M., Danov D., Matova M. Ionospheric quasi-static electric field anomalies during seismic activity in August–September 1981 // NHESS. – 2009. – No. 9. – P. 3–15.

50. Teisseyre R Generation of electric field in an earthquake preparation zone // Annals of geophysics. – 1997. – Vol. XL. – No. 2. – P. 297–304.

51. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Гершензон Н.И., Пилипенко В.А. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры // Изв. АН СССР Физика Земли. – 1985. – № 1. – С. 72–87.

52. Курленя М.В., Вострецов А.Г О прогнозе разрушения горных пород на основе регистрации импульсов электромагнитного излучения // ФТПРПИ. – 2001. – № 3. – С. 41–52.

53. Пимонов А.Г. Статистическое моделирование и прогноз разрушения горных пород в очагах горных ударов: дис. ... доктора техн. наук / А. Г. Пимонов. – Кемерово, 1997 – 312 с.

54. Пимонов А.Г., Егоров П.В., Иванов В.В. Статистическое моделирование и прогноз разрушения горных пород в очагах горных ударов – Кемерово, 1997. – 178 с.

55. Гор А.Ю., Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Фролов Д.И.
Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов //
ФТПРПИ. – 1989. – № 3. – С. 54–60.

56. Касахара К. Механика землетрясений. – М.: Мир. – 1985. – 264 с.

57. Пимонов А.Г. Применение технологии автоматизированных баз данных для хранения и статистической обработки сейсмической информации // Информационные технологии в горной промышленности. – Кемерово, 1996. – С. 87–91.

58. Хямяляйнен В.А., Иванов В.В., Дудко К.Л., Шиканов А.И. Прогноз геодинамических проявлений горного давления в тектонических блоках шахтного поля // Известия высших учебных заведений. – Горный журнал. – 2013. – № 5. – С. 16–21.

59. Троллоп Г.Х., Бок Х., Бест Б.С. Введение в механику скальных пород // М: Мир. – 1983. – 276 с.

60. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. М.: Наука. – 1972. – 280 с.

61. Головин Ю.И., Шибков А.А. Быстропротекающие электрические процессы и динамика дислокаций в пластически деформируемых щелочногалоидных кристаллах // ФТТ. – 1986. – Т. 28. – Вып. II. – С. 3492–3500.

62. Иванов В.В., Хямяляйнен В.А., Пашин Д.С. Количественная оценка степени удароопасности массивов горных пород при разработке рудных месторождений электрометрическим методом на основе кинетических представлений о подготовке горных ударов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 4. – С. 195–200.

63. Иванов В.В., Пашин Д.С. Исследование удельного электрического сопротивления вмещающих пород и руд Таштагольского рудника в предразрушенном состоянии с целью разработки нового метода прогноза горных ударов // Сборник материалов XVI международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы сибири. Сибресурс – 2016». – 2016. – С. 178.

B.B. 64. Парамонов A.H., Иванов Изменение удельного электросопротивления горных месторождений пород рудных В предразрушающем состоянии // Сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава университета по результатам IV Всероссийской, 57 Научно-Практической конференции молодых ученых «Россия Молодая». – 2012. – С. 120–122.

Иванов В.В., Ли К.Х. Количественный прогноз удароопасности 65. вмещающих пород и руд Таштагольского месторождения на основе измерений электросопротивления удельного пород В состоянии предразрушения перед динамическими проявлениями горного давления // безопасности работ Вестник научного центра В угольной ПО промышленности. – 2018. – № 3. – С. 20–33.

66. Ли К.Х.. C.B. Родионов A.A., Сороковых Метод электротомографии как способ определения выбросоопасных зон угольных нарушений Сборник пластов геологических материалов XII И

Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с Международным участием. – Кемерово, 2020. – С. 10704.1.

67. Иванов В.В., Соболев В.В., Лудзиш В.С., Дягилева А.В., Ли К.Х Расчет коэффициента поправочного В кажущееся удельное электросопротивление выбросоопасного массива горных пород при электрическом зондировании подготовительной массива с контура выработки с металлической крепью // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 4. – С. 32–35.

68. Иванов В.В., Семенцов В.В., Ли К.Х. Определение удельного давления на крепь с учетом зоны разрушения пород вокруг подготовительной выработки // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2019. – № 1. – С. 18–21.

69. Иванов В.В., Семенцов В.В., Зыков В.С. Потапов П.В, Ли К.Х. Определение дополнительных тектонических горизонтальных напряжений вблизи разломов и нарушений в земной коре на основе теории разломообразования Андерсона // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2019. – № 2.– С. 6–9.

70. Григорян С.С. О механизме возникновения землетрясений и содержании эмпирических закономерностей сейсмологии // ДАН СССР. – М.: 1988.– Т. 299. – Вып. 5. – С. 1083–1087.

71. Патент 2722172 Российская Федерация, МПК Е21С 39/00(2006.01). Способ диполь – дипольного электропрофилирования угленосного массива горных пород для прогноза участков неоднородности угольного пласта / Родионов А.А., Потапов П.В., Сороковых С.В., Ли К.Х., Щенев А.В.; патентообладатель АО «НЦ ВостНИИ». – № 2019105170; заявл. 25.02.2019; опубл. 28.05.2020. – Бюл. № 16 (1 ч.)

72. Ли К.Х. Разработка методики электрометрического прогноза удароопасности железорудных месторождений на основе кинетической концепции подготовки горных ударов // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2020. – № 2. – С.59–66.

73. Влох Н.П. Управление горным давлением в крепких породах на основе исследования закономерностей формирования их напряженного состояния: автореферат дис. ... докт. техн. наук. – Л.: ЛГИ им. Плеханова, 1973. – 45 с.

74. Algermissen S., Perkins D.A. probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States. – U.S. Geological Survey, Open-File Report. – 1976. – No. 76. – 416 p.

75. Artificial Neural Networks: Concepts and Theory. – IEEE Computer Society Press, 1992. 667 p.

76. Bender B., Perkins D. SEISRISK III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation. – USGS Bulletin. – 1987. – No. 1772. 48 p.

77. Beresnev I.A., Atkinson G.M. FINSIM – a FORTRAN Program for Simulating Stochastic Acceleration Time Histories from Finite Faults, Seismol. // Research Letters. – 1998. – Vol. 69. – No. 1. – P. 27–32.

78. Blake A. On the estimation of focal depth from macroseismic data //
Bull. Seism. Soc. Am. – 1941. – No. 31. – P. 225–231.

79. Boore D.M. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // PAGEOPH. – 2003. – No. 160. – P. 635–676.

80. Lo'pez Casado C., Molina Palacios S., Delgado J., Pela'ez J.A. Attenuation of Intensity with Epicentral Distance in the Iberian Peninsula // Bull. Seism. Soc. Am. – 2000. – Vol. 90. –No. 1. – P. 34–47.

81. Donald L. Wells, Kevin J. Coppersmith New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement // Bull. Seism. Soc. Am. – 1994. – Vol. 84. – No. 4. – P. 974–1002.

82. Emanov A.F., Emanov A.A., Filina A.G. Realized seismic energy correlation of the different structures // 25th General Assembly European Geophysical Society, Nice, France (April 25, 2000), Geophysical Research AbstractsKatlenburg. – Lindau: European Geophysical Society, 2000. – Vol. 2.

83. Fisk M.D., Gray H.L., McCartor G.D. Regional Event Discrimination Without Transporting Thresholds // BSSA. – 1996. – Vol. 86. – No. 5. – P. 1545– 1588.

84. Gardner K. J., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, poisoning // Bull. Seism. Soc. Am. – 1974 – Vol. 64. – No. 5. – P. 1363–1367.

85. Geiger L., Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only // Bulletin of St. Louis University. -1912. - Vol. 8. - No. 1. - P. 56–71.

86. Grunthal G. The up-dated earthquake catalogue for the German democratic Republic and adjacent areas – statistical data characteristics and conclusions for hazard assessment // Proc. 3rd Int. Symp. on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk. Liblice Castle. – 1985.

87. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration // Bull. Seism. Soc. Am. – 1942. – Vol. 32. – P. 163–191.

88. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration // Bull. Seism. Soc. Am. – 1956. – Vol. 46. – P. 105–145.

89. Hanks T.C., Wyss M. The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters // BSSA. – 1972. – Vol. 62. – No. 2. P. 561-589.

90. Hartse H.E., Taylor S.R., Scott P.W., Randall G.E. A Preliminary Study of Regional Seismic Discrimination in Central Asia with Emphases on Western China // BSSA. – 1997. – Vol. 87. – No. 3. – P. 551–568.

91. Hendrix M.S., Graham S.A., Amory J.Y., Badarch G. Noyon Uul syncline, southern Mongolia: Lower Mesozoic sedimentary record of the tectonic amalgamation of central Asia// Geol Soc Amer Bull. – 1996. – Vol. 10.

92. Janez Lapajne, Barbara S. Motnikar, Polona Zupancic Probabilistic Seismic Hazard Assessment Methodology for Distributed Seismicity // Bull. Seism. Soc. Am. – 2003. – Vol. 93. – No. 6. – P. 2502–2515.

93. Jones E.M., Taylor S.R. Are Lg-Spectra from NTS Explosion Self-Similar? // BSSA. – 1996. – Vol. 86. – No. 2. – P. 445–456.

94. Joyner W.B., Chen T.F. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes // Bull. Seism. Soc. Am. – 1975. – Vol. 65. – No. 5. – P. 1315–1336.

95. Joyner W.B., D.M. Boore Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake // Bull. Seism. Soc. Am. – 1981. – Vol. 71. – P. 2011–2038.

96. Julio Garcıa, Dario Slejko, Leonardo Alvarez, Laura Peruzza, Alessandro Rebez Seismic Hazard Maps for Cuba and Surrounding Areas // Bull. Seism. Soc. Am. – 2003. – Vol. 93. – No. 6. P. 2563–2590.

97. Kim W.-Y., Aharonian V., Lerner-Lam A.L., Richards P.G. Discrimination of earthquakes and Explosions in Southern Russia Using Regional High-Frequency Three-Component Data from the IRIS/JSP Caucasus Network // BSSA. – 1997. – Vol. 87. – No. 3. – P. 569–588.

98. Klein F.W. User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes // U.S. Geol. Surv. – 2002. – http://geopubs.wr.usgs.gov/open-file/of 02-171/.

99. McGuire R. EQRISK Fortran computer program for seismic risk analysis // U.S. Geological Survey, Open-File Report. – 1976. – P. 76–67.

100. Molnar P., Tapponier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // Science. – 1975. – Vol. 189. – No. 4201. – P. 419–426.

101. Musil M., Plesinger A. Discrimination Between Local Microearthquakes and Quarry Blasts by Multi-Layer Perceptrons and Kohonen Maps // BSSA. – 1996. – Vol. 86. – No. 4. – P. 1077–1090.

102. Musson R.M.W.: Probabilistic seismic hazard maps for the North Balkan Region // Annali di Geofisica 42. – 1999. – No. 6. – P. 1109–1138.

103. Pal S.K., Mitra S. Multilayer Perceptron, Fuzzy Sets, and Classification // IEEE Transactions on Neural Networks. -1992. - Vol. 3. - No. 5. - P. 683–696.

104. Pavlenko O.V., Irikura K. Estimation of nonlinear time-dependent soil behavior in strong ground motion based on vertical array data // Pure and Applied Geophysics. – 2003. – No. 160. – P. 2365–2379.

105. Reasenberg P.A., Oppenheimer D. FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions // U.S. Geol. Serv. – 1985. – No. 85. – P. 739.

106. Slejko D., Peruzza L., Rebez A. Seismic hazard maps of Italy // Ann. Geofis. – 1998. – No. 41. P. 183–214.

107. Slejko D., Camassi R., Cecic I., Herak D., Herak M., Kociu S., Kouskouna V., Lapajne J., Makropoulos K., Meletti C., Muco B., Papaioannou C., Peruzza L., Rebez A., Scandone P., Sulstarova E., Voulgaris N., Zivcic M., Zupancic P. // Seismic hazard assessment for Adria, Ann. Geofis. – 1999. – No. 42. P. 1085–1107.

108. Stepp J.C. Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard // Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonazion. – 1972. – Vol. 2. – P. 897–910.

109. Tapponier P., Molnar P., Active faulting and Cenozoic tectonics on the Tien- Shan, Mongolia and Baikal region. // J. Geophys. Res. – 1979. – Vol. 84. – No. 7. – P. 3425–3459.

110. Taylor S.R. False Alarms and Mining Seismicity. An Example from the Gentry Mounting Mining Region, Utah // BSSA. – 1994. – Vol. 84. – No. 2. – P. 350–358.

111. Taylor S.R., Sherman N.W., Denny M.D. Spectral Discrimination between NTS Explosions and Western United States Earthquakes at Regional Distances // BSSA. – 1988. – Vol. 78. – No. 4. – P. 1563–1579.

112. Tribolet J.M. Application of Homomorphical Signal Processing in Seismic. 1979.

113. Trifunac M. D., Brady A.G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of ground motion records // Bull. Seism. Soc. Am. -1975. - Vol. 65. - P. 139–162.

114. Wells L., Coppersmith K.J. New empirical relations among magnitude, rupture length, rupture area and surface displacement. // Seism. Soc. of Am. Bull. – 1994. – No. 84. – P. 974–1002.

115. Woods B.B., Helmberger D.V. Regional seismic discriminants using Wave- Train Energy Ratio // BSSA. – 1997. – Vol. 87. – No. 3. – P. 589–605.