Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

БЕСПАЛЬКО АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО– ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Специальность: 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,

веществ, материалов и изделий»

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

> Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор Суржиков Анатолий Петрович

ТОМСК – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
Глава 1.	Анализ состояния изученности электромагнитной эмиссии диэлектрических твердотельных материалов и горных пород. Постановка задач исследований.
1.1.	О механизмах генерирования электромагнитных сигналов диэлектрическими твердотельными материалами и горными породами
1.2.	Анализ моделей генерации электромагнитного сигнала
1.2.1.	Дислокационная и электронная модели генерации электромагнитных сигналов
1.2.2.	Разрядная модель генерации электромагнитных сигналов
1.2.3.	Модель генерации электромагнитных сигналов движущейся вершиной
	трещины
1.2.4.	Модель генерации электромагнитных сигналов при колебании плоскостей
	трещин (модель «конденсатора»)
1.3.	Закономерности изменения параметров электромагнитных сигналов
1.4.	О механизмах разрушения горных пород
1.5.	Связь характеристик акустической и электромагнитной эмиссий при
	механическом воздействии
1.6.	Об использовании метода инфракрасной радиометрии
1.7.	Постановка задачи исследования
Глава 2.	Горно – геологическая характеристика Таштагольского железорудного
	месторождения
2.1.	Описание железорудного Таштагольского месторождения и характеристика
	тектонических нарушений
2.2.	Гидрогеологическая характеристика месторождения
2.3.	Физико-механические свойства пород и руд Таштагольского
	месторождения
2.4.	Условия формирования горного удара
2.5.	Электрические и магнитные свойства горных пород Таштагольского
	железорудного месторождения

	натурных условиях
3.1.	Применяемые методы исследования
3.2.	Методы и аппаратура исследования параметров электромагнитных сигналов
	в лабораторных экспериментах
3.2.1.	Стенд для исследования электромагнитной активности образцов горных
	пород при акустическом возбуждении
3.2.2.	Схемы электромагнитного приемника и повторителя напряжения
3.2.3.	Возбуждение акустических импульсов ударом шарика
3.2.4.	Стенд для комплексных исследований параметров электромагнитных
	сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии при развитии процесса
	разрушения образцов горных пород
3.3.	Методика и аппаратура для измерения процессов инфракрасного свечения
	отверстий в горных породах
3.4.	Методика и аппаратура для измерения субмикронных частиц при
	деформировании горных пород до разрушения
3.5.	Метод и применяемая аппаратура для измерения поверхностного
	заряда
3.6.	Автономные регистраторы электромагнитных и акустических сигналов для
	исследования электромагнитной и акустической эмиссий в лабораторных
	экспериментах и в натурных условиях рудных месторождений
3.6.1.	Развитие регистраторов электромагнитных сигналов
3.6.2.	Автономный регистратор электромагнитных и акустических сигналов
	РЭМС1
3.6.2.1.	Основные принципы построения аппаратно-программного регистратора
	РЭМС1
3.6.2.2.	Датчики, используемые в регистраторе
3.6.2.3.	Функциональная схема регистратора РЭМС1
3.6.2.4.	Порядок работы и назначение элементов блока сбора информации
	БИС
3.6.2.5.	Технические характеристики аппаратно-программного регистратора
	РЭМС1
3.6.3.	Автономный регистратор электромагнитных и акустических сигналов
	РЭМАС1
3.6.3.1.	Состав амплитудно-частотного регистратора РЭМАС1

3.6.3.2.	Математическая обработка данных измерений	99
3.6.3.3.	Апробация регистратора РЭМАС1 в шахтных условиях Таштагольского	
	месторождения	101
3.7.	Общие схемы применяемых методов для исследования электромагнитной	
	эмиссии образцов гетерогенных диэлектрических материалов и горных	
	пород	105
3.8.	Выводы по главе 3	107
Глава 4.	Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитной	
	эмиссии образцов гетерогенных диэлектрических структур и горных пород	109
4.1.	Особенности поляризации некоторых минералов и горных пород	110
4.2.	Распределения зарядов на поверхности образцов горных пород	112
4.3.	Электромагнитная эмиссия поляризованных кальцитов при акустическом	
	возбуждении	121
4.4.	Влияние постоянных электрических и магнитных полей на параметры	
	электромагнитных откликов при акустическом возбуждении образцов	
	горных пород	131
4.4.1.	Влияние постоянного электрического поля на параметры электромагнитных	
	откликов при акустическом возбуждении образцов горных пород	131
4.4.2.	Закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов горных	
	пород на акустическое воздействие при увеличении постоянного магнитного	
	поля	135
4.5.	Влияние слоистости горных пород на параметры электромагнитных	
	сигналов	141
4.5.1.	Математическое моделирование влияния слоистости материала на	
	параметры электромагнитных сигналов	141
4.5.2.	Физическое моделирование влияния слоистости материалов на параметры	
	электромагнитных сигналов при акустическом воздействии	147
4.5.2.1.	Двухслойная система на примере образцов сиенита и кварца	147
4.5.2.2.	Трехслойные модельные системы со вставками, имеющими разный	
	акустический импеданс	155
4.5.2.3.	Параметры электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении	
	многослойных горных пород на примере образцов серпентинита	161
4.5.3.	Электромагнитные сигналы контакта солевых растворов с образцами горных	
	пород при акустическом возбуждении	167

4.6.	Закономерности изменения параметры электромагнитных сигналов реальных	
	образцов горных пород при акустическом возбуждении	177
4.7.	Мониторинг разрушения образцов горных пород по параметрам	
	электромагнитных сигналов	186
4.7.1.	Исследования влияние прочности образцов магнетитовой руды на параметры	
	электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении в процессе	
	одноосного сжатия	187
4.7.2.	Мониторинг разрушения образцов горных пород по параметрам и	
	характеристикам электромагнитной эмиссии	193
4.7.3.	Связь токов поляризации и электромагнитной эмиссии горных пород с их	
	электрическими и магнитными свойствами	207
4.7.4.	Отслоение микрочастиц при развитии разрушения образцов горных	
	пород	215
4.7.5.	Инфракрасное свечение при разрушении образцов горных пород	217
4.8.	Выводы по главе 4	224
Глава 5.	Экспериментальные исследования электромагнитной эмиссии массивов	
	горных пород	231
5.1.	Методы определения мест установки регистраторов электромагнитной и	
	акустической эмиссии	232
5.1.1.	Метод импульсного электромагнитного профилирования	232
5.1.2.	Инфракрасная радиометрия скважин и их окрестностей	237
5.2.	Исследования характеристик электромагнитной эмиссии до взрыва, во время	
	его проведения и в период релаксации возбужденного состояния массива	
	горных пород	245
5.3.	Сезонные исследования электромагнитной эмиссии горного массива при	
	проведении технологических взрывов	260
5.3.1.	Весенний сезон с 23.04. по 29.04.2015 года	261
5.3.2.	Летний сезон с 16.06. по 25.06.2015 года	262
5.3.3.	Осенний сезон с 26.08. по 03.09.2015 года	264
5.3.4.	Зимний сезон с 08.12. по 16.12.2015 года	265
5.4.	Связь параметров и характеристик электромагнитной эмиссии с	
	сейсмическими наблюдениями	269
5.4.1.	Распределение геодинамических событий в шахтном поле рудника после	
	массового технологического взрыва	270

5.4.2.	Амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов горных пород в	
	шахтном поле рудника после массового технологического взрыва	274
5.4.3.	Исследование связей амплитудно-частотных параметров электромагнитных	
	сигналов с сейсмическими наблюдениями разной интенсивности	278
5.5.	Моделирование медленно изменяющихся амплитудных параметров	
	электромагнитной эмиссии	288
5.6.	Выводы по главе 5	298
Глава 6.	Комплексная система мониторинга и краткосрочного прогноза изменений	
	напряженно-деформированного состояния массива горных пород по	
	параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий,	
	включая инфракрасное свечение скважин	301
6.1.	Обобщенная схема механоэлектрических преобразований в горных породах	
	на этапах подготовки разрушения	301
6.2.	Разработка макета информационной системы для контроля и прогноза	
	состояния горных массивов в процессе формирования и проявления	
	геодинамических событий	305
6.2.1.	Взаимодействие программы с регистраторами РЭМАС1 по сети передачи	
	данных	306
6.2.2.	Разработка и исследование макета информационной системы для контроля и	
	прогноза состояния горных массивов в процессе формирования и проявления	
	геодинамических событий	312
6.2.3.	Алгоритм и схема проведения мониторинга и краткосрочного прогноза	
	изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород	
	по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической	
	эмиссий, включая инфракрасное свечение скважин	317
6.3.	Определение развития деструктивных зон. Математическое моделирование	
	обнаружения предвестников разрушения горных пород на этапе принятия	
	решений диспетчером с использованием временных рядов параметров	
	электромагнитных сигналов	320
6.3.1.	Модельное представление электромагнитного сигнала. Постановка задачи	
	поиска предвестников геодинамического события	323
6.3.2.	Алгоритм выявления предвестников геодинамического события	324
7.	Заключение	332
8.	Список сокращений и условных обозначений	344

9.	Список терминов	346
10.	Список литературы	348
11.	Приложение А: Данные сейсмостанции «Таштагольская» с момента массового технологического взрыва 05 февраля 2017 года	377
12.	Приложение Б: Копии диплома, патента и свидетельств для ЭВМ – 9 шт	380
13.	Приложение В: Копии актов внедрения – 3 акта	392

введение

Актуальность темы. В горном деле величина и распределение напряженнодеформированного состояния (НДС) массива горных пород относится к основополагающим факторам, определяющим закономерности развития геомеханических процессов, таких как геодинамические явления, сдвижение и деформирование горных пород и земной поверхности в области влияния разработки месторождения [1-3]. Формирование напряженного состояния массивов (или участков земной коры) в подземных рудниках происходит в определенных тектонофизических условиях взаимодействия полезного ископаемого с вмещающими породами, физико-механические свойства которых отличны от свойств образовавшейся структуры. Проявления горного давления в динамической форме вызываются комплексным влиянием целого ряда природных и техногенных факторов, среди которых в разной степени присутствуют как способствующие, так и локализующие. Превалирующее влияние неблагоприятных факторов вызывает горные удары и другие геодинамические проявления [2-5].

Известно, что в тектонически и сейсмически активных районах Алтай-Саянской складчатой горной области ведется разработка ряда крупных железорудных месторождений: Таштагольского, Шерегешского, Казского, Тейского, Абазинского и др. При горных работах возникают катастрофические сейсмические и динамические явления в форме техногенных землетрясений, ударов горно-тектонического типа, обрушения больших масс горных пород. Крупные проявления горного давления в динамической форме периодически или спонтанно происходят на рудниках Горной Шории и Хакасии, в угольных шахтах Кемеровской области. Ситуация усугубляется тем, что по мере разработки месторождений увеличивается глубина добычи полезных ископаемых и, как следствие, увеличивается горное давление в местах проведения работ. Кроме того, в некоторых горнорудных предприятиях отработка рудных запасов осуществляется под реками и другими водоемами, что приводит к созданию в массиве зон, опасных и по изменению гидрогеологической ситуации.

Освоение глубоких горизонтов обострило проблему прогноза и предотвращения горных ударов, наносящих значительный материальный ущерб промышленным предприятиям и объектам, находящимся в зонах влияния очистных пространств. Отработка месторождений ведется в регионах с высокой плотностью населения, с развитой промышленностью и в зонах интенсивного развития туризма. В связи с этим для успешного развития горнопромышленных комплексов Сибири весьма важным является сохранение сплошности земной поверхности, недопущение ее значительных деформаций, предупреждение появления динамически опасных

зон и ограничение влияния уже имеющихся очагов возникновения сейсмических и динамических явлений.

По данным Алтай - Саянского филиала Геофизической службы СО РАН за последние 15 лет возросло количество геодинамических проявлений по мере увеличения в районах разработки и добычи полезных ископаемых. Это обстоятельство влечет за собой существенные экономические затраты на восстановление шахт и техники, а также человеческие жертвы. В большей мере геодинамические проявления обусловлены техногенной сейсмичностью, так как в шахтах и на разрезах производят массовые технологические взрывы с зарядом до 300 тонн взрывчатого вещества (ВВ) [4-10]. Крупные технологические взрывы по обрушению рудных блоков на железорудных месторождениях также сопровождаются мощными динамическими явлениями. Взрывы вызывают индуцированную и триггерную сейсмичность в зонах отработки полезных ископаемых [5-10]. Так, например, в 2017 году по данным того же филиала Геофизической службы СО РАН на территории Кемеровской области за 11 месяцев произошло 8349 сейсмических событий, в том числе произведено 7264 промышленных взрыва. По сравнению с 2016 годом это на 1080 сейсмических событий больше, а количество промышленных взрыво увеличилось на 489.

В последнее время в связи с увеличением глубины добычи руды даже меньшие по мощности технологические взрывы могут иметь неблагоприятные последствия за счет высвобождения накопленной в породном массиве энергии. Проходка выработок, отработка новых рудных тел, образование протяженных свободных от нагрузок поверхностей вызывает перераспределение полей напряжений, их концентрацию в отдельных областях массива горных пород. Динамическое воздействие на горные породы при технологических взрывах активизирует напряженные участки, провоцирует горные удары, приводит к образованию геодинамических опасных зон в породном массиве и на земной поверхности.

Для исключения этих явлений и, как следствие, травматизма и человеческих жертв необходим надежный прогноз горно-геологических и геомеханических условий ведения горных работ, разработка новых методов и способов отработки рудных месторождений, снижающих риск геодинамических явлений.

В настоящее время одним из перспективных методов мониторинга и контроля изменений НДС горного массива и прогноза геодинамических событий, в том числе в шахтном поле рудников, являются методы, основанные на механоэлектрических преобразованиях (МЭП) в горных породах, бетонах и других диэлектрических структурах. При механоэлектрических преобразованиях параметры возникающих электромагнитных сигналов (ЭМС) и характеристики электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) несут информацию о процессах образования деструктивных зон и об изменении НДС в шахтном поле. И здесь главным является, с одной

стороны, понимание физических процессов, приводящих к возникновению электромагнитных сигналов, выявление закономерностей вариаций параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при изменениях НДС и образцов, и массива горных пород. С другой стороны, важным является аппаратурная оснащенность разрабатываемых методов, которая поможет обеспечить выявление амплитудно-частотных и амплитудно-временных связей изменения НДС горных пород с изменениями параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при МЭП в породном массиве.

Поскольку образцы горных пород индивидуальны и характеризуются только им присущими свойствами, необходимо было разработать то лабораторные стенды, обеспечивающие моделирование процессов происходящих при развитии деструктивных процессов в массиве горных пород. Необходимо было также разработать автономные полевые аналого-цифровой регистраторы электромагнитных и акустических сигналов, а также программы для обеспечения ввода и вывода информации. Для уменьшения потока информационных данных механоэлектрических преобразований необходимо было предусмотреть возможность их предварительной обработки и анализа в реальном режиме времени. Для проверки работы регистраторов требуются систематические исследования амплитудно-частотных параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ в лабораторных и натурных условиях Таштагольского железорудного месторождения при изменении НДС образцов горных пород с использованием нагружения одноосным сжатием и породного массива до технологических взрывов, во время их проведения и в период релаксации возбужденного состояния горных пород. При создании полевых аппаратно-программных комплексов учитывалась возможность использования регистраторов и анализаторов ЭМС в качестве первичного сетевого оборудования сбора и предварительной обработки информации об изменениях параметров и характеристик ЭМЭ горных пород для передачи на удаленный компьютер диспетчера.

В последние годы большое внимание уделялось исследованию параметров МЭП в диэлектрических материалах, в том числе со сложной структурой в виде композиционных материалов, бетонов и горных пород. На амплитудно-частотные параметры ЭМС при разрушении таких материалов, их контроля на предмет дефектности существенное влияние оказывают структурные особенности и процессы поляризации объектов исследования при образовании и перемещении заряженных поверхностей. Величина, пространственная структура поверхностных зарядов и амплитуда колебаний зарядов определяются физико-химическими свойствами исследуемых образцов, и его структурными особенностями. Кроме того, параметры ЭМС могут видоизменяться под влиянием акустических воздействий на заряженные поверхности, в том числе в присутствии электрических и магнитных полей. Для мониторинга и прогноза развития техногенных и природных геодинамических событий важным являлось

исследование и определение закономерных связей изменений характеристик ЭМЭ и НДС массивов горных пород по данным сейсмической активности массива.

Началом работ по созданию электромагнитных методов мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических событий по параметрам ЭМС и характеристикам ЭМЭ горных пород послужили исследования сотрудников Томского политехнического университета (ТПУ) в конце 60-х и начале 70-х годов прошлого столетия под руководством профессора А.А. Воробьева, в том числе и автора этой диссертации. Работы по исследованию и применению МЭП также выполнялись в ведущих университетах и академических институтах России, таких как: Институт горного дела СО РАН (Новосибирск); Институт Физики Земли РАН; Институт проблем комплексного освоения недр РАН (Москва); Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Томск); Кузбасский и Новосибирский государственные технические университеты; Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ (г. Санкт-Петербург) и др.

Исследования показали, что параметры и характеристики МЭП зависят от физических свойств диэлектрических материалов и горных пород, от их генетического типа и структурнотекстурных особенностей. Поэтому разработка методов мониторинга изменений НДС горных пород и краткосрочного прогноза развития геодинамических событий по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии является актуальной и требует детального изучения.

Цели работы:

1. Разработка физических основ электромагнитного метода контроля подготовки и развития разрушения горных пород по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии.

2. Разработка метода и средств мониторинга развития геодинамических событий по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии горных пород.

Идея работы состоит в создании комплексного метода мониторинга и прогноза развития деструктивных зон и геодинамических явлений по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии горных пород.

Задачи исследований:

1. Разработать приборы и средства мониторинга для исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии гетерогенных материалов и горных пород: в лабораторных условиях при акустическом возбуждении и одноосном сжатии, в том числе при приложении электрических или магнитных полей; в натурных условиях шахты Таштагольского рудника при возбуждении взрывом массива горных пород.

2. На основании лабораторных и натурных исследований с применением созданных регистраторов электромагнитной и акустической эмиссий разработать метод для мониторинга и контроля развития деструктивных зон и геодинамических процессов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массива горных пород.

3. Математически смоделировать и экспериментально определить амплитудночастотные параметры электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом воздействии на образцы с различными структурными особенностями, электрическими, сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами, при поляризации образцов и приложении электрического и магнитного полей, а также образцов, контактирующих с солевыми водными растворами.

4. Экспериментально выявить закономерные связи амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии образцов горных пород на разных этапах подготовки и развития разрушения одноосным сжатием.

5. Разработать способы выявления наиболее эффективных мест установки приборов электромагнитного мониторинга геодинамической обстановки в натурных условиях шахтного поля рудников.

6. Разработать феноменологию возникновения и развития геодинамических явлений в массивах горных пород при взрывных воздействиях. Для чего установить закономерные связи изменений напряженно-деформированного состояния горных пород с амплитудно-частотными параметрами электромагнитных сигналов и характеристиками электромагнитной эмиссии породного массива. На основании полученных закономерностей определить диапазоны наиболее эффективных частот ЭМС для мониторинга образования и развития геодинамических проявлений различного характера.

Методы исследований: физическое И математическое моделирование механоэлектрических преобразований в гетерогенных диэлектрических структурах; метод измерения заряда на контактах минералов на поверхности образцов горных пород; измерения токов поляризации; измерения силы и деформации при нагружении образцов горных пород; электрические и индукционные методы измерения аналоговых электромагнитных сигналов горных пород; спектральный анализ аналоговых ЭМС с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье, а также расчет математического ожидания и дисперсии амплитуд ЭМЭ; электрические и индукционные методы измерения характеристик электромагнитной эмиссии при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород, в том числе в натурных условиях шахты Таштагольского рудника; методы пьезоэлектрического и ударного

акустического возбуждения образцов горных пород; возбуждение изменений напряженнодеформированного состояния породного массива и геодинамических проявлений в натурных условиях шахты Таштагольского рудника взрывами 30-300 тонн взрывчатого вещества; методы измерения акустических сигналов с помощью пьезоэлектрических преобразователей в лабораторных и натурных условиях; данные измерений сейсмической активности шахтного поля Таштагольского рудника; метод инфракрасной радиометрии; метод контроля отшелушивания микрочастиц при развитии разрушения горных пород; математическое моделирование обнаружения предвестников разрушения горных пород с использованием временных рядов; лицензионные программы Mathcad и Origin Lab.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Регистраторы электромагнитных и акустических сигналов для работы в лабораторных и натурных условиях подземных рудников, в том числе в информационной системе мониторинга развития геодинамических событий.

2. Определяющее влияние электрофизических свойств, структурного строения и влажности горных пород на амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов при любом типе механического воздействия.

3. Контроль формирования и наличия зоны деструкции горных пород осуществляется по амплитудно-частотным параметрам электромагнитных сигналов и по характеристикам электромагнитной эмиссии.

4. Развитие разрушения массива горных пород после взрывных воздействий сопровождается изменениями характеристик электромагнитной эмиссии во времени от секунд до десятков часов, в зависимости от значения наведенных механических напряжений и структуры горного массива.

5. Действующие механические напряжения, контакты и прочность структурных составляющих породы определяют температуру инфракрасного свечения в окрестностях скважин и отверстий в горных породах. Инфракрасное свечение скважин и электромагнитное профилирование являются оптимальными методами выбора наиболее эффективными мест установки приборов для электромагнитного мониторинга геодинамической обстановки в натурных условиях шахтного поля рудников.

6. Комплексный метод мониторинга и контроля развития геодинамических процессов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массива горных пород.

Достоверность научных результатов подтверждается: математическим моделированием электромагнитных откликов слоистых и дефектных структур; необходимым и достаточным объемом экспериментальных измерений и полученных закономерностей как в лабораторных, так и в натурных условиях шахты Таштагольского рудника; применением

современной техники и методов исследования механоэлектрических преобразований в гетерогенных диэлектрических структурах; применением калиброванных современных приборов для измерения электрических величин, а также электрических измерений неэлектрических величин; использованием созданных аналогово-цифровых аппаратнопрограммно-аппаратных регистраторов электромагнитных акустических И сигналов; корректностью постановки задач и их обоснованности; обработкой экспериментальных данных с использованием методов статистики и специальных компьютерных программ; получением результатов, не противоречащих физике исследуемых процессов.

Новизна научных положений.

• Амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов и характеристики электромагнитной эмиссии определяются структурным и текстурным строением горных пород и их зарядовым состоянием, влажностью и амплитудно-частотными параметрами возбуждающего акустического импульса при механическом воздействии.

• Внешние постоянные электрические и магнитные поля оказывают существенное влияние на параметры электромагнитного отклика горных пород при импульсном акустическом возбуждении.

• Формирование и развитие зон деструкции горных пород определяется по амплитудночастотным параметрам электромагнитных сигналов, а также по характеристикам электромагнитной эмиссии.

• По характеристикам электромагнитной эмиссии, измеряемой в шахтном поле рудника после технологических взрывов, достоверно определяются временные интервалы и выделившаяся энергия при развитии разрушения массива горных пород. При этом развитие разрушений после взрывных воздействий обусловлены наведенными механическими напряжениями и структурой массива в районе их действия.

• Температура инфракрасного свечения скважин, отверстий и контактов горных пород определяется действующими механическими напряжениями и прочностью структурных составляющих породы.

• Новый тип аналого-цифровых регистраторов РЭМС1 и РЭМАС1, при создании которых использован комплексный подход, расширяющий возможности при регистрации электромагнитной и акустической эмиссий в условиях подземных сооружений, а совокупность решений при реализации такого подхода обеспечивает новизну регистраторов.

• Электромагнитная и ИК радиометрическая схемы выбора места установки регистраторов электромагнитных и акустических сигналов обеспечивают эффективный прием электромагнитной эмиссии из зон развития деструктивных и геодинамических процессов.

• Алгоритм информационной системы и схема передачи данных от регистраторов типа РЭМАС1 на удаленный компьютер диспетчера обеспечивает возможность использования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ для мониторинга изменений НДС массива горных пород в реальных условиях шахтного поля рудников.

Личный вклад автора: формулирование целей и задач исследований, планирование всех видов работ по теме диссертации; составление технического задания и алгоритма работы регистраторов, а также алгоритмов ввода-вывода информации и ее обработки; участие в написании программ ввода-вывода данных измерения и обработки информационных данных; создание стенда для исследования параметров электромагнитных сигналов гетерогенных диэлектрических материалов при акустическом воздействии, а также комплексного стенда для исследования параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии, инфракрасной радиометрии, отслоения микрочастиц, токов поляризации, акустического воздействия, измерения величин усилий и деформации при нагружении исследуемых материалов одноосным сжатием или сдвигом до разрушения; организация и проведение лабораторных исследований электромагнитной эмиссии горных пород при акустическом возбуждении и одноосном нагружении, а также измерений в натурных условиях на разных горизонтах шахты Таштагольского рудника до взрывных воздействий (10-300 тонн взрывчатого вещества) на массив горных пород, во время их проведения и в период релаксации породного массива; организация и проведение исследований инфракрасной радиометрии отверстий в образцах, контроля токов поляризации и шелушения микрочастиц в образцах горных пород при нагружении до разрушения; организация и проведения инфракрасной радиометрии скважин до технологических взрывов в руднике и после них; организация и проведение обработки и анализа полученных результатов исследований.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработанный, изготовленный и апробированный в течение пятнадцатилетнего периода исследований программно-аппаратный регистратор типа РЭМС1 способен вести без смены и подзарядки аккумулятора в течение не менее 180 часов непрерывный мониторинг электромагнитной и акустической эмиссий в условиях рудников при проведении взрывных воздействий на породный массив и в период релаксации горных пород. Создание регистратора и полученные при его использовании результаты исследований изменения ЭМЭ и АЭ в лабораторных и натурных условиях Таштагольского месторождения внесли существенный вклад в разработку и развитие метода мониторинга и контроля развития разрушения гетерогенных материалов, а также геодинамических событий в породных массивах по параметрам механоэлектрических преобразований.

2. Разработанный, изготовленный и апробированный программно-аппаратный регистратор характеристик ЭМЭ РЭМАС1 позволяет проводить в заданном интервале времени от $8 \cdot 10^{-3}$ до $128 \cdot 10^{-3}$ секунд автоматический анализ записанных данных путем расчета математического ожидания амплитуд ЭМЭ и АЭ, а также дисперсии амплитуд ЭМЭ. Регистратор использован при разработке практической информационной системы. В информационной системе регистратор РЭМАС1 используется в качестве прибора, предназначенного для сбора, предварительной обработки и передачи данных на удаленный компьютер диспетчера.

3. На основании лабораторных и натурных исследований изменений параметров и характеристик ЭМЭ с применением регистраторов РЭМС1 и РЭМАС1 разработан метод, который найдет применение в шахтных условиях рудников для мониторинга и контроля развития деструктивных зон и геодинамических процессов.

4. Выявленные в процессе исследований этапы разрушения горных пород, позволят определять прочностные характеристики сложных неметаллических гетерогенных материалов по параметрам ЭМС и характеристикам ЭМЭ.

5. Исследования ИК свечения в отверстиях, в окрестностях скважин и контактов горных пород обеспечит надежное выявление напряженных участков горного массива в шахтном поле рудников.

Реализация работы в промышленности. Результаты работы внедрены в Таштагольском филиале OAO «ЕвразРуда» (приложение В). Регистраторы РЭМС1 и РЭМАС1 использовались при выявлении закономерностей и связей изменений параметров электромагнитных сигналов времени и характеристик электромагнитной и акустической эмиссий при проведении массовых технологических взрывов и в период релаксации напряженно-деформированного состояния породного массива в подземных выработках Таштагольского рудника. Инфракрасная радиометрия используется для поиска наиболее напряженных мест в зоне ведения подготовительных и очистных работ в шахтном поле Таштагольского рудника.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на научных семинарах Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДиП) Томского политехнического университета, на Международной конференции «Нетрадиционные и интенсивные технологии разработки месторождений полезных ископаемых», Новокузнецк, 2000 г.; на Международной конференции «Неклассическая геофизика», Саратов, 2000 г.; на Международной научно-технической конференции «Межфазная релаксация полиматериалах», Москва, 2001 г.; на YII Международная конференция «Физика твердого тела», Усть-Каменогорск, Казахстан, 2002 г.; на Ш Международный симпозиум «Контроль и реабилитация окружающей среды», Томск, 2002 г.; на Всероссийском научном симпозиуме

"Электрическая релаксация и электретный эффект в диэлектриках", Москва, 2002 г.; на конференции Международной научно-практической «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» Москва, 2003 г.; на Международной конференции «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений», Паратунка, Камчатский край, 2004 г.; на Международном симпозиуме «Золото Сибири и Дальнего Востока», Улан-Удэ, 2004 г.; на Международной научно-практической конференции «Горные науки Республики Казахстан – итоги и перспективы», Алматы, 2004 г.; на международном симпозиуме «Физическая мезомеханика и компьютерное конструированию при разработке новых материалов», Томск, 2004, 2009, 2011 г.г.; на Международной конференции «Проблемы и перспективы развития горных наук», Новосибирск, 2004 г.; на Международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах», Томск, 2007 г.; на Всероссийской конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». К 40летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН, Москва, 2008 г.; на Международной научной конференции "Становление и развитие научных исследований в высшей школе", посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьёва, Томск, 2009 г.; на XX Международной научной школе имени академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках», Крым, Алушта, 2010 г.; на I и II Всероссийской научно-практическая конференция с международным участием по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, Горно-Алтайск, 2011 и 2013 г.г.; на Internationals Forums on Strategic Technology (IFOST), Ulsan Republic of Korea 2003г., Tomsk, 2011 г.; на 2-ой Российско-Китайской научной конференции «Нелинейные геомеханико-гоединамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах», Новосибирск, 2012 г.; на International Conference on Environmental Science and Sustainable Development (ICESSD2015); Ha International Scientific Conference on "Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials" Tomsk, Russia 2014 и 2015; на Information-measuring equipment and technologies «Scientific conference with international participation 2016 (IME&T 2016)» Tomsk, Russia; Ha IV International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing, 2016; на девятых научных чтениях памяти Ю.П. Булашевича «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей» Екатеринбург, 2017; на 10th International Conference on Instrumental Methods of Analysis, IMA-2017, Greece»; на Всероссийских конференциях с международным участием «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Новосибирск, 2001, 2003, 2005, 2007, 2011, 2013, 2017 г.г.

Результаты работы апробировались и использовались в шахте Таштагольского месторождения при выполнении фундаментальных работ: по грантам РФФИ 06-08-00693-а, 06-

08-02100-э к, 10-08-02100-э к, 11-07-00666-а и 11-07-98000р сибирь а, 14-08-00395-а; по Федеральным целевым программам: «Интеграция» 2001, «Интеграция науки и высшего образования России на 2002-2006 годы», «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по теме «Технология снижения риска и уменьшения последствий техногенных катастроф с обеспечением эффективного недропользования и безопасности освоения месторождений с повышением извлечения богатой руды в условиях больших глубин и аномально высокого напряженного состояния горного массива» (шифр заявки «2011-1.5-515-062-005»); по Государственному контракту ГК № 16.515.11.5085/01.11 от «21» октября 2011 года с Институтом горного дела СО РАН, выполняемого по теме «Исследования параметров электромагнитных и акустических сигналов при изменениях напряженно-деформированного состояния горных пород и разработка аппаратуры для их мониторинга и транспорта»; по проектной часть государственного задания в сфере научной деятельности № 5.2012.2014/К «Моделирование процессов механоэлектрических преобразований в диэлектрических гетерогенных структурах и горных породах для создания информационных технологий мониторинга процессов возникновения и развития деструктивных зон и геодинамических явлений».

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 105 печатных работах, в том числе в 37 работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах и в 24 публикациях, индексируемых в Scopus или Web of Science. Полученные результаты закреплены в 1 патенте и 7 программных продуктах для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 398 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка используемой при написании диссертации литературы из 370 наименований и приложения. Диссертация содержит 174 рисунка и 11 таблиц.

Автор благодарен и признателен консультанту профессору, д.ф.-м.н. Суржикову Анатолию Петровичу за постоянное внимание к работе, всем участникам лабораторных и натурных исследований по теме диссертации, включая магистрантов ТПУ. Отдельную благодарность автор выражает сотрудникам ТПУ к.т.н. Яворович Л.В., к.т.н. Федотову П.И., к.ф.-м.н. Мертвецову А.Н. и к.т.н. Чулкову А.О. за творческое участие в работе, начальнику участка прогноза и предупреждения горных ударов Горно-Шорского филиала Таштагольской шахты АО «Евразруда» Штирцу В.А. за советы и участие в проведении большинства исследований в шахтных условиях Таштагольского рудника, сотрудникам ТУСУР (Томск) к.т.н. Бомбизову А.А. и к.т.н. Лощилову А.Г. за помощь при создании программно-аппаратного регистратора РЭМАС1.

Глава 1. Анализ состояния изученности электромагнитной эмиссии диэлектрических твердотельных материалов и горных пород. Постановка задач исследований

Разрушение твердотельных диэлектрических структур сопровождается возникновением переменных электромагнитных полей. Это явление изучается с целью привлечения параметров и характеристик электромагнитной эмиссии для контроля развития разрушения твердотельных диэлектрических материалов и для мониторинга развития геодинамических событий в массивах горных пород. В основе явления возникновения переменных электромагнитных полей лежат механоэлектрические преобразования (МЭП) в твердотельных структурах и горных пород при изменении их напряженно-деформированного состояния под воздействием механической нагрузки или при акустическом возбуждении. Возникновение электромагнитного излучения было доказано практически для любого диэлектрического материала, которое обусловлено различными видами механизмов разрушения [12-23].

1.1. О механизмах генерирования электромагнитных сигналов диэлектрическими твердотельными материалами и горными породами

Изучение явления генерирования электромагнитных сигналов в диэлектрических твердотельных материалах начато в 1933 г. Степановым А.В. [24], который наблюдал электризацию соли КСІ при пластической деформации. Эффект Степанова воспроизвел в 1955 г. Фишбах и Новик [25], а также Каффин и Гудфеллоу [26]. Исследования ионных кристаллов показали, что их электризация появляется при сжатии, изгибе, ударе и т.п. В лабораторных опытах электрический заряд появлялся на электроде, прижатому или приклеенному к исследуемому ионному кристаллу.

В Томском политехническом университете профессором Воробьевым А.А в начале 70-х годов 20 века было высказано предположение о возможности возникновения электрических разрядов в недрах Земли [27] и здесь же, в лабораторных условиях, впервые, зафиксировано электромагнитное излучение (ЭМИ) при механическом воздействии на диэлектрические материалы [28-31]. Появление ЭМИ возможно при переходе различных видов энергии в электромагнитную энергию при МЭП преобразованиях. В эти же годы, авторами работ [32-34], впервые, было зарегистрировано электромагнитное излучение в диапазоне частот 0.15-25.0 МГц при чувствительности измерительного прибора 0.3 В [35] в процессе нагревания образцов горных пород и минералов. Работу Тюриковой Л.А., Авербух Б.Г. с соавторами [36] также можно считать одной из первых, в которой показано возникновение электромагнитное излучение в радиодиапазоне длин волн, сопровождающее разрушение твердого тела.

В дальнейшем исследования твердотельных диэлектрических материалов было направлено на выявление источников и механизмов МЭП. Это связано с тем, что развитие разрушения диэлектрических материалов и горных пород обусловлены перераспределением механических напряжений по разным направлениям и механизмам при различных видах воздействия на них. При исследованиях МЭП в горных породах и гетерогенных диэлектрических материалах, импульсное изменение электромагнитного поля в различных источниках называлось: радиоизлучением, электромагнитным излучением (ЭМИ), электромагнитной эмиссией (ЭМЭ), электромагнитным сигналом (ЭМС). Эти исследования в значительной степени направлены на выяснение механизмов генерирования электромагнитных сигналов, возникающих при различных видах воздействия.

При МЭП преобразованиях возникновение ЭМС обусловлено изменением электрического или зарядового состояния материала. Наличие, появление или изменения количественно или качественно электрических зарядов является обязательной причиной возникновения ЭМС. Здесь следует рассмотреть принципиально важные вопроса: во-первых, какие физические процессы проводят к разделению зарядов, образующих электрические диполи; а во-вторых – какие основные механизмы изменения дипольного момента формируют ЭМС.

В первых работах Воробьева А.А., Гохберга М.Б., Егорова П.В. [29, 37-39] замечено, что появление в диэлектрических материалах ЭМС возможно в результате механического возбуждения, воздействия тепла, воздействия электрическим и магнитным полями, а также облучением. В исследовании Финкеля В.М. обнаружено заряжение поверхностей скола кристалла LiF. Установлено [40], что на берегах скола на всем протяжении имеются заряды противоположного знака. При росте трещин заряды релаксируют со временем. Молоцкий М.И. в работе [41] подвел теоретическое обоснование этого эффекта, которое заключается в существовании асимметрия упругого поля около вершины трещины. В результате такой асимметрии происходит скольжение дислокаций, зарождение и скачкообразное развитие трещин, которые и приводят к разделению зарядов между берегами трещины. Гершензон Н.И. [42] изучал электромагнитный сигнал при появлении трещины скола в литий фтор в направлении оси симметрии <100>. Выявлено, что к возникновению ЭМС приводит и зарождение трещин скола. У образующихся в результате механического действия трещины происходит электризация поверхностей, которая является основным условием для возбуждения ЭМС [43, 44]. В процессе деформации или разрушения кристаллических образцов происходит электризация в результате разрывов ионных связей, при движении заряженных дислокаций, при адгезии, при электрокинетических явлениях. При реализации таких процессов плотность разделенных зарядов может достигать значений в интервале 10⁻¹⁰÷10⁻² Кл/м² [44-46].

Конкретные значения плотности зарядов определяются типом исследуемых образцов и способом их разрушения. Возможность флуктуаций заряда, по данным Иванова В.В. в работе [47], обусловлена наличием анионных и катионных вакансий, а также ионов примеси около вершины трещины, так как вблизи поверхности разрушения термодинамические условия отличаются от таковых в остальном объеме материала. Гетерогенными диэлектрическими структурами является подавляющее большинство горные породы. В них содержатся минералы с ионным типом связей. Поэтому в горных породах в процессе трещинообразования возможно появление и разделение зарядов на разрывах или берегах трещин [44, 45].

По мнению Головина Ю.А. [48], Финкеля В.М. [40], Мирошниченко М.И. [49] в щелочно-галоидных кристаллах регистрируемые ЭМС, в диапазоне 10÷10⁷ Гц, связаны с двумя механизмами, обусловленными зарождением или скачкообразным продвижением трещин [49] или формированием линии скольжения дислокаций [48]. Авторы предположили, что по этим механизмам могут создаваться электрические поля, которые близки к регистрируемым.

В процессе деформирования горных пород появление электрических зарядов Финкель В.М., Корнфельд М.И., Урусовская А.А. объяснили эффектом Степанова в результате движения заряженных дислокаций в приложенном поле механических напряжений [40,50-52]. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. [53] объясняли процесс появлением заряда случайным разрывом межатомных или межионных связей в процессе роста трещин. В результате таких разрывов на берегах трещин появляется зарядовая мозаика.

В случае нарушения контактов блоков, текстурных слоев, минералов и кристаллитов процессы электризации могут также происходить в результате трения или при расслаивании двойного электрического слоя (ДЭС). Вишневская Н.Л. и Защинский Л.А. [54], рассмотрели заряженные трещины в виде системы диполей, у которых беспорядочная ориентация дипольных моментов. На некотором этапе механического воздействия эти диполи приобретают преимущественную ориентацию. Авторами рассчитаны величины напряженности электрического поля, являющейся функцией, как элементарных источников, так и среднего значения их электрического момента. Минимальная концентрация элементарных источников должна быть пропорциональна энергии образования трещины и обратно пропорциональна величине дипольного момента элементарного источника [54]. Это является необходимым условием для существования самосогласованного поля.

В работе [31] Гольд Р.М. определяет возникновение ЭМС в минералах и горных породах газоразрядным механизмом в полостях развивающихся микротрещин. Газоразрядный процесс возможен между локальными участками поверхности микротрещины, для которых выполняется закон Пашена [53,55,56]. Закон Пашена может выполняться, когда нижний предел газоразрядного промежутка, составляет (5-6)·10⁻⁶ м [57]. Приведенные пределы являются

одними из главных условий проявления газоразрядного механизма в полости раскрывающихся микротрещин. Дополнительным ограничением проявления этого механизма является необходимость проникновения газовой среды в полость микротрещины.

Перельман М.Е. и Хатиашвили Н.Г. [53] предложили модели, основанные на трансляции заряда, при этом они не отрицали возможность генерирования ЭМС газоразрядными процессами. Они считали, что ЭМС может появиться за счет изменения емкости, если заряженные борта микротрещины перемещаются друг относительно друга. В начале нагружения, по их оценкам, при ускорении перемещении бортов трещин диапазон ЭМС составляет (1-10³) МГц. Если длина элементарного скачка трещины принять равной (1-100) ·10⁻⁶ м, скорость движения $(10^3 - 10^4)$ м/с, то нижняя граница частот ЭМС будет около 10^3 Гц. Это коррелирует с результатами лабораторных исследований по измерению спектра ЭМС в горных породах [26]. Таким образом, генерирование ЭМС в трансляционных моделях связывают с процессом роста трещин. Механизм генерирования ЭМС при трансляции зарядов разработан и в работе Воробьева А.А. [55, 58]. Генерирование ЭМС в этой работе объясняется изменением дипольного момента при движении микротрещины. Экспериментально в работе Мирошниченко М.И. и Куксенко В.С. [39] подтверждена возможность такого источника электромагнитных сигналов.

Воробьев А.А., Сальников В.Н. и автор настоящей диссертации [28, 29] генерацию ЭМС нагревания образцов горных пород и минералов объясняли разрядными в результате процессами с поверхностей микроразрушений, которые были заряжены до высоких потенциалов. В длинноволновом диапазоне волн регистрируемые электромагнитные сигналы распределены по всему интервалу температур. В коротком диапазоне волн ЭМС появляются преимущественно в высокотемпературной области (710-730)⁰С. Полученные результаты предполагают возможность существования зависимости ллительности ЭМС ОТ термонапряжений. Изменение температуры от 80°C до 100°C приводит к выделению слабосвязанной воды и при этом происходит значительное увеличение электропроводности исследуемых образцов. Это приводит к снижению энергии активации носителей заряда и к увеличению количества ЭМС. Количество ЭМС у слюды при температуре (90-100)⁰С скачком возрастает приблизительно в 70 раз. Генерируемые ЭМС в этой области температур, вероятно, обусловлены тем, что происходит расщепление слюды водяными парами слабосвязанной воды, выделенной из минерала.

Сальниковым В.Н. и Беспалько А.А. показано, что растрескивание кристалликов флюорита при нагревании обусловлено декрипитацией. При этом разрушение минерала сопровождается световыми и электромагнитными импульсами и звуковым эффектом в виде треска [59]. В монографиях Пархоменко Э.И. [60, 61] описывается электризация образцов

горных пород и изменение электропроводности при нагревании и различных давлениях. Эмиссия электронов происходит при нагревании горных пород, которые подверглись механическому нагружению или действию облучения. Левисом [62] эмиссия электронов интерпретируется запасенной энергией, обусловленной примесями, дефектами решетки и механическими напряжениями.

По данным автора работы [63] у материалов и минералов, у которых отсутствует пьезоэлектрический эффект, основные закономерности электризации сводятся к накоплению электрического заряда в местах неоднородной деформации. Релаксация заряда происходит при снятии нагрузки за время, которое зависит от диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления. В работах Шевцова Г.И. [64], Соболева Г.А. [65], Хатиашвили Н.Г. [66] приводятся результаты электризации алевролитов, песчаников и полевых шпатов. Плотность заряда микроклина и ортоклаза при деформировании ($10^{-5}-10^{-9}$) Кл/м², плотность тока перед разрушением достигала ($10^{-5}-10^{-8}$) А/м². Такие плотности тока достаточны для пробоя газового промежутка.

Установлено, что при механическом воздействии на минералы и горные породы, на поверхности образующихся трещин появляются электрические заряды противоположные по знаку. В месте образования трещины образуется область наибольших электрических напряжений между разноименно заряженными поверхностями. При достижении определенной разности потенциалов между ними происходит разряд. В результате генерируется ЭМС в радиодиапазоне частот.

Таким образом, при изменении напряженно-деформированного состояния диэлектрических твердотельных материалов, минералов и горных пород происходит непрерывное преобразование механической энергии в электрическую энергию, накопление ее и выделение в виде электромагнитного излучения.

Многочисленными исследованиями установлено, что при упругом возбуждении диэлектрических материалов возникает ЭМС. Воробьев А.А. с соавторами [67] регистрировали ЭМС при ударном возбуждении образцов с различной влажностью. Образцы были представлены 80% кварцевым песком с 20% примесью глины. В этих образцах присутствовало большое количество пьезоэлектрических компонентов. Это помешало подтвердить гипотезу о возбуждении ЭМС из-за нарушения водно-коллоидных связей, которые происходят в поле механических напряжений при переукладке зерен минералов. Перельман М.Е. и Хатиашвили Н.Г. [68, 69] экспериментально и теоретически доказали, что при воздействии акустической волны формируется ЭМС. Возникающий ЭМС является следствием колебательных движений двойных электрических слоев и флуктуационно-заряженных берегов микротрещин, освобождением и колебанием заряженных дислокаций. Параметры ЭМС определяются амплитудно-частотным спектром акустического поля, возбуждаемого линейными деформациями источников.

Проведенные Воробьевым А.А., Сальниковым В.Н. и др. [35, 70, 71] измерения ЭМС на образцах горных пород в лабораторных условиях и в условиях естественного залегания, доказывают возможность разрядов и ЭМС в районах трещиноватости, окварцованных зонах, и на контактах горных пород. Пластическая деформация горных пород, при которой происходит перемещении имеющихся трещин, должна приводить к электризации. Это перемещение самого вещества, при котором происходит его уплотнение из-за сдвижения отдельных блоков или зерен.

Гохбергом М.Б., Моргуновым В.А. [37, 73,74] предложены две концепции активных излучателей, которые возникают накануне сейсмического события при разрушении и трении. Ласуковым В.В [75, 76] теоретически рассматриваются аэрозольный, перколяционный и озонный механизмы предвестников землетрясений электромагнитной природы на основе концепции условий распространения.

Гульельми А.В., Гершензоном Н.И. в [77-79] построена теория возникновения ЭМС в очаге землетрясения. В работе [77] доказывается теоретически, что ЭМС возбуждается в очаге при магистральном разрыве. Электрический дипольный момент добавляется к дипольному магнитному моменту, когда наблюдается асимметрия берегов разрыва. Фронт распространяющегося разрушения является источником электромагнитного поля. По мере удаления места регистрации от очага землетрясения вдоль земной поверхности наблюдается убывание амплитуды ЭМС.

Изучение электромагнитных предвестников геодинамических событий позволило возмущения атмосферно-электрического установить связь поля с механическими напряжениями в массиве. Тарасовым Б.Г. с соавторами [80] сделана попытка доказать, что заряженных дефектов под действием градиентов давления диффузия может быть универсальным механизмом, который связывает механические напряжения с возмущениями электрического поля. Алексеевым Д.В. [81] приводится теоретическое доказательство этого механизма, основанного на общей теории токов [82, 83], которые индуцируются механическими напряжениями в диэлектрических структурах с диффузионным механизмом проводимости.

Обобщая механизмы формирования ЭМС и типы источников можно определить процессы, которые приводят к разделению электрических зарядов и формируют электрические диполи:

a) при разрыве ионных или других видов связи неравномерное распределение электрических зарядов на берегах трещин;

 б) в неоднородном поле механических напряжений возникает миграция заряженных дефектов в области формирования трещин;

в) на контактах выделившейся при нагревании минерализованной воды и горной породы;

г) электризация при перемещении элементов структуры в результате трения.

Изменение дипольного момента определяется:

а) пробоем между заряженными бортами трещины;

б) релаксацией заряда, если ток протекает по диэлектрическому телу вне трещины;

в) эмиссией электронов;

г) колебаниями заряженных поверхностей.

Таким образом, формирование ЭМС обусловлено изменением зарядового состояния исследуемого материала при формировании трещин различного масштаба или двойных электрических слоев на контактах минералов и водных растворов.

1.2. Анализ моделей генерации электромагнитного сигнала

Развитие деструктивных процессов и разрушение диэлектрических материала вызывает эмиссию электронов и положительных ионов, нейтральных атомов и молекул, видимых фотонов и радиоволн [27, 31, 43, 59, 84, 85].

Как уже отмечалось выше в разделе 2.1. электризацию ЩГК впервые наблюдал Степанов в 1933 г. За этими исследованиями последовало множество других, в которых регистрировали ЭМС от очень широкого круга диэлектриков с разными пьезо- и сегнетоэлектрическими свойствами, в кристаллическом и аморфном состоянии, от металлических и неметаллических гетерогенных материалов, а также горных пород при различных видах механического воздействия [58,86-92].

После изучения физико-химических характеристик явления работы смещаются к прикладным исследованиям, относящихся к проблемам прогнозирования землетрясений [78,93-95], прогнозу разрушения горных пород в подземных выработках шахт [96-99] и изучению взрывов [100-102].

Существующие объяснения происхождения ЭМС при деформации и разрушения не в состоянии объяснить все особенности регистрируемого излучения. В связи с этим проанализируем существующие модели генерации ЭМС.

1.2.1. Дислокационная и электронная модели генерации электромагнитных сигналов

Мізга и Gosh [103, 104] предположили, что в переходной стадии упруго-пластической деформации при растяжении, а именно, при преодолении предела текучести, в процессе распространения трещин и развитии разрушения подвижные дислокации выстраиваются в некоторой конфигурации, которая соответствует механически стабильному положению. При этом дислокации автолокализуются за счет потерь энергии при перемещении. При этом электроны проводимости или «шуба» из точечных электронных дефектов, связанных с такими дислокациями, будут также неподвижны и, в конечном счете, захвачены положительными ионами. Этот процесс торможения электронов проводимости схожий с механизмом «тормозного излучения» и приводит к генерированию ЭМС. Мізга [103] далее предположил, что: «на каждой стадии перехода (например, преодоление предела текучести и/или превышение предела образования трещин) должна быть: во-первых перегруппировка распределения электронов проводимости в микроскопической системе; во-вторых, создается колеблющийся диполь Герца. Таким образом, по мнению авторов, ЭМС должен появиться только на этапе переходов деформационных процессов.

Противоположный анализ дал Молоцкий [105]. Он указал, что электроны проводимости в медленно движущихся дислокациях, приобретают энергию порядка (10-11) эВ на длине свободного пробега, так что максимальная частота излучаемого ЭМС будет порядка 10³ Гц, то есть значительно ниже, чем значения, которые предсказал и измерил Misra. Поэтому ускорение электронов проводимости движущимися дислокациями не могут быть причиной ЭМС от металлов. Молоцкий предположил, что ЭМС появляется из-за увеличения общей длины дислокации и скорости, которая возрастает в переходных стадиях деформации. Поскольку эти дислокации ведут себя как электрические диполи, этот механизм привел бы к ускоренному росту дипольного момента материала с сопровождающим его излучением ЭМС.

Оба эти объяснения относительно генерирования ЭМС движущимися дислокациями имеют свои недостатки. Известно, что движением дислокаций можно полностью пренебречь при разрушении хрупких материалов, и, следовательно, этот механизм не может объяснить ЭМС из стекла и других хрупких материалов, например, из прочных горных пород. На этот основной недостаток «гипотезы движения дислокации» также указали Jagasivamani и Iyer [106]. Они показали экспериментально, что амплитуда ЭМС даже увеличилась при разрушении исследуемых закаленных хрупких металлов. В [97] также показали, что активность ЭМС увеличилась с увеличением упругости материалов и снижается в случае перехода от упругого к пластичному деформированию.

1.2.2. Разрядная модель генерации электромагнитных сигналов

Финкель с соавторами [107] показали, что расщепление ЩГК создает мозаику положительных и отрицательных зарядов, которые появляются с обеих сторон трещины при ее зарождении. Такое разделение зарядов способно создать электростатическое поле порядка 10⁹ В/м. В этом случае может произойти электрический разряд, который и был предложен в качестве источника ЭМС. Мирошниченко, Куксенко [49] и Хатиашвили [46] отмечали, что спектр излучения разряда, как известно, имеет вид "белый шум" и не зависит от механических свойств материалов.

Рабинович с соавторами в 1999, 2000, 2002 г.г. и Фрид в 2000 г. показали, что ЭМС появляется в виде отдельных импульсов или в виде кластеров импульсов, вызванных различными трещинами. Свойства импульса зависят от размеров разрушения и от упругих свойств материалов [97-99]. Кроме того, высокое разрешение экспериментальной системы облегчает анализ точных форм импульсов ЭМС. По результатам исследований видно, что они, безусловно, не ведут себя как "белый шум", а скорее демонстрируют особый характер. Полученные Фридом результаты аналогичны тем, которые наблюдали Мирошниченко, Куксенко [49] и Хатиашвили [46].

1.2.3. Модель генерации электромагнитных сигналов движущейся вершиной трещины

Генерирование ЭМС наблюдали авторы работы [42] во время распространения трещин, вызванных путем расцепления ножом кристаллов LiF. Развивающаяся трещина (вершина) распространяется в направление вдавливания. Согласно авторскому предположению, отрицательный электрический заряд движется с вершиной трещины, в то время как положительный заряд, предполагается, накапливается в области контакта индентора с материалом. При замедлении трещины, противоположные заряды, разделенные по длине трещины, образуют диполи, которые являются источником ЭМС. Исходя из этого, Гершензон с соавторами рассчитали мощность генерируемого ЭМС, что дало основание предположить, что зарядный механизм возник благодаря перемещению заряженных дислокаций.

Однако перенос заряда дислокациями не может быть общим объяснением происхождения ЭМС, и даже для диэлектрика, такого как LiF. Объяснение движение вершины трещины вызывает сомнение [108], так как скорость дислокаций в щелочно-галоидных кристаллах меньше скорости трещины, подразумевая, что заряженные дислокации не могут быть причиной зарядки трещины.

Еще один аргумент о том, что нет четкой причины для любого «нарушения симметрии», т.е. не существует никакого известного механизма, который бы позволил вершине трещины стать отрицательной. В частности, для случая, обсуждаемого Гершензоном с соавторами, неясно, почему вершина трещины должен накапливать отрицательный, но не положительный заряд.

1.2.4. Модель генерации электромагнитных сигналов при колебании плоскостей трещин (модель «конденсатора»)

Чтобы определить, могут ли движения сторон трещины во время растрескивания вызвать ЭМС с соответствующими характеристиками, Мирошниченко и Куксенко использовали акустическую волну, излучаемую материалом, для разрыва пласта специально созданного вспомогательного заряженного конденсатора. Сигнал ЭМС от конденсатора контролировался антенной. Поскольку измеренные параметры сигнала были сопоставимы с полученными прямым наблюдаемым ЭМС, они пришли к выводу, что последний был вызван аналогичными движениями заряженных сторон трещины.

О'Киф и Тиль [91] предложили другую версию конденсаторной модели (для ЭМС от растрескивания сжатого льда), в которой создается параллельный пластинчатый конденсатор, пластины (стороны трещин) которого раздвигаются. После того как начальный заряд образуется на поверхности трещины, дальнейшее разделение должно приводить к уменьшению емкости и, как следствие, увеличению напряжения на трещине.

Пространственно-временной анализ излучения может быть осуществлен с использованием уравнения диффузии для электрического поля в трещине. Хотя при использовании этого метода можно было смоделировать временное затухание ЭМС, колебательное движение не было предсказано. О'Киф и Тиль [91] также рассмотрели механизмы, по которым суммарный заряд может быть создан. Эти механизмы включают предварительную поляризацию материала, применение градиентов температур, деформации, концентрации примесей и т.д. Петренко [109] утверждал, что электризация сторон трещины может быть вызвана окружающими неоднородными упругими деформациями, а Огава с соавторами [90] предположили, что электризация трещин связана с пьезоэлектричеством и контактной (или разделяющей) электризацией. Эти последние исследования утверждают, что, если два образца горной породы контактировали, электроны двигались бы поперек потенциального барьера на поверхность контакта, создавая разность потенциалов между породами, и по плоскости контакта, образуя двойной электрический слой. С другой стороны, когда мультиминеральный образец горной породы, такой как, гранит был разбит на две части,

будет происходить процесс движения заряда: электроны должны будут двигаться назад от образца меньшего контактного потенциала к образцу с более высоким потенциалом. Тем не менее, весь сценарий «конденсатора» довольно сомнителен по следующим причинам.

а) В этой модели предполагается, что ЭМС обусловлен ускоренным диполем, созданным заряженными сторонами трещины. Это предположение подразумевает, что ЭМС может возникать только из-за растягивающих трещин, а не из-за сдвиговых. Проведенные эксперименты с имеющими микротекстуру и низкую прочность образцами мела, подверженными одноосному и трехосному сжатию [98], показали четкие фрактографические различия между трещинами, образованными растяжением и сдвигом. Для суммарной амплитуда ЭМС (измеренная выше предела упругости образца) было установлено (коэффициент квадратичной регрессии R2 = 0,86) линейное уравнение:

 $E = -33.39 + 0.006 55S_t + 0.005 96S_s,$

где *E* - суммарная амплитуда импульсов ЭМС (Vm⁻¹), а S_t и S_s - полные площади (мм²) растягивающих и сдвиговых трещин, соответственно. Коэффициента S_t и S_s , определены с точностью до ± 5%, что соответствует порядку ошибки в измерениях площади. Этот результат показывает, что амплитуда ЭМС не зависит от способа трещинообразования при растяжении или сдвиге и связана только со всей площадью трещины [98].

Во всяком случае, модель конденсатора предполагает соответствие между ЭМС и появления эмиссии акустических сигналов (AC). Однако измерения Фрида и результаты Yamada [12] показывают, что, хотя есть события, для которых сигналы АЭ и ЭМС появляются вместе (например, Рабинович с соавторами, 1995 г.), существуют события, для которых AC обнаружен, тогда когда ЭМС отсутствует и события, для которых наблюдается ЭМС, и AC отсутствует. Поэтому эти результаты не согласуются с моделью конденсатора. Разброс между появлением сигналов АС и ЭМС, вероятно, связан с различием в механизмах, ведущих к двум типам излучения.

б) Даже в предположениях, что две стороны трещины могут заряжаться мозаичным способом (Финкель и др, 1975 г.), сохраняя полную нейтральность заряда, и что ЭМС индуцируется диполями, состоящими из пар противоположно заряженных мозаичных «элементов» на двух участках трещины, ожидается, что амплитуда ЭМС, который вызван движущейся трещиной, будет очень слабой из-за отмены излучения, происходящего от взаимно осциллирующих противоположно заряженных диполей (случайное распределение мозаичных элементов).

Таким образом, предложенные модели для возникновения ЭМС не выдерживают испытаний экспериментом. Фрид предложил еще одну модель генерирования ЭМС.

Предлагаемая модель электромагнитного излучения может быть описана следующим образом: после разрыва связей, атомы от обеих сторон перемещаются в «неравновесные» позиции по отношению к их стационарным состояниям и начинают колебаться вокруг них. Линии колеблющихся атомов движутся вместе и, будучи соединенными с атомами вокруг них, последние также участвуют в движении. Последующие колебания аналогичны тем, которые вычисляются в модели Дебая для объемных колебаний. Чем больше число разорванных связей, тем больше площадь возбужденных атомов и, следовательно, амплитуда ЭМС становится больше. При таких колебаниях положительные заряды движутся вместе в диаметрально противоположной фазе к отрицательным зарядам и экспоненциально распадаются в материале, как волны Рэлея. Результирующий осциллирующий электрический диполь является источником ЭМС. Амплитуда импульса распадается на взаимодействие с объемными фононами.

Данная модель имеет достоинства, которые заключаются в том, что в модель не включены дислокации, и поэтому ее можно применять также к хрупким и аморфным материалам. Также эта модель применима к сдвиговым, растягивающим и даже смешанным режимам разрушения.

Таким образом, основными элементами новой модели предлагаются:

1. Увеличение амплитуды ЭМС растет до тех пор, пока трещина продолжает расти, так как новые атомные связи порваны и их вклад добавляется к ЭМС. В результате атомы с обеих сторон связей перемещаются в «неравновесные» точки относительно их стационарного положения и начинают осциллировать аналогично дебаевской модель объемных колебаний.

2. Когда трещина останавливается, соответствующая этому процессу амплитуда ЭМС уменьшается до нуля.

1.3. Закономерности изменения параметров электромагнитных сигналов

Лабораторные экспериментальные исследования изменения параметров ЭМС при механическом воздействии на диэлектрические материалы и горные породы показали, что наряду с интенсивностью ЭМС изменяются их амплитудно-частотные характеристики, время затухания и форма. Исследования закономерностей изменения параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ горных пород в их естественном залегании показали, что параметры ЭМС и характеристики также изменяются в процессе изменения НДС. При исследовании интенсивности ЭМС возможно провести оценку скорости возникновения дефектов. Исследование формы ЭМС, его частоты и амплитуды дает возможность предполагать об

источниках их появления. Амплитудное распределение определяет тип дефектов, присутствующих в исследуемом материале [110, 111].

В работах Воробьева А.А. [30] и Корнейчикова В.П. [112] показано возрастание амплитуды ЭМС при росте механической нагрузки на образцы горных пород. Они связывают полученный результат с увеличением размеров нарушений, и это не противоречит приведенным в [42, 46] результатам. Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л., Лыков Г.К. [113] отмечают, что от скорости движения дислокаций зависит амплитуда акустической эмиссии и ЭМС. От количества выходящих дислокаций зависит величина интенсивности ЭМС. Если увеличить высоту исследуемого образца от 5·10⁻³ до 30·10⁻³ м, то амплитуда ЭМС, генерируемая трещиной раскола будет увеличиваться по закону, близкому линейному. При нагружении образцов колебательный характер будет иметь амплитуда и время релаксации (в начале нагружения генерируются несколько ЭМС с небольшими значениями параметров, следом за ними 1-3 ЭМС с увеличенными параметрами и т.д.). Такой колебательный характер параметров ЭМС был связан в [114] с изменением линейных размеров источников ЭМС.

Кузнецов С.В. в работе [115] в лабораторных условиях зарегистрировал электромагнитный сигнал в диапазоне частот 20-200 кГц. При этом длительность ЭМС была в пределах (0.1–0.5)·10⁻³ с. В этих исследованиях ЭМС не был обнаружен при нагружении до 0,7– 0,8 Р_{пред}. При этом выявлено, что ЭМС сначала находится в диапазоне от 200 кГц до 1,5 МГц. Затем, с увеличением приложенной нагрузки - на частотах от 20 кГц до 100 кГц. Ближе к разрушению резко возрастает интенсивность ЭМС по всему частотному диапазону. Замечено, что у низкочастотных составляющих амплитуда ЭМС значительно возрастает по сравнению со всем спектром сигнала. В естественных условиях ЭМС с длительностью (0.2 – 0.5)·10⁻³ секунд генерировались при растрескивании вмещающих пород и бокситов. Монотонно затухающий вид наблюдался у спектра излучения. С увеличением степени напряженности возрастает амплитуда ЭМС и интенсивность. Курленя М.В. с соавторами [116] предлагает методику и критерий выявления длительности ЭМС, основываясь на теоретических расчетах. В этой работе также приведены оценки длительности электромагнитного сигнала, основанные на результатах лабораторных исследований при разрушении горных пород.

Касьян М.В. с соавторами в [117] выявили общие закономерности частотных и амплитудных спектров АЭ и ЭМС, основываясь на лабораторных исследованиях при нагружении горных породах в процессе их трещинообразования. Этапы деформации и разрушения, по мере увеличения количества повреждений в образцах горных породах, представляются последовательностью изменения состояний. Каждое состояние можно охарактеризовать определенным видом спектра частот и определенным законом для распределения ЭМС по уровням излучения энергии. При переходе к каждому последующему этапу наблюдается скачкообразное изменение спектральной плотности энергии и плотности распределения ЭМС. В работе показано, что индикатором для растущих трещин может служить частота и амплитуда ЭМС, спектральная плотность мощности ЭМС, плотность распределения ЭМС по уровням амплитуды и др. В работе [117], при нагружении образцов гранита, выявлено, что при развитии трещин эволюционирует плотность распределения электромагнитных сигналов. В начале разрушения наблюдается увеличение одиночных трещин в зонах локально независимых. На этом этапе плотность распределения ЭМС описывается логарифмическим законом. С увеличением нагрузки происходит накопление различных дефектов и при этом происходит их взаимодействие, в результате чего логарифмическое распределение переходит в распределения Вейбулла. На этапе предразрушения происходит скачкообразный переход распределения Вейбулла в нормальный закон. При этом происходит смещение математического ожидания в область с увеличенной энергией ЭМС. В заключении, когда происходит лавинный этап трещинообразования и разрушения сохраняется гауссовский закон распределения ЭМС по уровням энергии.

В работе [46] Хатиашвили Н.Г. при исследовании спектров электромагнитных сигналов ЩГК и горных пород при нагружении до разрушения, делает вывод, что ЭМС возникает в диапазоне частот от единиц кГц до МГц. Однако у каждого материала имеется свой максимум АЧХ, который может приходить на диапазон (1–50) кГц. При разрушении образцов горных пород, изготовленных в виде «сэндвича», спектр ЭМС, представляется в виде суммы спектрального состава ЭМС, которые генерируются каждым из составленных образцов.

В работе [118, 119] показано, что с увеличением нагрузки возрастает величина максимальных спектральных амплитуд. Частоты, соответствующие ЭМС с такими амплитудами, смещаются в более высокочастотную область спектра. Такие изменения продолжается пока в исследуемом материале не сформируется магистральная трещина. Тогда спектральная амплитуда достигает наибольших значений, превышающих все предшествующие за весь период нагружения.

При нагружении с равномерной скоростью образцов горных пород наблюдали изменение частот ЭМС. Так в работе Егорова П.В. с соавторами [114] указаны интервалы частот для различных горных пород: мраморизованный известняк – от 2 до $0,04\cdot10^6$ Гц; кварцевый диорит – от 10 до $0,01\cdot10^6$ Гц; кварцитовая руда – от 0,13 до $0,04\cdot10^5$ Гц; щелочно-галоидный кристалл *KCl* – от 0,01 до $0,001\cdot10^6$ Гц. Пластичные горные породы характеризуются наиболее равномерным увеличением скорости возникновения ЭМС. При этом амплитуда сигналов небольшая. Для хрупких горных пород характерно большие амплитуды ЭМС. Для них характерно резкое увеличение скорости счета ЭМС перед глобальным разрушением. Одноосное сжатие образцов горных пород Зыряновского и Таштагольского железорудного месторождения,

представленные известняком, магнетитовой рудой, кварцевым сиенитом показало на спектрально-временных матрицах повышенное значение спектральных амплитуд ЭМС, соответствующее моменту разрушения.

Исследователи в работе [120] осуществили описание *S*-образной кривой трещинообразование и разрушение в координатах: спектральная амплитуда, время и частота.

Анализ АЧС спектра ЭМС с использованием быстрого преобразования Фурье показал, что основные частоты возникающих при развитии разрушения ЭМС находятся в диапазоне от 10 Гц до 10⁷ Гц [47]. При этом высокочастотный диапазон сигнала зависит от времени релаксации заряда. А это соответствует электромагнитному излучению $\lambda \approx 3.10^7 - 30$ м длин волн. Следовательно, условие квазистационарности выполняется от источника излучения на расстоянии $R < \lambda$ [121]. Тогда регистрация ЭМС происходит в ближней зоне излучения, а не в волновой.

На образцах мраморной мелкозернистой плитки Вострецов А.Г. [122] провел эксперимент и проанализировал спектрально-временные характеристики ЭМС на различных этапах одноосного сжатия, чтобы отследить прорастание магистральной трещины и саму динамику образования систем трещин. В экспериментах выявлены некоторые особенности, указывающие, что количество локальных участков разрушения соответствует количеству максимумов на графике спектрально-временные характеристики ЭМС. Когда образец теряет устойчивость, величина ЭМС достигает максимального значения. Здесь получена высокая корреляция между возникновением ЭМС и падением нагрузки. На каждом этапе при формировании участка разрушения, который соответствует появлению локального или глобального участка, накануне происходит возрастание энергии ЭМС, также наблюдается смещение спектра частот ЭМС в высокочастотную область. При завершении этапа, на котором происходит формирование локального участка, наблюдается сначала увеличение, а затем уменьшение энергии сигнала и его смещение в низкочастотную область.

Финкель В.М. в своей работе [40] установил идентичность формы сигналов при трещинообразовании в ионных кристаллах и в горных породах. Это позволило сделать вывод о том, что возбуждение электромагнитного сигнала вызвано движением берегов трещины противоположно заряженных.

Исследования Гершензона Н.И. с соавторами показали, что кинетикой прорастания трещин скола для LiF определяется форма ЭМС [42]. Подтверждением выводу, сделанному в этой работе, являются исследования Иванова В.В. и Пимонова А.Г. [123]. В этой работе показано, что кинетикой роста трещины обусловлена форма отдельного ЭМС. В работе [124] утверждается, что для горных пород, у которых удельное электрическое сопротивление варьирует от 10² до 10⁶ Ом м форма сигналов одинаковая в ближней зоне.

В работе [47] Иванов В.В. замечает, что в процессе деформации ЩГК и образцов горных пород форма ЭМС зависит от увеличения дипольного момента растущих и распространяющихся трещин, а также от релаксации заряда на берегах трещин при их временной или постоянной остановке.

Таким образом, при акустическом возбуждении образцов горных пород в АЧС электромагнитного сигнала всегда наблюдаются частоты, которые обусловлены собственной резонансной частотой. Этот полученный вывод очень значим для того, чтобы определить диапазон регистрируемых частот при проектировании и изготовлении измерительной аппаратуры, которая будет использоваться как в лабораторных, так и в натурных условиях. В натурных условиях установлено экспериментально, что диапазон частот ЭМС должен лежать в диапазоне до сотен килогерц.

Натурные исследования, проведенные сотрудниками ПНИЛ ЭДиП и автором этой работы в Иркутской, Кемеровской и Томской областях, на Камчатке и в Ташкенте, показали, что с большой вероятностью такой диапазон частот связан с размерами блоков, которые составляют массивы. Исследования, которые были проведены сотрудниками ИГД СО РАН под руководством Опарина В.Н. [124], направленные на оценку блочности горных пород в массиве, выявили, что в интервале от 2 до 100 см находится наибольшее распределение размеров блоков *L*.

На рисунке 1.1 показано нормированное по размерам распределение блоков горных пород в массиве.



Рисунок 1.1 – Нормированное по размерам распределение блоков горных пород в массиве [124]

При этом была использовано усреднение (окно экспозиции $2 \cdot 10^{-2}$ м, шаг сканирования 10^{-3} м). Используя выражение $f = V_3/2L$, которое применимо для основной гармоники частот и учитывая среднюю скорость звука в горных породах, которая равна $V_3=3000$ м/с, можно

получить, что ЭМС излучается преимущественно блоками именно таких размеров. Диапазон частот ЭМС был определен выше. При этом в интервале 12-30 кГц с центральными частотами 15-20 кГц на АЧС ЭМС будут выделяться частоты с высокой амплитудой.

Таким образом, показаны возможные связи параметров электромагнитного сигнала и воздействующего акустического сигнала. Акустические сигналы, возникающие при зарождении и росте трещин, также участвует в возбуждении ЭМС и оказывают значительное влияние на АЧС ЭМС из образцов горных пород. В натурных условиях такое утверждение для горных пород также выполняется. Изменение длительности и амплитуды возбуждающего АС, а также расстояния до излучающей поверхности от принимающего ЭМС датчика влекут изменения в АЧХ ЭМС.

1.4. О механизмах разрушения горных пород

Наиболее изученными являются процессы, связанные с механическими напряжениями в горных породах. Можно считать, что по данным проведенных исследованиях наблюдается связь параметров ЭМИ, деформации и разрушения. Поэтому уместно кратко рассмотреть современный взгляд на механизмы разрушения горных пород.

Трещинообразование является важным физическим процессом в горных породах. Прочность горных пород определяется прочностью связей между атомами в кристаллах и на контактах кристаллов. Разрушение первоначально имеет локальный характер и может быть связано с разрывом наиболее слабых связей или с неравномерностью распределения напряжений при нагружении породы [125]. При этом различного рода дефекты структуры являются концентраторами напряжений, что способствует перенапряжению связей на таких участках и облегчает разрыв [126].

Величина напряжений больше вблизи участков поверхности включения с малым радиусом кривизны. С приложением внешней нагрузки резко увеличивается концентрация напряжений и область их действия. Причем вблизи включений, поверхность которых характеризуется наличием участков с малыми радиусами кривизны, концентрация напряжений возрастает в несколько раз. Чем меньше радиус кривизны, тем больше градиент и концентрация напряжений [39, 127, 128].

Как указано в работах Петрова В.А [129, 130] процесс формирования очага разрушения разделяется на две стадии: рассеянного накопления микротрещин, спонтанно приводящего к их укрупнению, и лавинного их роста вплоть до разрушения и прорастания магистральной трещины отрыва.

Куксенко В.С. в [131] отмечает, что процесс разрушения различных по физическим свойствам материалов, в том числе и горных пород, сложный и многостадийный процесс, протекающий на нескольких масштабных уровнях. При многообразии поведения гетерогенных тел и при нахождении их в поле действия механических напряжений эти тела обладают общими закономерностями. Зарождение микротрещин, дальнейшее их накопление и переход к формированию очага разрушения является самой общей закономерностью, лежащей в основе разрушения твердых тел. Впоследствии возникает магистральный разрыв, который распространяется со скоростью распространения упругих волн [131].

В работе Пимонова А.Г., Иванова В.В. [132] теоретически показано, что пуассоновский характер процесса трещинообразования является физической моделью электромагнитного излучения трещин на первой стадии разрушения горных пород (процесс стационарный). Стационарный процесс в этом случае обосновывается термофлуктационным механизмом [133] при развитии и образовании трещин. При следующей, второй стадии, наблюдается локальное увеличение действующих напряжений и лавинное нарастание числа микротрещин. В этом случае пуассоновский поток становиться возрастающей функцией времени и сам поток нестационарным. Длительность этой стадии много меньше, чем первой [129].

В работе Куксенко В.С., Инжеваткина И.Е., Манжикова Б.И. и других соавторов [134] в качестве критерия формирования очага разрушения используются временные интервалы между возникновением микротрещин (на второй стадии разрушения наблюдается сокращение интервала между этими событиями).

В работе Воробьева А.А., Тонконогова М.П., Векслера Ю.А. [133] подчеркивается, что объяснить процесс разрушения на основе теории упругости невозможно, поэтому необходимо ввести дополнительные условия. Впервые такие условия выдвинул Гриффитс, который предположил, что при мгновенном росте одной из трещин происходит полное разрушение материала с большим количеством мелких трещин. При этом у концов трещины возникает концентрация напряжений, а образование новой поверхности связано с затратой энергии на преодоление молекулярных сил сцепления.

В основе термофлуктуационной теории прочности по С.Н. Журкову лежит кинетическая концепции твердых материалов, которые находятся в поле механических напряжений [135]. По этой концепции, время при абсолютной температуре T и растягивающем напряжении σ до разрушения тела t подчиняется уравнению:

$$t = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma' \sigma}{kT},$$
где: $\tau_0 = 10^{-12} - 10^{-13}$ с – период одного теплового колебания; U_0 – энергия активации разрушения связи; σ – напряжение; γ' – структурно-чувствительный коэффициент; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Из уравнения видно, что кинетическая концепция учитывает строение тела и предполагает, что атомы, расположенные в узлах кристаллической решетки, совершают тепловые колебания. По этой концепции увеличение размеров трещины представляется процессом, при котором происходит последовательный разрыв связей в вершине трещины, в случае действия механических напряжений и флуктуации тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, которые приводят к разрыванию связей в теле. В местах расположения микротрещин и различных дефектов начинается разрыв связей. Таким образом, сущность этой концепции состоит в том, что разрыв материала происходит постепенно, а не одновременно. Начинается он с места, на котором имеются перенапряжения, т.е. самый опасный очаг разрушения, который сравним с теоретической прочностью. Здесь начинается разрыв. Следом идет разрушение в новых дефектных местах. Таким образом, С. Н. Журков впервые рассмотрел хрупкое разрушение как процесс и исследовал во времени его развитие в отличие от разрушения по Гриффитсу, которое происходит со скоростью звука.

Дефекты структуры реальных твердых тел приводят к снижению их прочности. Вейбулл, Френкель Я.И., Конторова Т.А. рассчитали зависимость прочности от объема, полагая, что разрушение тела происходит вследствие развития наиболее опасного дефекта (слабого звена). Прочность тел одинакового объема будет иметь различия из-за различного числа дефектов и неоднородностей в них.

Протодьяконов М.М., Чирков С.Е., [136] говоря о прочности тела, замечают, что она зависит от вида напряженного состояния и от качества поверхности тела. Поскольку растяжение характеризуется большей вероятностью возникновения новых трещин, чем сжатие, влияние размеров тела на прочность более эффективно при растяжении [137]. Влияние поверхностного слоя связано с размещением в нем опасных трещин и большей части дислокаций.

В работе [133] Воробьев А.А., Тонконогов М.П., Векслер Ю.А. указывают, что процесс разрушения состоит в образовании статистически распределенных по объему тела микротрещин, подрастания их и развитии наиболее опасной трещины с критической длиной. Разрушение является кинетическим процессом, зависящим от условий образования и роста трещин, то есть зависящим от действующих нагрузок, времени и температуры.

Булат А.Ф. и Хохолев В.К. [137] указывают, что пластическая деформация в вершине трещины предшествует каждому скачку трещины (рост пластической зоны).

Результаты лабораторных и теоретических исследований процессов, предшествующих хрупкому разрушению горных пород [138], показывают, что оно протекает не мгновенно, а подготавливается в течение длительного времени. Причем разрушение среды под действием напряжений происходит на микроуровне задолго до возникновения макроразрыва.

Хрупкое разрушение горных пород наблюдается не только при разрушении образцов под прессом, но и при проявлениях горного давления различных масштабов [139]. Общим, связывающим такие разные разномасштабные явления, как разрушение образцов в лабораторных условиях, выбросы угля, породы и газа, обрушения, землетрясения, является единство процесса. Во всех случаях под воздействием механических напряжений происходит деформирование твердого материала и его частичное разрушение. Источники энергии у них разные, а непосредственные причины - механические напряжения - одни и те же. Хотя масштабы лабораторных, шахтных и природных процессов различны и множество деталей совершенно несхожи, но принципиальное единство отмечается во всех условиях [136].

Булат А.Ф. и Хохолев В.К. [137] на основе экспериментальных данных указывают, что макроразрушение гетерогенных твердых тел, в частности горных пород, осуществляется после накопления и кластеризации микротрещин до критической концентрации, т.е. процесс разрушения носит иерархический характер, проходя ряд промежуточных состояний, характеризуемых определенным уровнем кластеризации. Различие этого процесса у разных пород очевидно. Используя концентрационный критерий укрупнения трещин [138] и исходя из величин имеющихся дефектов структуры и нагружаемого объема, можно определить, через какое число шагов укрупнения произойдет его разрушение, а зная длительности формирования очагов и время между их возникновением, можно прогнозировать характер разрушения.

Образование макродефектов у различных горных пород происходит не одинаково. Так у гранита такое дефектообразование происходит при нагрузке 0.7 P_{cm} , у кварцита при (0.8-0.9) P_{cm} , а у песчаника при 0.5 P_{cm} [138].

Разрушение пород в земной коре может происходить только при действии на их связи растягивающих сил, которые появляются при касательных механических напряжениях в условиях сжатия. Одной из таких сил может быть высокое электрическое поле [39].

В работе [128] указывается, что средняя напряженность поля, требующаяся для зарождения и развития разрушения, составит величину 10⁵-10⁶ В/м.

Возмущение в земной коре, приводящие к появлению механических растягивающих сил, которые компенсируют всестороннее сжатие, могут возникнуть за счет притяжения Луны или других небесных тел. В местах существования глубоких разломов земной коры значение всестороннего сжатия может быть заметно ниже. Это значительно увеличит вероятность

зарождения разрушения в ней, что не противоречит существованию зон с повышенной сейсмичностью [125, 128].

1.5. Связь характеристик акустической и электромагнитной эмиссий при механическом воздействии

В процессе механической нагрузки на горные породы происходит их деформирование с образованием трещин и их развитием до разрушения объекта. Этот процесс сопровождается акустической эмиссией (АЭ), которая развивается по мере роста количества и размеров трещин, а также деструктивных зон. Максимального значения амплитуда АЭ достигает во время макроразрушения. Почти одновременно с появлением АЭ регистрируется и ЭМЭ. В исследованиях [140-143] показано, что импульсы АЭ, которые возбуждаются отдельными трещинами, регистрируются в диапазоне частот от сотен герц до сотен килогерц. Форма таких сигналов имеет вид затухающих колебаний. В этом частотном диапазоне фиксируется и ЭМЭ. В работе Хатиашвили Н.Г. [69] указывается о существовании связей между АЭ и ЭМЭ. К появлению флуктуационного заряда приводит разрывание ионных связей при формировании трещин. При этом их неравномерное движение отвечает за генерирование ЭМЭ. Следует отметить, что при механическом воздействии на горные породы, в кристаллах минералов, содержащихся в горных породах, до момента, когда произойдет образования трещин, появляются дислокации, в том числе и окруженные «шубой» заряженных точечных дефектов. При прохождении через них акустических волн также генерируются ЭМС. Выявлено, что при прохождении упругой волны через кристаллы в горной породе с частотой колебаний v_a , регистрируются ЭМС. При этом та же частота колебаний v_a преобладает в спектре возбуждаемых электромагнитных сигналов [100].

Теоретические и экспериментальные исследования импульсов АЭ, проведенные в [144, 145] и исследования ЭМЭ, которые были проведены Ивановым В.В. в [47] выявили, что формы импульсов имеют идентичный характер. В случае, когда в сплошной среде образуется разрыв, происходит резкое увеличение размеров смещения берегов образованных трещин, которое достигает максимальных значений. На этом этапе наблюдается наибольшая скорость колебательного движения. После этого происходит сначала замедление трещины, затем ее стабилизация и наконец, торможение. Такие же результаты были получены при измерении относительной разности потенциалов или напряженности электрического поля от времени развития разрушения. В работах [101, 146], описано соотношение между энергией электромагнитного поля и акустической эмиссией: $m_0 = \delta_0^2 / \sigma_{\kappa\rho} \cdot \varepsilon$ где, δ_0 - поверхностная

плотность электрических зарядов; $\sigma_{\kappa p}$ - «критическое напряжение развития трещин. Оно будет зависеть при развитии трещин от поверхностной энергии, а также от модуля упругости, коэффициента Пуассона, от величины скачка трещины и ее стартовых размеров»; ε - диэлектрическая проницаемость.

В работе Шаминой О.Г. [147] и Молоцкого М.И. [105] уточняется, что при нагружении известняка и искусственного материала, которые моделируют неоднородный материал, образуются различные типы акустических волн. При ультразвуковом воздействии на образцы горных пород в процессе нагружения происходит изменение параметров поперечных и продольных волн, связанное с трещинообразованием. При нагружении в исследуемом материале конкурируют два процесса. Первый из них – это нарушение сплошности материала при образовании трещин отрыва и трещин сдвига, а второй - это уплотнение образца по направлению приложенной нагрузки. Все это способствует изменению характера образования трещин. В результате параметры акустических волн могут существенно изменяться, например, такие как ширина спектра, энергетические характеристики и максимум спектральной частоты. Однако между различными типами волн сохраняется некоторый энергетический баланс.

В работе Динариева Д. [148] и Jagasivamani V. [106] предлагается использовать электромагнитный отклик среды в процессе прохождения сейсмического сигнала в горном массиве. Это позволит мониторировать динамические явления в земной коре. В этом исследовании количественная теория электромагнитных явлений выстроена для случая распространения сейсмических сигналов в твердых средах. В теоретическом исследовании Ласукова В.В. [149] приведено физическое обоснование электромагнитного метода контроля диэлектрических гетерогенных материалов. Указывается, что в случае, когда нормированным однократным ударом производится возмущение механических колебаний, то это способствует появлению тока смещения. В свою очередь, ток смещения будет зависеть от скоростей изменения: объемной плотности элементарных источников и дипольного момента. Величина поверхностных зарядов, их пространственная структура и амплитуда колебаний определяется для исследуемых образцов физико-химическими свойствами их внутренних областей.

В работах [150-153] также указывается, что прохождение акустических волн вызывает генерацию ЭМС, которая может быть связана с колебаниями двойных электрических слоев. При моделировании распространения акустического возбуждения и его воздействия на имеющиеся неоднородности в исследуемых образцах горных породах может быть произведено с использованием пьезоэлектрического излучателя [152, 154]. В работах [155, 156] приведены математические расчеты и их результаты при изменении параметров ЭМС в модельном дефектном диэлектрическом материале слоистой текстуры в процессе акустического

возбуждения. Выявлено, что в результате механоэлектрических преобразований происходит передача энергии акустических сигналов в энергию ЭМС. Амплитудно-частотные параметры ЭМС зависят от характеристик акустических импульсов и зарядового состояния имеющихся дефектов и слоистой текстуры.

Таким образом, проведенный анализ литературных источников по проблеме связи АЭ с изменением параметров ЭМЭ дает возможность утверждать, что при различном механическом воздействии на гетерогенные твердые материалы, включая горные породы, будут происходить механоэлектрические преобразования. Результат таких МЭП происходит генерирование ЭМС в диапазоне радиоволн. Наиболее перспективным методом механического возбуждения, который позволяет оценивать качество гетерогенных диэлектрических материалов и проводить контроль по регистрируемым характеристикам ЭМЭ и параметрам ЭМС, является акустическое воздействие.

1.6. Об использовании метода инфракрасной радиометрии

Использование метода ИК термографии в качестве неразрушающего и бесконтактного метода для изучения процессов прогрессирующего повреждения и механизмов разрушения образцов различных материалов и горных пород, подвергаемых статическому сжатию и наложению вибрационного возбуждения, началось с конца 80-х начало 90 -х годов 20 века. Этот метод позволяет видеть возникновение нестабильного распространения трещин и дефектов, когда увеличение необратимого трещинообразования активируется вибрационной нагрузкой [157, 158]. В более поздних работах метод инфракрасной термометрии был использован в качестве способа, с использованием которого появляется возможность для диагностики и выявления изменения напряженного-деформированного состояния горных пород. Этот способ основан на применении эффекта, заключающегося в изменении температуры при деформировании твердотельного объекта исследования [159]. При механическом воздействии на твердые тела и их разрушении появляются температурные градиенты, которые вызываются преобразование механической энергии в тепловую. При этом освобождение тепла происходит или за счет механического гистерезиса, или вследствие пластической деформации, которая возникает при движении трещин и последующем разрушении. С увеличением механического воздействия напряжения концентрируются на Это приводит к образованию микротрещин. микродефектах твёрдого тела. Такие микротрещины, когда нагрузка достигает критического уровня, консолидируются в магистральные трещины, приводящие к разрушению твёрдого тела [160]. В работе [161] проведена оценка методом ИК термографии усталостного поведения бетона, а в работе [162]

41

методом ИК термографии и наземным лазерным сканированием проведен анализ камнепадов на горных склонах. Также исследование нестабильности горного склона приведено в работе [163]. Здесь показано, что для глубокого исследования склона было проведено горизонтальное бурение скважин и сейсмоактивная разведка для оценки толщины породы со слабыми механическими свойствами. Контуры наиболее неустойчивых областей вдоль склона были очерчены с помощью изображений ИК – термографических измерений. Это давало информацию о поведении теплового излучения породы, составляющей поверхностный наклон.

Инфракрасная термография была протестирована и для изучения состояния гидроразрыва сочлененных породных масс и предложен индекс скорости охлаждения для корреляции с геоструктурными характеристиками [164]. Применимость и надежность ИК термографии для картирования открытых трещин, ослабленных зон горных склонов и псевдокарстовых пещер, которые могут указывать на зоны отрыва в глубоко укоренившихся деформациях гравитационного склона и глубокозалегающих горных породах или в районах потенциальных источников камнепадов в неустойчивых скалах показана в работе [165].

Однако приведенные исследования не проясняют связей и закономерностей изменения параметров теплового излучения при моделировании разрушения горных пород для диагностических целей развития деструктивных процессов, в том числе и развития геодинамических явлений.

Предварительные исследования [166, 167] показали эффективность использования этого метода для поиска мест с повышенным напряженно-деформированным состоянием участков породного массива. Это выражается в увеличении температуры в окрестностях контрольных или разгрузочных скважин. Выявлению физических основ инфракрасного свечения горных пород путем исследования этого явления в лабораторных экспериментах и натурных условиях работающего рудника и направлена часть настоящей работы.

Физическое моделирование процесса разрушения котлована в горизонтальных слоях на основе ИК-термографии проведено в работе [168]. Здесь ИК термография характеризует механические отклики для модели при нагрузке двумя этапами, то есть устойчивыми и нестационарными стадиями деформации. В условиях нагрузки для мелкой добычи полезных ископаемых (500 м) ИК термография развивается на более высоких уровнях, а режим отказа модели демонстрирует мелкомасштабную и постепенную деформацию, тем самым обозначая «стадию стабильной деформации». Напротив, для условий нагружения, имитирующих глубокую добычу руды (800-2600 м), уровни ИК термография намного меньше, чем в мелкой добыче, и эволюционируют квазициклически с несколькими локальными пиками. Механическое поведение модели чувствительно к изменениям напряжений, и поэтому они называются «стадией нестационарной деформации».

В работе [169] исследованы характеристики акустического и термического инфракрасного излучения углей, подверженных ударному воздействию, при одноосном сжатии и условиях циклической нагрузки.

Кроме того, метод ИК термометрии используется не только для оценки механических повреждений в массивах горных пород, но и для развития разрушения в других диэлектрических материалах. Так в работе [170] предложены два экспериментальных метода количественного термоупругого деформационного анализа для определения полей поверхностных деформаций в механически нагруженных ортотропных материалах с использованием пространственного распределения градиента температуры, измеренного с поверхности. Циклические нагрузки применяются к ортотропным композитным образцам для достижения адиабатических условий. Небольшое изменение температуры поверхности, возникающее в результате изменения энергии упругой деформации, измеряется с помощью инфракрасной камеры с высокой чувствительностью, синхронизированной с приложенной нагрузкой. А в работе [171] исследуются два метода термографических испытаний с целью разработки новых технологий обработки композитов из углеродного волокна для определения характеристик на месте при испытании на усталость. Пассивный термографический подход используется путем измерения повышения температуры образца из-за гистерезисного нагрева во время тестирования усталости. Представлена концепция определения коэффициента механических потерь (демпфирования) от повышения температуры. Этот коэффициент потерь служит мерой для повреждения материала.

Второй метод характеризует активный подход, при котором импульсная инфракрасная термография совместно с фототермическим нагревом используется для определения повреждения по толщине изделия через теплопроводность. В исследовании [172] ИК термография используется для обнаружения дефектов в железобетонных конструкциях и главным образом в стенах очистных и мостовых сооружений. Применение импульсной фазовой термографии в области гражданского строительства для обнаружения и локализации дефектов в железобетонных конструкциях оказалось очень успешным. Импульсная фазовая термография не только позволяет значительно усилить термические контрасты из-за наличия дефектов подповерхностного слоя с использованием фазовых изображений, но также позволяет уменьшить влияние неоднородностей нагрева (при активном термографическом анализе) или изменения цветовых оттенков (в пассивной термографии анализ). Анализ полученных результатов показал, что была достигнута цель при использовании инфракрасной термографии для улучшения обнаружения дефектов под поверхностью. Этот метод заслуживает особого интереса. Разумеется, следует иметь в виду, что его применение в области неразрушающего

43

контроля гражданского строительства непросто и что многие трудности остаются и должны быть решены для повышения его эффективности.

1.7. Постановка задачи исследования

Таким образом, в предыдущих параграфах настоящей главы приведен анализ изученности механизмов и разработанных моделей генерации электромагнитных сигналов диэлектрическими твердотельными материалами и горными породами, проанализированы механизмы разрушения горных пород и связь характеристик акустической и электромагнитной эмиссий при механическом воздействии, осуществлены исследования направлений применения инфракрасной радиометрии для целей мониторинга развития деструктивных процессов в образцах и массивах горных пород. Проведенный анализ и исследования показали, что для разработки и создания метода мониторинга и краткосрочного прогноза развития геодинамических явлений в подземных сооружениях по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии необходимо решить определенные задачи.

Необходимо разработать и создать стенды и средства для исследования в лабораторных условия параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии твердотельных гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород при акустическом возбуждении и одноосном механическом нагружении, в том числе в постоянных электрических или магнитных полях. При этом разработать методику исследования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при контакте горных пород с водными растворами.

Параллельно с лабораторными исследованиями необходимо разработать и создать приборы для мониторинга в натурных условиях шахтных полей рудников параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии, в том числе при возбуждении взрывом массива горных пород.

В дальнейшем математически смоделировать и экспериментально определить амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом воздействии на образцы с различными структурными особенностями, электрическими, сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами, при поляризации образцов и приложении электрического и магнитного полей, а также образцов, контактирующих с солевыми водными растворами.

Экспериментально выявить закономерные связи амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии образцов горных пород на разных этапах подготовки и развития разрушения при одноосном механическом нагружении.

Разработать методические рекомендации по выбору мест установки приборов электромагнитного мониторинга геодинамической обстановки в натурных условиях шахтного поля рудников и исследовать параметры электромагнитных сигналов и характеристики электромагнитной эмиссии при развитии геодинамических событий в период релаксации массива горных пород после мощных технологических взрывов в шахтном поле Таштагольского рудника.

Построить феноменологическую схему возникновения и развития геодинамических явлений в массивах горных пород при взрывных воздействиях. Для чего установить закономерные связи изменений напряженно-деформированного состояния горных пород с амплитудно-частотными параметрами электромагнитных сигналов и характеристиками электромагнитной эмиссии породного массива. На основании полученных закономерностей определить диапазоны наиболее эффективных частот для мониторинга образования и развития геодинамических проявлений различного характера.

Разработать алгоритм и схемы информационной системы мониторинга и краткосрочного прогноза развития геодинамических событий по параметрам ЭМС и характеристикам ЭМЭ массива горных пород.

Глава 2. Горно – геологическая характеристика Таштагольского железорудного месторождения

Для проведения работ по выявлению связей изменений параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной и акустической эмиссий с изменениями напряженно-деформированного состояния массива горных пород был выбран рудник Таштагольского филиала АО «ЕвразРуда». Добыча железной руды в нем ведется шахтным способом на глубинах от 380 до 800 м, что обеспечивает надежную отстройку от атмосферных электромагнитных помех. На массив горных пород на Таштагольском месторождении действуют и гравитационные, и тектонические силы. В руднике в процессе проведения исследований производились технологические взрывы с закладкой от десятков килограмм до 300 тонн взрывчатого вещества (ВВ), которые способствуют возникновению деструктивных зон и развитию геодинамических процессов в массиве горных пород. Кроме того, основная масса геодинамических проявлений проходит в шахтном поле рудника или в окружающем целике вблизи него. Преимуществом для проведения исследований на Таштагольском руднике является наличие квалифицированной службы по прогнозу и предупреждению горных ударов и сейсмостанции, входящей в ее состав и обслуживающей рудник, а также желание и обеспечение работ руководством шахты и АО «ЕвразРуда». Это обстоятельство способствовало получению необходимых данных о взрывных и очистных работах, сейсмике и геодинамической обстановке на руднике. Для выяснения физических основ генерации использовали электромагнитных сигналов также реальные образцы горных пород Таштагольского рудника, изготавливаемые из кернов и имеющих различную проводимость.

2.1. Описание железорудного Таштагольского месторождения и характеристика тектонических нарушений

Описание железорудного Таштагольского месторождения наиболее полно изложено в работах [4, 5, 173]. Таштагольское железорудное месторождение находится в середине Горной Шории на юго-востоке Кемеровской области России в 160 километрах от г. Новокузнецка. Первые сведения о месторождении поступили в 1931 году. В строении Таштагольского месторождения содержатся метаморфической породы, неравномерно зернистые структуры эффузивных горных пород и сиениты. Присутствуют также осадочные породы. Под воздействием температуры и давления в зонах разломов в присутствии флюида происходят процессы твердофазного минерального и структурного изменения горных пород. В результате происходят превращения задействованных в этих процессах пород в разнообразные сланцы. Наблюдаются значительные горизонты карбонатсодержащих пород. Залежи магнетитовой руды имеют отдельные пластовые или линзовые формы. Местами эти формы сближаются и соединяются рудными перемычками. Как показано на рисунке 2.1 рудные тела на Таштагольском месторождении крутопадающие [173].



Рисунок 2.1 – Таштагольское железорудное месторождение. Геологический план и геолого – геофизические разрезы по профилям 3 и 44 [173]

По горизонтали (по простиранию) они имеют размеры от 300 до 760 м, в высоту или по падению их размер от 500 до 1000 м и более при средних мощностях пластов и линз от 40 до 70 м. Рудное поле расчленено системой трещин. При этом трещины простираются практически вдоль меридиана, а также в северо-западном и северо-восточном направлении. Установлены также в юго-восточной и северо-западной частях месторождения новые слепые рудные линзы. В рудных телах содержание железа от 36,35% до 57,41% [4, 5]. В магнетитовой руде Таштагольского месторождения не содержится цинк. Большой процент содержания железа и отсутствие цинка в руде Таштагольского месторождения положительно отличает его от других месторождений Кондомской группы. Среднее содержание серы в них составляет 0,25%, цинка всего 0,05%, а фосфора не более 0,14% [4, 5]. Руда Таштагольского месторождения пригодна для плавки без существенного и экономически затратного обогащения.

Происхождение Таштагольского железорудного месторождения обусловлено контактово-метасоматическими процессами, обусловленными магматическими И метаморфическими изменениями при минералообразовании. Эти же процессы связаны с формированием месторождений полезных ископаемых [4, 173]. На геологическом плане Таштагольского месторождения и на геолого-геофизических разрезах по профилям (рисунок 2.1) видно, что рудные тела столбообразной и линзообразной формы круто падают в северозападном направлении. Рудные тела содержат магнетит разной структуры и с различной текстурой. В них наблюдается разнозернистый, серый, тёмно-серый и черный магнетит. Присутствуют прожилками и реже с гнезда кальцита [173]. Имеются отдельности с мелкозернистым вкраплением кальцита. Текстура рудных тел разнообразная, переходящая из однородной в неоднородную.

Как показали наблюдения в горных выработках Таштагольского рудника, контакты вмещающих пород с рудой практически везде четкие и хорошо выражены. Основной состав вмещающих руду пород: эпидот-гранатовые скарны, большей частью мелкозернистые; зеленосерые сланцы в основном трещиноватые с плитчатой разнообразностью и сиениты с неравномерной зернистостью. Дайки по простиранию и с разным размером между берегами трещины в основном заполнены мелкозернистым микросиенитом и зеленовато-серым диоритовым порфиритом [4, 5].

В шахте Таштагольского месторождения присутствует система тектонических нарушений, которые разбивают шахтное поле на блоки размером в десятки и сотни метров. По классификации М.В. Раца они относятся к нарушениям первого порядка [174]. Из-за наличия тектонических нарушений и под действием изменяющегося напряженно-деформированного состояния массива происходит смещение блоков, которые носят характер либо сбросовый, либо сдвиговый.

К нарушениям первого порядка принадлежат крутопадающие зоны. Эти нарушения разрезают рудные тела под углами $20-30^{\circ}$. Исходя из рисунка 2.1, падение нарушений западное с крутизной угла падения от 75 до 90⁰. При этом простирание этих нарушений северо-западное, а их мощность находится в интервале от 0,5 до 3 м [4, 173]. К нарушениям первого порядка относится разлом Диагональный, пересекающий по диагонали Центральную часть шахтного поля и являющийся границей между рудными телами 1 и 6-9. Второй Диагональный разлом прослеживается северо-западнее Диагонального и параллельный ему. Кроме того, к нарушениям первого порядка относятся Оперяющая зона, расположенная между Диагональным и Вторым Диагональным разломами, а также Нагорный разлом, расположенный юго-восточнее Диагонального и параллельный ему. В выделенных нарушениями первого порядка зонах горные породы сильно выветрены и раздроблены. Эти перемятые породы содержат гидроокислы, окислы железа и марганца. С глубины 450 м от поверхности при добыче железной руды наблюдаются пологие тектонические нарушения, которые также относятся к нарушениям первого порядка, только в горизонтальных плоскостях. При этом направление падения этих нарушений северо-западное с углами не более 5-30⁰, а простирание пологих зон близкое к меридиональному.

Мощность зон нарушений такая же, как у разломов. Пологие зоны секут рудные тела под прямым углом. Особенно хорошо пологие зоны прослеживаются в этажах минус 140 – минус 210 (глубина 590 – 660 м), минус 210 – минус 280 (660 – 730 м), минус 280 – минус 350 (730 – 800 м) [4, 173].

2.2. Гидрогеологическая характеристика месторождения

В зоне расположения Таштагольского железорудного месторождения климат умереннохолодный со значительным количеством осадков в течение года. Это верно даже для сухого месяца. Климат здесь классифицируется как Dfb системой Кеппен-Гейгера. Температура здесь в среднем 1.9 °C. Выпадает около 497 мм осадков в год. Наименьшее количество осадков выпадает в феврале. В среднем в этом месяце количество осадков составляет 14 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в июле, в среднем - 82 мм. На рисунке 2.2 представлены колебания температуры и осадков в течение года. Средние колебания температуры в течение года от 36.0 ° C [175].

Кроме того, добыча железной руды ведется в непосредственной близости от реки Кондома. В связи с этими обстоятельствами шахта Таштагольского рудника обводнена, местами сильно, и требует постоянной откачки воды. Наибольшей водонасыщенностью обладают зоны тектонических нарушений, особенно зоны смятия и дробления.



Номер месяца в году

Рисунок 2.2 – Изменение в течение года средних значений количества осадков (гистограмма синего цвета) и изменения температуры (линия красного цвета) по данным Climate-Data.org. [175] в районе Таштагольского железорудного месторождения

Обводнены трещины, контакты рудных и вмещающих пород, а также известняки. Минимальной водонасыщенностью обладают однородные массивы и блоки горных пород. Возрастание водообильности происходит на участках с перемешанностью различных пород. Влажность рудных тел находится в интервале 0,2-1,74%, [175].

2.3. Физико-механические свойства пород и руд Таштагольского месторождения

Руды Таштагольского месторождения по физико-механическим свойствам однородные [4, 5, 8]. Плотность руд высокая, но, как указывалось в разделе 2.1, рудные тела изрезаны трещинами и разбиты на блоки различной величины. По данным работ [4, 5, 8] для пород и руды коэффициент крепости соответствует величинам 12-14, а в отдельных случаях достигают 16. Коэффициент крепости уменьшается до 5-10 в зонах контактов рудных и вмещающих пород, в местах тектонических нарушений и в зонах развития трещиноватости. На особом месте по крепости располагаются скарны, так как они являются крепкими и вязкими породами. У этих пород коэффициент крепости и находится в интервале 14-16. Сиениты обладают меньшей крепостью. Коэффициент крепости у них достигает величин от 8 до 13. В сиенитах развита сеть трещин разной мощности, которые заполнены кварц-кальцитовым минеральным составом. Еще меньшим коэффициентом крепости до 10 обладают порфириты. Только в эпидотизированные

порфиритах коэффициентом крепости достигает значений до 14-15. Коэффициент крепости понижен у метаморфических сланцев и туфа и изменяется в пределах от 9 до 12, при этом в местах тектонических нарушений он снижается до 5-6. Эти породы имеют разную величину рассланцованости и выглядят в виде плитчатых отдельностей. Коэффициент крепости известняков имеет пониженные значения в интервале 8-9 [4, 5, 8] из-за наличия трещиноватости, слабой рассланцованности и обводненности.

Как указывалось в разделе 2.1 дайковые породы содержат диорит, диоритовый порфирит и микросиенит. Поскольку по большенству даек проходят зоны сдвижения блоков, то эти породы сильно трещиноватые и имеют формы плитчатой отдельности. В этих породах при технологических проходках горных выработок отмечаются вывалы. Это свойственно при прохождении даек мощностью до 1.0 м. Коэффициент крепости дайковых пород находится в диапазоне 8-12 с понижением до 5-6 в зонах трещиноватости и тектонических нарушений. При возрастании глубины добычи железной руды количество даек значительно увеличилось [4, 5]. Добыча руды на Таштанольском руднике основана на взрывной технологии с последующим ведением очистных работ. Как показывает практика при добычи таким способом магнетитовая руда и вмещающие породы способны накапливать значительную упругую энергию, в отдельных случаях до 10⁹ Дж [6-8, 176]. В лабораторных исследованиях горные породы Таштагольского месторождения под нагрузкой на прессе проявляют себя упруго вплоть до разрушения. При этом процесс разрушения проходит за очень малый промежуток времени и подобно взрыву [7]. В таблице 2.1 представлены некоторые физико-механические свойства минералов и горных пород, в основном слагающих Таштагольское железорудное месторождение.

Таблица 2.1 – Физико-механические свойства минералов и горных пород Таштагольского месторождения

No	Горные породы,	Удельный	Модуль Юнга,	Коэффициент	Скорость
П.П	минералы	вес,	Е, 10 ¹⁰ Па	Пуассона,	продольного звука,
		$\sigma, 10^3 \text{кг/m}^3$		μ	С _р , м/с
1.	Магнетит	5,17	23,1	0.206	7400
2.	Магнетитовая	3.5 - 4.2	6.0 - 11.8	0.12-0.33	5900-6100
	руда				
3.	Пирит	5.02	29.99	0.16	7900
4.	Скарн	2,81	8.2	0.19 -0.33	6100
5.	Сиенит	2.63	8.8	0.23 - 0.33	6100
6.	Диабаз	2.85	6.2 – 11.3	0.11 - 0.25	6500
7.	Диорит	2.95	5.5 - 8.8	0.2 - 0.25	6100
8.	Порфирит	2.75	3.5 - 6.0	0.2 - 0.22	6100
9.	Кальцит	2.71	8.1	0.28 - 0.35	6700
10.	Известняк	2.3 - 2.6	1.5 - 4.0	0.2 - 0.3	4600

Видно, что написанное выше по тексту о коэффициенте крепости пород хорошо сочетается с физико-механические свойства минералов и горных пород Таштагольского железорудного месторождения.

Технология добычи железной руды на Таштагольском месторождении основывается на том, что, прежде всего, горные породы в естественных условиях залегания находятся в изменяющемся напряженно-деформированном состоянии в результате сжатия гравитационными силами вышележащих горных пород, тектоническими силами при смещениях вдоль разломов, а также под действием сил, создаваемых температурными градиентами и геохимическими процессами [7]. Кроме того, для Таштагольского месторождения характерны повышенные горизонтальные напряжения из-за наличия пологих разломов.

За счет гравитационных сил напряженное состояние горных пород на глубине 100-150 м соответствует 2-3 МПа, а на глубине 1000 м не превышает 20-30 МПа. В свою очередь тектонические силы создают напряжения до десятков тысяч МПа [177]. Так по данным этого же автора [177] горные породы Таштагольского месторождения при одноосном сжатии имеют прочность в пределах 40-250 МПа, а для магнетитовой руды средняя прочность несколько выше и находится в пределах 77-250 МПа. Для реальных горных пород модуль упругости отличается от модуля Юнга для этих же пород и соответствует значениям (6.0-11.8)·10⁴ МПа, при этом коэффициент Пуассона равен 0.2-0.3. По данным указаний по безопасному ведению работ [7] и Федеральных норм в области промышленной безопасности на Таштагольском месторождении опасными по горным ударам и «стрелянию» признаны горные породы: сиениты, туфовые сланцы, диориты и скарны. При этом опасносность по горным ударам и «стрелянию» начинается с глубины 400 м [178]. В работе [11] отмечается, что «стреляние» горных пород началось с отметки по глубине 300 м, а проявление горных ударов – с глубины в 600 м. Кроме того, при работе над методом мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических явлений по параметрам электромагнитной эмиссии горных пород Таштагольского месторождения надо учитывать тот факт, что максимальные главные горизонтальные напряжения в нетронутом массиве в 2.5 раза выше вертикального [7, 178]. Такое же горизонтальное напряжение наблюдается в зоне влияния очистных работ.

В результате модельных исследований [22] установлено, что на расстоянии 16 м от выработанного пространства наблюдается зона разгрузки, т.е. участок с пониженными напряжениями, а далее напряжения увеличиваются. Длина зоны опорного давления, т.е. участка с повышенными напряжениями, достигает 30 м. Расчёты показали, что максимальное опорное напряжение составляет 190 МПа [179]. Такие напряжения значительно превосходят предел прочности при одноосном сжатии горных пород Таштагольского месторождения. Этим и

52

объясняется наибольшая интенсивность проявления горных ударов в шахтном поле Таштагольского рудника.

Систематические наблюдения за деформированием вмещающих пород по реперам разной направленности в теле массива установлено, что его повышенная динамическая активность, а также большинство крупных горных ударов находятся в непосредственной связи с деформированием массива по всей глубине рудника [180-182]. В работах Вагановой В.А. и Лобановой Т.В. показано, что частота проявления горных ударов соответствует интенсивности процессов сдвижения горных пород. При этом связь и проявление этих процессов находятся в непосредственной зависимости от действующего геотектонического поля напряжений, физикомеханических свойств горных пород и геометрии выработанного пространства в шахтном поле Таштагольского рудника. При проведении исследований электромагнитной эмиссии в руднике надо помнить, что за счет гравитационных сил увеличение глубины добычи руды и изменение геометрии выработок может приводить к существенному изменению напряженнодеформированного состояния горных пород и, соответственно к активизации геодинамических проявлений, которые могут оказывать влияние на безопасность проведения горных работ на руднике. В этой связи на Таштагольском и других рудниках всегда стоит проблема своевременной оценки напряженного состояния массива в местах проведения работ и, соответственно, применение новых современных и надежных методов мониторинга и контроля развития геодинамических явлений. К таким методам относится электромагнитная эмиссия горных пород, изменения ее характеристик и параметров отдельных электромагнитных сигналов при перестройке НДС массива. Наиболее эффективно электромагнитные методы будут работать при комплексном использовании с акустическими и сейсмическими данными.

2.4. Условия формирования горного удара

На Таштагольском месторождении в массиве горных пород в результате действия геотектонических процессов и проведения добычи руды с использованием энергии взрывов до 300 тонн ВВ имеются раздробленные зоны, сильная трещиноватость и зоны перемятости [6-8, 177, 178, 183]. В обе стороны от раздробленной зоны упругие свойства пород возрастают, что приводит к образованию на переходном участке зоны повышенных напряжений (опорного давления). Участки повышенных напряжений существуют и у контактов пород. Для условий Таштагольского месторождения ширина участка повышенных напряжений достигает 10 м, при этом максимум напряжений располагается в 5-7 м от контактов пород или нарушенных зон [10, 177]. Впереди забоя выработки в массиве пород также существует зона опорного давления. При приближении выработки к зоне опорного давления от раздробленной зоны, в целике между ней и забоем, в результате наложения зон опорного давления, резко возрастают напряжения. В определенный момент эти напряжения превышают предельные нагрузки пород на сжатие. В результате возникает интенсивное разрушение края призабойного массива горных пород и развитие геодинамического явления в виде горного удара [177, 178]. В работе [177] отмечается, что в отличии от горных ударов горно-тектонические удары и толчки зарождаются в целике массива вдали от горных выработок.

Ведение горных работ вызывает перераспределение напряжений на больших площадях вокруг очистного пространства и накопление энергии упругого деформирования на некоторых участках в глубине массива пород. На определенном этапе происходит разгрузка массива в направлении образованных в ходе работ пустот, сопровождаемая толчкообразными подвижками по границам структурных блоков, слагающих горный массив. Деформируясь, блочный массив пород переходит в новое состояние по уровню напряженности, стремясь к устойчивости [10, 177, 178].

Сравнивая между собой типы динамических проявлений горного давления с позиции возникновения и развития процессов деструкции в массиве горных пород, которые способствуют проявлениям горного давления, можно сделать вывод о том, что вид динамического проявления определяется главным образом местоположением очага проявления: располагается ли он на контуре, в целиках и бортах выработок, или в глубине массива пород на значительном расстоянии от очистного пространства. При этом надо учесть, что для возникновения любого вида проявления горного давления в динамической форме необходимо наличие напряжений в массиве пород, которые должны превышать предел прочности либо монолитного массива, либо массива с системой трещин, либо предел прочности горных пород, имеющих геологические нарушения, зоны контактов пород, образованных полостей, горных выработок, очистного пространства и т.д. [9, 10, 177, 178].

2.5. Электрические и магнитные свойства горных пород Таштагольского железорудного месторождения

Для исследования МЭП преобразований при развитии геодинамических процессов в массивах важное значение имеют электрические и магнитные свойства слагающих их горных пород [184]. Преимущественное преобладание какого-то из этих свойств влияет на выбор регистрируемой электрической или магнитной составляющей импульсного электромагнитного поля, возникающего при МЭП преобразованиях в массиве горных пород при развитии

54

геодинамических явлений. Это же обстоятельство необходимо учитывать и при создании регистраторов электромагнитных сигналов, возникающих в процессе МЭП преобразований в горных породах.

Одним из основных электрических свойств горных пород является их способность проводить электрический ток. Эта способность характеризуется удельной электропроводностью или обратной ей величиной – удельным электрическим сопротивлением:

$$\rho = RS/L$$

где R – полное электрическое сопротивление образца породы, S и L, соответственно, площадь поперечного сечения и длина образца. Удельное электрическое сопротивление ρ измеряется в единицах Ом·м в системе СИ. На удельное электрическое сопротивление оказывает существенное влияние минералогический состав горных пород. С другой стороны, удельное электрическое сопротивление даже для породы с одним минералогическим составом различается в зависимости от ее структуры и текстуры, объема и размера пор, электрическим сопротивлением флюидов, насыщающих поры, и минерализацией воды, температурой, давлением и другими физико-химическими воздействиями [185-187]. Несмотря на эти обстоятельства, удельное электрическое сопротивление для разных пород находится в определенных пределах. В таблице 2.2 представлены некоторые электрические и магнитные свойства минералов и горных пород, в основном слагающих Таштагольское железорудное месторождение [185-188].

N⁰	Горные породы,	Удельное электрическое	Диэлектрическая	Магнитная
П.П.	минералы	сопротивление,	проницаемость,	восприимчивость,
		ρ, Ом·м	3	ж , 10 ⁻⁵ ед. СИ
1.	Магнетит	$5 \cdot 10^4 - 10^2$	7,0-9.0	средняя 5·10 ⁶
2.	Магнетитовая	$10^2 - 10^1$	30-35	150000 - 500000
	руда			
3.	Пирит	$10^4 - 10^1$	12 - 81	1500
4.	Скарн	$10^6 - 10^7$	-	125 - 1250
5.	Сиенит	$10^6 - 10^7$	7-14	1 - 8000
6.	Диабаз	$5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$	8-23	0 - 15000
7.	Диорит	$10^3 - 10^7$	8.6 - 10.8	1000-70000

Таблица 2.2 – Электрические и магнитные свойства минералов и горных пород Таштагольского железорудного месторождения [185-188]

Общая оценка удельного электрического сопротивления горных пород приведена в работе [186]. Изверженные и метаморфические породы обладают большим ρ в пределах 500-

7.5 - 8.7

8 - 12

210 - 3800

7 - 12

50 -2500

 $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$

 $5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{12}$

 $10^3 - 10^6$

Порфирит

Известняк

Кальцит

<u>8.</u> 9.

10.

10000 Ом·м. У осадочных пород сопротивление снижается до 100-1000 Ом·м. В обломочных осадочных породах, находящихся в зонах сдвижения или в дайках, удельное сопротивление зависит от размера зерен кристаллитов, составляющих породу. Удельное электрическое сопротивление в глинах, суглинках, супесях и песках при их переходах из одного типа в другой изменяется в интервале от единиц до сотен Ом·м.

Оценка диэлектрической проницаемости є показала, что она меняется в зависимости от обводнения горных пород. В изверженных горных породах є находится в интервале 5-12 безразмерных единиц, в осадочных породах – у сухих в интервале 2-3, а у насыщенных водой пород до 16-40 безразмерных единиц [186].

Измерения относительной магнитной проницаемости μ показало, что у большинства пород она близка к магнитной проницаемости воздуха. Только у ферромагнитных горных пород μ может увеличиваться до 10 единиц.

Важным при исследовании электромагнитной эмиссии горных пород в радио- и инфракрасном диапазонах длин волн является понимание естественной и наведенной электрохимической активности горных пород. Электрохимическая активность способствует поляризации и возникновению электрических полей под действием ряда физико-химических процессов: диффузионных, диффузионно-абсорбционных фильтраций вод в пористой среде, окислительно-восстановительных реакций на контактах минералов с электронной и ионной проводимостью.

Диффузионная активность определяется в основном концентрацией растворов электролитов, соприкасающихся с водой. На границе контактов водных растворов электролитов происходит концентрационная диффузия ионов в направлении меньшей насыщенности. Анионы и катионы электролитов из-за различной подвижности создают асимметрию в распределении зарядов на этих контактных границах. В результате диффузии в менее концентрированном растворе создается избыток подвижных в более ионов, а концентрированном – избыток мало подвижных ионов. Возникающее при этом электрическое поле противодействует дальнейшему развитию диффузионного процесса с разделением зарядов и, как следствие, наступает равновесное состояние и относительно устойчивый двойной электрический слой. Механические колебания этих слоев обязательно будут сопровождаться электромагнитной эмиссией. Значения электрохимической активности а зависит от минерального состава горных пород, глинистости, пористости, влажности, минерализации подземных вод и других природных факторов. При этом величина коэффициент α может меняться от минус 10-15 мВ как у чистых песков, до плюс 20-40 мВ у глин. У диэлектрических горных пород с высокой прочностью коэффициент α близок к нулю, но может достигать сотни милливольт для руд с электронопроводящими минералами [186, 189]. Для Таштагольского

месторождения – это сульфиды и магнетит. Насыщенность минеральной водой горных пород является обязательным, но недостаточным условием поляризуемости большинства изверженных, метаморфических и осадочных пород. Максимальная величина их поляризации менее 2% [186].

Магнитные свойства горных пород определяются их минералогическим составом, содержанием и соотношением в них ферро-, пара- и диамагнитных минералов, а также структурой. Магнитные свойства пород могут иметь значения от единицы до десятков тысяч 10⁻⁵ единиц СИ. На практике используют классификацию горных пород по магнитным свойствам, предложенную Д.Л. Берсудским [188].

Одной из характеристик магнитных свойств горных пород и минералов служит магнитная восприимчивость, которая устанавливает связь между действующим магнитным полем и магнитным моментом или намагниченностью вещества в этом поле. Объёмная магнитная восприимчивость \varkappa может быть записана как $\varkappa = J/H$, где J - намагниченность единицы объёма вещества, а Н - напряжённость намагничивающего магнитного поля. Магнитная восприимчивость является величиной безразмерной и измеряется в безразмерных единицах в зависимости от используемой системы единиц при выражении Ј и Н. При этом Берсудский Д.Л. разделил все породы по магнитной восприимчивости на пять групп [188]: немагнитные, очень слабомагнитные, слабомагнитные, магнитные и сильномагнитные. К немагнитным он отнес в основном осадочные породы с $\varkappa < 50 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Часть кислых магматических, метаморфических и осадочных пород были отнесены к очень слабомагнитным, у которых \varkappa составляла (50–100) · 10⁻⁵ ед. Си. Слабомагнитные горные породы должны иметь \varkappa = (100-1000) · 10⁻⁵ ед. СИ. Это часть осадочных, магматических и метаморфических пород. У магнитных горных пород $\varkappa = (1000-5000) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. К этой группе относятся магматические часть метаморфических пород. У сильномагнитных пород значения магнитной И восприимчивости *ж* должны превышать значения 5000·10⁻⁵ ед. СИ. К магнитным породам относится и руда Таштагольского месторождения.

Таким образом, образцы горных пород и массив Таштагольского железорудного месторождения является в настоящей диссертации объектами исследований при разработке методов и средств мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических событий по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии. Таштагольское месторождение содержит горные породы и минералы, характеризующиеся разными физико-механическими свойствами: удельным весом, модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, скоростью продольного звука, прочностью (таблица 2.1). Из-за высокой прочности и крепости горных пород Таштагольского месторождения возможно значительное накопление механической энергии, которая высвобождается при геодинамических проявлениях. Кроме

того, некоторые горные породы Таштагольского месторождения характеризуются повышенной электризацией и высоким удельным сопротивлением, а другие породы обладают высокой магнитной восприимчивостью и низким удельным сопротивлением (таблица 2.2). Это обстоятельство указывает на необходимость применения разных методов, методик и типов датчиков (емкостных или индукционных) в зависимости от горной породы, содержащейся в образце, от геологии и геолого-геофизических свойств наблюдаемого участка массива горных пород.

Глава 3. Методы и аппаратура исследования горных пород в лабораторных и натурных условиях

Исследования горных пород по выявлению их физических свойств, в том числе и выявление параметров и характеристик МЭП преобразований при подготовке и развитии разрушения и геодинамических проявлений требует получения максимального количества информации. Это обусловлено сложными и неповторимыми структурно-текстурными особенностями каждого образца или блока массива горных пород. Приведенное обстоятельство требует комплексного и одновременного применения разнообразных методов исследования подготовки и развития разрушения горных пород и методов их диагностирования.

3.1. Применяемые методы исследования

Для решения поставленных задач использовались современные методы математического и физического моделирования, лабораторные и натурные экспериментальные методы выявления закономерных связей динамики напряженного состояния горных пород с параметрами электромагнитных сигналов, с характеристиками электромагнитной и акустической эмиссий, с сейсмическими наблюдениями и инфракрасной радиографией. Применялись современные методы и аппаратура для выявления физических свойств и процессов, поясняющих полученные закономерности.

Осуществлялось математическое моделирование связи амплитудно-частотных параметров акустических импульсов, возникающих при разрушении неоднородных образцов одноосным сжатием, и электромагнитных сигналов на акустическое воздействие. Расчеты подвергались экспериментальной проверке с использованием стенда для исследования механоэлектрических преобразований в гетерогенных средах при одноосном сжатии до На стенде в лабораторных условиях измерялись и в последующем разрушения. анализировались параметры электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии при одноосном сжатии образцов рудных и нерудных горных пород и внешнем акустическом воздействии. На этом же стенде проводились экспериментальные исследования изменений градиентов температур поверхности и воздуха в отверстиях в образцах рудных и нерудных горных пород при их нагружении одноосным сжатием или сдвигом. В процессе экспериментов были установлены градиенты температур поверхности образцов горных пород при возникновении и развитии в них деструктивных зон, а также максимальные температуры поверхности образцов, предшествующие их разрушению. Измерялись распределение зарядов на поверхностях образцов в стационарном состоянии и токи поляризации при нагружении горных

пород одноосным сжатием. Исследовались изменения амплитудно-частотных характеристик электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении и приложении к образцам горных пород электрического и магнитных полей. Экспериментально и математически моделировались изменения амплитуды и частоты акустико-электромагнитных преобразований в слоистых структурах. Моделировалось изменение параметров электромагнитных сигналов при контактах водных солей разной концентрации с горными породами при акустическом возбуждении. В экспериментах использовались электромагнитные и акустические методы мониторинга зарождения и развития процессов разрушения горных пород. Использовался метод измерения и анализа отшелушивания частиц горных пород при подготовке разрушения. Кроме того, в процессе экспериментов применялся амплитудно-частотный анализ спектров электромагнитных сигналов при акустическом импульсном воздействии на разных этапах нагружения образцов одноосным сжатием.

Для натурных наблюдений использованы электромагнитные и акустические методы непрерывного мониторинга параметров ЭМС и АС. В комплексе с этими методами велись наблюдения сейсмической активности шахтного поля рудника. Для измерения тепловых полей применялся метод ИК радиометрии с использованием современных тепловизоров. Для наблюдения сейсмической обстановки в исследуемом районе анализировались данные сейсмостанции, обслуживающей Таштагольский рудник. Натурные исследования проводились на глубинах до 800 м при подготовке, проявлении и развитии геодинамических событий разной интенсивности во время технологических взрывов до 300 тонн взрывчатого вещества и в период релаксации горного массива, а также при проведении технологических работ. В результате таких исследований установлены закономерные связи параметров ЭМС и температуры с сейсмическими наблюдениями о техногенных и естественных сейсмических событиях. Кроме того, получены сведения об эффективности мониторинга развития геодинамических событий по параметрам электромагнитных сигналов, характеристикам электромагнитной эмиссии и изменениям температуры скважин в горных породах. В процессе выполнения проекта были использованы управляющие специализированные программы измерительных приборов, обеспечивающие проведение экспериментов, а также лицензионные программы LabVIEW, MatLab, Origin и другие программы для расчетов и обработки полученных экспериментальных данных.

60

3.2. Методы и аппаратура исследования параметров электромагнитных сигналов в лабораторных экспериментах

В предыдущей главе отмечалось, что наиболее эффективное излучение электромагнитных импульсов образцами гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород при нагрузках любого типа лежат в интервале от десятков герц до мегагерцового диапазона частот. В таком же диапазоне регистрируются и ЭМС массива горных пород [47, 73, 122, 190-193]. Амплитуда этих ЭМС фиксируется в интервале от десятков микровольт до десятков вольт. С одной стороны, амплитудные параметры ЭМС зависят от действующих напряжений в горных породах [194], а с другой стороны, определяются их прочностью [193, 195] и структурно-текстурным строением [196].

Как уже отмечалось выше в литературе подробно представлены исследования генерации ЭМС при возникновении и дальнейшем раскрытии трещин. Наряду с электроразрядным при разрушении работает акустикоэлектрический механизм генерации ЭМС, заключающийся в акустическом воздействии на двойные электрические слои, а также на сегнетоэлектрики. В натурных условиях рудников и шахт генерация ЭМС также может происходить под действием акустических колебаний, возникающих при прорастании трещин, при смещении пород по плоскостям скольжения в разломах и дайках, при ведении взрывных и очистных работ, а также при внешних сейсмических воздействиях. Акустические сигналы при своем распространении от своих источников, в том числе из развивающихся деструктивных зон породного массива взаимодействуют с двойными электрическими слоями, всегда присутствующими в горных породах. В результате такого взаимодействия происходят МЭП преобразования, сопровождающиеся изменением дипольного момента и, следствие, генерацией как электромагнитных сигналов, которые можно зарегистрировать аппаратурно. Сегнетоэлектрики при импульсных механических и акустических воздействиях в соответствие с прямым пьезоэлектрическим эффектом также излучают электромагнитный сигнал. В связи с этим необходимо было выявить электромагнитную активность горных пород на акустическое возбуждение, а также связь параметров ЭМС и акустического возбуждения. в том числе в присутствии постоянных электрических и магнитных полей.

Таким образом, проведение в лабораторных условиях экспериментальных исследований имело задачи выявления основных закономерностей МЭП преобразований в образцах горных пород в зависимости от их удельного сопротивления, структурно-текстурных особенностей, сегнетоэлектрических свойств, контактов с минерализованной жидкостью и других физических процессов в них. Кроме того, необходимо было определить влияние на параметры возбуждаемых ЭМС постоянно действующих электрических и магнитных полей. С другой

стороны, необходимо было выявить закономерности изменения параметров ЭМС при силовом нагружении образцов горных пород до разрушающих значений.

Для проведения лабораторных исследований в Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета (ПНИЛ ЭДиП ТПУ) мною разработано и под моим руководством изготовлено два стенда: стенд для исследования электромагнитной активности образцов горных пород при акустическом возбуждении и стенд для комплексных исследований параметров ЭМС при развитии процесса разрушения образцов горных пород.

3.2.1. Стенд для исследования электромагнитной активности образцов горных пород при акустическом возбуждении

Стенд для исследования электромагнитной активности образцов горных пород имел два варианта возбуждения акустических импульсов: с использованием обратного пьезоэлектрического эффекта в пьезоэлектрическом преобразователе [197] и с помощью удара шариком. Энергия удара шарика определялась экспериментально по скорости налета шарика на поверхность образца [183]. Кроме того, стенд использовался для определения продольных скоростей звука в образцах горных пород. На рисунке 3.1 представлена структурная блок-схема стенда акустического возбуждения ЭМС в образцах гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород.

Функционально стенд работает следующим образом. Образец (6) длиной $8 \cdot 10^{-2}$ м и диаметром $4.2 \cdot 10^{-2}$ м с помощью изготовленной струбцины (1 и 2), зажимали между пьезоэлектрическим излучателем акустических сигналов ПАИ (7) и пьезоэлектрическим приемником акустических сигналов ПАП (3). Электромагнитный датчик ЭМД (4) устанавливался на стандартный двухкоординатный оптический столик (5). Оптический столик позволял с помощью лимбов перемещать ЭМД по всей длине образца и отдалять его от образца на расстояние не менее 8 см с точностью 0,1 мм. При этом электромагнитный датчик не находился в контакте с исследуемым образцом.

Струбцина с образцом и пьезоэлектрическими датчиками располагалась на специальном сконструированном держателе. Держатель укрепляли на стандартном оптическом рейтере, расположенным внутри металлического короба, являющегося электромагнитным экраном (8). Оптический столик устанавливался на втором рейтере также внутри экрана.

На рисунке 3.2 приведена фотография изготовленной ячейки стенда для акустического возбуждения ЭМС в образцах гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород.



Рисунок 3.1 – Структурная блок-схема стенда для акустического возбуждения электромагнитных сигналов: 1 и 2-направляющие и зажимы струбцины, соответственно; 3пьезоэлектрический приемник акустических сигналов ПАП; 4-электромагнитный датчик ЭМД; 5-двухкоординатный оптический столик; 6-образец; 7-пьезоэлектрический излучатель ПАИ; 8электромагнитный экран; 9-генератор импульсов напряжения возбуждения ПАИ; 10автономный амплитудно-частотного регистратор РЭМС1 или РЭМАС1; 11-источник питания НY3005D; 12 – осциллограф Tektronix TDS2024B; 13-персональный компьютер

На электромагнитный датчик, присоединенный к автономному амплитудно-частотному электромагнитному регистратору (10) и(или) осциллографу Tektronix TDS2024B (12), от стандартного источника постоянного тока HY3005D (11) подавалось напряжение величиной 12 В. С генератора (9) на пьезоэлектрический излучатель ПАИ подавался одиночный импульс напряжения, который в соответствие с обратным пьезоэлектрическим эффектом излучал акустический импульс. Напряжение электрического импульса можно изменять дискретно 100, 200, 400, 600 или 800 B, а его длительность устанавливается в зависимости от поставленного задания в эксперименте по схеме (1, 5, 10, 50 или 100)·10⁻⁶ с.

Акустический сигнал, создаваемый ПАИ, через акустический контакт из минерального масла проходил в образец (6) и при взаимодействии с двойными электрическими слоями, имеющимися в образце или на его границах, возбуждал электромагнитные сигналы, которые принимал ЭМД. С датчика сигнал поступал на вход цифрового двухканального осциллографа Tektronix TDS2024B, а также, при необходимости получения дополнительной информации, на

вход регистраторов электромагнитных сигналов РЭМС1[198,199] или РЭМАС1 [200]. Полоса пропускания осциллографа 60 МГц, а чувствительность по входу 2 мВ/дел.



Рисунок 3.2 – Ячейка стенда для акустического возбуждения электромагнитных сигналов в образцах гетерогенных материалов и горных пород

В дальнейшем акустический сигнал проходил в пьезоэлектрический приемник (3), в котором преобразовывался в соответствие с прямым пьезоэлектрическим эффектом в электрический сигнал. Затем этот электрический сигнал записывался в память осциллографа по другому входному каналу и служил для запуска осциллографа, работающего в ждущем режиме. Согласование выходного сопротивления ПАП и входного сопротивления осциллографа Tektronix TDS2024B производилось с помощью согласующей встроенной в ПАП схемы электронного повторителя. С осциллографа зарегистрированный ЭМС передавался через порт RS 232 на персональный компьютер (13), где в дальнейшем подвергался обработке по программе быстрого преобразования Фурье. Регистраторы РЭМС1 или РЭМАС1 автономно с помощью программы преобразования Фурье производили амплитудно-частотный анализ ЭМС, а также усреднение данных измерений на установленных частотах.

3.2.2. Схемы электромагнитного приемника и повторителя напряжения

В качестве электромагнитных датчиков ЭМД для приема электромагнитных сигналов разработан и использован унифицированный емкостный дифференциальный датчик, схема которого приведена на рисунке 3.3. Емкостной электромагнитный датчик ЭМД (4) представляет собой усилитель с согласующим устройством (повторителем). Коэффициент усиления емкостного датчика имел два значения и при измерениях в зависимости от амплитуды входного ЭМС выбирался либо 10, либо 100. В емкостном датчике использованы малошумящие дифференциальные усилители АД8627 (ДУ) [201]. На входе датчика ДУ собраны с обратной связью усилители тока для обеспечения согласования высокого сопротивления принимающих пластин (Э) и входного сопротивления усилителя.





Кроме того, в емкостном датчике имеются фильтры нижних (ФНЧ) и верхних частот (ФВЧ), которые обеспечивают его работу в диапазоне от 1 до 200 кГц. На выходе емкостного датчика сигнал по мощности усиливается с коэффициентом 10 или 100.

Для согласования высокоомного выходного сопротивления ЭМД, а также для согласования выходного сопротивления пьезоэлектрических принимающих датчиков и входа усилителя регистратора РЭМАС1 были изготовлены унифицированные эмиттерные повторители (или усилители мощности), схема которых приведена на рисунке 3.4. Основой представленного схемного решения являлась микросхема DA1 К140УД12 (КР140УД1208, цА776), представляющая собой многофункциональный операционный усилитель с регулируемым потреблением тока, с внутренней частотной коррекцией и защитой выхода от короткого замыкания.

Микросхема использовалась в стандартном включении в качестве не инвертирующего усилителя с единичным усилением. Питание схемы двуполярное G1 и G2, которое осуществлялось от внутреннего источника регистраторов РЭМС1 или РЭМАС1. Электрические параметры микросхемы DA1 (потребляемый ток, входное сопротивление, скорость нарастания напряжения) задаются резистором R5.



Рисунок 3.4 – Принципиальная электрическая схема эмиттерного повторителя

Коррекция смещения нулевой линии осуществляется резисторами R3 и R4. Повторитель работает следующим образом. После включения питания на пульте управления РЭМАС1 кнопкой SB1 повторитель немедленно готов к работе.

Сигнал с датчика подается на разъем «Вх.» повторителя, через корректирующую емкость С1 и делитель напряжения R1, R2 попадает на не инвертирующий вход 3 DA1. Выходной сигнал снимается с вывода 6 DA1 через фильтр верхних частот C2-R7. С разъема «Вых.» сигнал подается на усилитель регистратора.

3.2.3. Возбуждение акустических импульсов ударом шарика

Возбуждение ЭМС в образцах гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород на созданном стенде можно производить с помощью удара шариком. В этом случае блок-схема измерения аналогична схеме, приведенной на рисунке 3.1. Отличие заключалось только в замене источника акустических импульсов. Вместо пьезоэлектрического излучателя ПАИ устанавливалась система акустического возбуждения образцов с помощью удара шариком. Динамическая система возбуждения акустических импульсов приведена на рисунке 3.5. С помощью пружинного устройства (3) шарик выстреливался, затем попадал в трубку измерительной системы определения его скорости пролета (1), ударялся по стальной закаленной пластинке толщиной 2.5 мм с волновым акустическому сопротивлением ρc , близким к $\rho_i c_i$ исследуемого материала, где ρ – плотность, c – скорость звука в материале образца. При этом твердость пластины была близка к твердости шарика. Пластина обязательно заземлялась, чтобы исключить электромагнитные помехи от заряда переносимого шариком. В результате удара в пластине возбуждался акустический сигнал с определенными амплитудными и временными параметрами.

66

Акустический импульс из пластины через слой минерального масла проходил в образец исследуемого материала или горной породы. В дальнейшем схема запуска осциллографа и измерения ЭМС была такой же, как на рисунке 3.1. Возбуждаемый шариком первичный акустический импульс имел форму, близкую к колокообразной, а длительность по основанию составляла 5.10⁻⁵ секунды.

Аналоговые сигналы с измерительной системы, приведенной на рисунке 3.6, поступали либо на измерительный восьмиканальный модуль NI BNC-2120 [202], либо на осциллографическую приставку Velleman PCS500 (4) [203]. Здесь аналоговый сигнал оцифровывался и в дальнейшем передавался на персональный компьютер ПК (5). Блок аккумуляторов (1) и (2) обеспечивал напряжение 6 В на фото- и светодиодах измерительной системы. Измерительная система для защиты от внешних электрических и радиопомех помещалась в электромагнитный экран стенда. В трубке измерительной системы высверливались отверстия и вставлялись оптоэлектронные пары, содержащие фотодиод (ФД) и светодиод (СД).

При разгоне пружинным устройством шарик, пролетая через измерительную систему, ударялся об контактную пластину. При пролете шарик перекрывал отверстия между ФД и СД. В результате на мониторе ПК наблюдались два импульса, возникающих при налете шарика на пластину и отскоке от нее. Время пролета шарика между оптическими парами измерялось с использованием специальных программ PC-Lab2000 или для BNC-2120 по вступлению импульсов на мониторе компьютера. Расстояние между центрами оптических пар было постоянным и составляло $5 \cdot 10^{-2}$ м. Причем расстояние ближайшей оптопары до точки соударения шарика составляло не более 10^{-1} м.



Рисунок 3.6 – Трубка со светодиодами для измерения скорости пролета шарика

Таким образом, легко вычислялась скорость шарика в момент удара. Поскольку время пролета шарика до удара составляло $(t_{n1}-t_{n2})$, а расстояние между центрами оптопар *L*, то скорость шарика вычислялась по формуле

$$V_{w_1} = \frac{L}{t_{n_2} - t_{n_1}}.$$
(3.1)

Скорость отскока вычисляли по второй паре импульсов, появляющихся на экране монитора ПК. Здесь расчет осуществлялся из соотношения

$$V_{u2} = \frac{L}{t_{nA} - t_{n3}},\tag{3.2}$$

Измерение скоростей для каждого образца производилось не менее 10 раз и в дальнейшем полученные значения скоростей усреднялись. Погрешность измерения составила 3% для налетающего шарика и 15% при отскоке шарика. Используя вычисленные скорости и массу шарика (*m*), а также приближение упругого соударения шарика о заземленную металлическую пластинку, без учета потерь энергии акустического импульса в пластине на нагрев, вычисляли энергию акустического воздействия (*E*), передаваемую образцу, как

$$E = \frac{m(V_{u1}^2 - V_{u2}^2)}{2}.$$
 (3.3.)

Начальная скорость налета шарика изменялась путем устройства, обеспечивающего сжатие или ослабление пружины. Изменение сжатия пружины позволяло вводить энергию акустического воздействия на исследуемый образец в пределах (8÷15)·10⁻³ Дж.

Надо отметить, что обе схемы акустического возбуждения электромагнитных сигналов в гетерогенных диэлектрических материалах и горных породах использовались для определения продольной скорости звука в исследуемых образцах.

Таким образом, разработан и создан универсальный стенд для определения электромагнитной активности гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород при импульсном детерминированном акустическом воздействии, для измерения продольной скорости звука в исследуемых твердотельных образцах, а также для определения логарифмического декремента затухания детерминированного акустического импульса, используемого для возбуждения ЭМС. При этом возбуждающие акустические импульсы могут создаваться как с помощью обратного пьезоэлектрического эффекта пьезоэлектрическими излучателями, так и с помощью удара шариком и иметь заданную форму и длительность.

3.2.4. Стенд для комплексных исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии при развитии процесса разрушения образцов горных пород

Для выявления закономерностей изменения параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии на различных этапах подготовки и развития разрушения при одноосном сжатии под руководством автора настоящей диссертации в ПНИЛ ЭДиП ТПУ был разработан и создан стенд на основе автоматизированного пресса ИП-500.1 [204]. Как уже отмечалось выше, образцы горных пород индивидуальны и требуют получения максимальной информации о МЭП преобразованиях в них. В связи с этим обстоятельством предусмотрено присоединение к стенду других методик, обеспечивающих получение дополнительной информации о процессах, сопровождающих или предваряющих развитие разрушения в образцах горных пород. Эта информация важна для исследования процессов развития геодинамических явлений в шахтном поле Таштагольского месторождения и для создания метода мониторинга и прогноза развития геодинамических событий по параметрам ЭМС и характеристикам ЭМЭ.

Блок-схема базового стенда для исследования процессов МЭП при разрушении образцов горных пород приведена на рисунке 3.7. Одноосное сжатие осуществлялось на автоматизированном прессе с сервоклапаном. Между опорной (1) и подвижной (2) плитами на образце можно развивать усилие (P) до 500 кН. Этого усилия достаточно для разрушения при одноосном сжатии образцов любых горных пород с нагружаемой площадью около 20·10⁻⁴ м². На рисунке 3.8 приведена фотография образцов горных пород, предназначенных для исследования электромагнитной эмиссии при их разрушении на стенде с прессом.

Значения нагрузки и деформации, возникающих в процессе сжатия образца, записывались в память компьютера ПК (10) с использованием специальной программы, прилагаемой к автоматическому управлению прессом. К образцу через акустический контакт (минеральное масло) с помощью пьезоэлектрического излучателя ПАИ (3) вводился детерминированный акустический сигнал. Импульс напряжения на ПАИ подавался с импульсного генератора ГИ, так же как и на предыдущем стенде. Акустический сигнал, проходя через образец, регистрировался пьезоэлектрическим приемником акустических импульсов ПАП (7). Электрическая составляющая ЭМС, генерируемого образцом при прохождении акустического сигнала, принималась дифференциальным емкостным датчиком ЭМД (6) co встроенным усилителем мощности И записывалась с помощью многофункциональной платы ввода-вывода (5) для дальнейшего анализа его параметров. Описание ЭМД со встроенным усилителем мощности представлено в предыдущем параграфе.



Рисунок 3.7 – Блок-схема базового стенда для одноосного нагружения исследуемых образцов: 1 – опорная плита; 2 – подвижная плита; 3 – пьезоэлектрический излучатель акустических импульсов; 4 - генератор высоковольтных импульсов; 5 – многофункциональная плата вводавывода NI BNC 2120; 6 – электромагнитный дифференциальный емкостной датчик; 7 – пьезоэлектрический приемник акустических импульсов; 8 – система управления прессом с сервоклапаном; 9 – персональный компьютер для вывода акустических и электромагнитных сигналов; 10 – персональный компьютер для ввода задания сервоприводу пресса и вывода информации о прилагаемых напряжениях и деформации образца



Рисунок 3.8 – Вид образцов горных пород из Таштагольского железорудного месторождения, используемые для измерения параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии в процессе акустического возбуждения и разрушения одноосным сжатием или сдвигом

70

Сигналы с ЭМД и ПАП через многофункциональную плату ввода-вывода NI BNC 2120 или через осциллограф TDS 2024В [205] подавался на ПК (9). Одноосное сжатие проводилось подвижной траверсой пресса при постоянной скорости 0,3 Па/с. Управление прессом осуществлялось с помощью системы изменения усилий пресса с сервоклапаном (СУ), блоксхема которой представлена на рисунок 3.9. Система управления прессом разработана в ООО «НИЦКИМ Точмашприбор» (г. Армавир).

Система управления состоит: из персонального компьютера (ПК) с программами управления, записи, обработки, графического построения и вывода информации в текстовом формате и в виде графика «усилие-деформация»; блока управления (БУ); электрооборудования насосной установки (НУ); датчиков измерения силы (ДД) и перемещения (ДП). Исполнительным устройством блока управления являлся сервоклапан (СК) фирмы МООG, который обеспечивает подачу масла под давлением в блок подвижной плиты и заданную скорость изменения Р на образце. Для измерения давления использовался датчик «КОРУНД-ДИ» производства ФОЗТ «СТЕНЛИ», а для измерения деформации использовали датчик перемещения 7WA/500мм-L фирмы НВМ с рабочим диапазоном до 200 мм. Блок управления БУ обеспечивает работу сервоклапана в заданном режиме поддержки скорости нагружения испытываемого образца или заданного давления сжатия. В результате БУ может обеспечивать силовое нагружение образцов с заданной скоростью по программе с ПК как в линейном режиме, так и по ступенчатой или циклической схемам. В схеме управления задействовано электрооборудование насосной установки пресса ИП-500.1.



Рисунок 3.9 – Блок - схема системы управления изменением усилий пресса ИП-500.1

При проведении исследований на модельных образцах проводилось одноосное сжатии как линейно возрастающее, так и ступенчатое. Кроме того, изменяя конструкцию пуансонов, осуществлялись сдвиговые усилия вдоль наибольшей оси образцов.

На рисунке 3.10 приведена более полная система измерений параметров электромагнитных сигналов, характеристик электромагнитной и акустической эмиссий, токов поляризации, которые возникают при нагружении горных пород одноосным сжатием (Р) до разрушения.

В дополнение к уже приведенной схеме измерения электромагнитных сигналов добавлен блок автономного измерения электромагнитной и акустической эмиссий образца при его одноосном сжатии.



Рисунок 3.10 – Блок-схема расширенного стенда для одноосного нагружения исследуемых образцов:

1 – опорная плита пресса ИП-500.1; 2 – подвижная плита пресса ИП-500.1; 3 – регистратор электромагнитных сигналов с внутренней автономной памятью; 4 – электромагнитный датчик; 5 – пьезоэлектрический акустический датчик; 6 – запоминающий осциллограф TDS 2024В или 8-канальный измерительный модуль NI BNC 2120; 7 – электрод для измерения токов поляризации; 8 – электрометр Keitley 6517B; 9 – электромагнитный датчик; 10 – персональные компьютер; 11 – система управления прессом; 12 – персональный компьютер для ввода задач на СУ и сбора данных о их выполнении; 13 – электромагнитный экран

Датчики ЭМД 2 и АД, присоединялись к регистратору электромагнитных и акустических сигналов PEMC1. Регистратор производил запись во встроенную память усредненных за одну секунду значений интенсивности электромагнитной эмиссии и амплитуд ЭМС по трем частотным полосам с добротностью не более 10 и с центральными частотами 2
кГц, 15 кГц, 100 кГц, в широкой полосе частот (1÷100 кГц), а также средних значений амплитуд акустической эмиссии. С помощью программы вывода информация передавалась из памяти регистратора PEMC1 на компьютер для дальнейшей обработки и анализа. Параметры регистратора PЭMC1 приведены ниже. Другим добавленным блоком являлась система измерений токов поляризации с помощью электрометра Keitley 6517В [206]. Модель 6517В является 6 $\frac{1}{2}$ – разрядным электрометром и высокоомным измерителем со следующими функциональными характеристиками измерения: постоянного напряжения в диапазоне от 10⁻⁶ до 210 В; постоянного тока в интервале от 10⁻¹⁷ до 21·10⁻³ А; заряда в диапазоне от 10⁻¹⁴ до 2,1·10⁻⁶ Кл; сопротивления в интервале от 10 Ом до 210·10¹⁵ Ом. Электрод для измерения токов поляризации к образцу проводящим клеем на основе серебра, а электрометра измеренные данные передавались на ПК, где в дальнейшем обрабатывались и анализировались.

3.3. Методика и аппаратура для измерения процессов инфракрасного свечения отверстий в горных породах

При исследовании породного массива Таштагольского месторождения было выявлено инфракрасное (ИК) свечение разгрузочных скважин, пробуренных в опасных по динамическим проявлениям горных породах [166]. Ранее инфракрасное свечение наблюдали авторы работ [207, 208] Для выявления закономерностей изменения ИК свечения Шейнин В.И. и Блохин Д.И. исследовали термомеханические эффекты при нагружении одноосным сжатием образцов каменной соли [209]. В приведенных работах закономерностей изменения ИК свечения ИК свечения горных пород, а также механизмов возникновения такого свечения представлено не было.

Для физического моделирования процессов свечения скважин использовали образцы того же Таштагольского месторождения. Просверливалось отверстие на глубину 2/3 от диаметра образца и в дальнейшем на базовом стенде (рисунок 3.7) нагружали одноосным сжатием или, при определенной конфигурации пуансонов, сдвиговыми напряжениями вдоль наибольшей оси образца. Размер образцов: диаметр $4.2 \cdot 10^{-2}$ м, длина – $8 \cdot 10^{-2}$ м. Допускаемые отклонения от размеров образцов по диаметру не более $0.2 \cdot 10^{-2}$ м в меньшую сторону, а для длины до $0.4 \cdot 10^{-2}$ м больше, чем приведенный выше размер. Для выявления закономерностей изменения параметров ИК свечения использовали метод ИК радиометрии. К базовому стенду присоединяли камеру NEC NH9100 [210], обеспечивающую измерения ИК свечения в непрерывном режиме в диапазоне (8-14) $\cdot 10^{-6}$ м. Скорость съемки – 10 кадров/с. Чувствительность тепловизора NEC NH9100 составляла 0.04° С.

Измерения ИК свечения скважин и поверхностей в массиве горных пород проводили с использованием тепловизора IRISYS IRI 4010В [211] в таком же, как при моделировании в лабораторных условиях, диапазоне длин волн ИК свечения $(8-14)\cdot 10^{-6}$ м. Порог температурной чувствительности тепловизора IRISYS IRI 4010В составлял не менее 0,15°С.

3.4. Методика и аппаратура для измерения субмикронных частиц при деформировании горных пород до разрушения

В работе Викторова С.Д. и сотрудников [212] представлены результаты исследования эмиссии субмикронных частиц размером (0.3–5.0)·10⁻⁶ м при деформировании горных пород. В работе [212] использовался счетчик аэрозольных частиц НАND HELP 3013. С помощью счетчика определяли содержание частиц с разными размерами в воздухе, который прокачивали через измерительный объем. Но в работе не рассматривается связь эмиссии субмикронных частиц с электромагнитной эмиссией и ИК свечением горных пород, подвергаемых силовому нагружению до разрушающих значений.

Для установления таких закономерностей применялась одновременная регистрация электромагнитных сигналов, субмикронных частиц, а также инфракрасного свечения при деформировании горных пород до разрушения (рисунок 3.11). В экспериментах использовался в качестве анализатора аэродинамического диаметра частиц спектрометр APS 3321 [213]. Спектрометр обеспечивал измерения в диапазоне размеров частиц (0.5 - 20)·10⁻⁶ м в режиме реального времени. Спектрометр также имеет опцию измерения интенсивности рассеяния света, которая определяется размеру частиц в диапазоне (0,5 - 20)·10⁻⁶ м. Аэродинамический спектрометр частиц модели 3321 построен на технологии параллельного использования двух методов измерений, построенных на принципах рассеяния света и временной пролетной спектрометрии.

Высокую точность измерения обеспечивает один двухпиковый сигнал от каждой частицы, попадающей в оптическую систему контроля. В аэродинамической камере частица пролетает два последовательных пучка света от лазерного источника. В результате и образуются два сигнала, которые возникают при рассеянии света лазера на аэрозольной частице. Эти сигналы разнесены. Время между ними определяется временем пролета аэродинамической камеры. Спектрометр снабжен программным обеспечением, позволяющим контролировать работу прибора, а также предоставляет пользователю возможность управления файлами и выбор способов представления данных. Максимальная измеряемая концентрация 10^9 частиц на м³, а минимальная составляет 10^3 частица на м³ при расходе воздуха не менее 5 л/мин. Время отбора пробы задается произвольно от 1 с до 18 часов. Измерения производится

при прокачке воздуха спектрометром (3) через трубки (8), фильтр (7) и отверстие в образце диаметром $8 \cdot 10^{-3}$ м. При этом на экране спектрометра количество частиц выше $2 \cdot 10^{-6}$ м равно нулю. В образце горной породы просверливалось либо одно отверстие посредине продольной части образца, либо два отверстия на расстоянии (4-5) $\cdot 10^{-3}$ м от середины продольной части образца.

При наличии двух отверстий использовали два метода, о которых говорилось выше. Образец помещали в базовый стенд (рисунок 3.11) и нагружали либо одноосным сжатием, либо сдвиговыми напряжениями в специальных пуансонах. Затем до разрушения наряду с частицами записывалось в непрерывном режиме со скоростью 10 кадров/с тепловизором NEC NH9100 (4) инфракрасное свечение в отверстии и вокруг него.





1 – опорная плита пресса ИП-500.1; 2 – подвижная плита пресса ИП-500.1; 3 – спектрометр отслоившихся частиц ARS 3321; 4 – тепловизор NEC NH9100; 5 – 8-канальный измерительный модуль NI BNC 2120; 6 – электромагнитный датчик; 7 – фильтр спектрометра частиц; 8 – трубки спектрометра частиц; 9 – персональный компьютер; 10 – персональный компьютер для ввода задач на систему управления прессом (СУ) и сбора данных о их выполнении

Кроме того по базовой схеме с помощью ЭМД (6), 8-канального измерительного модуля NI BNC 2120 (5) и ПК (9) регистрировались электромагнитные сигналы, возникающие при развитии разрушения образца горной породы. Персональный компьютер (10) выполнял задачи ввода в систему управления прессом (СУ) задания на условия нагружения и сбора данных о их выполнении.

3.5. Метод и применяемая аппаратура для измерения поверхностного заряда

Основной величиной, характеризующей свойства диэлектриков, в том числе большинство минералов и горных пород, является поверхностная плотность заряда σ_n . Существуют различные методы измерения заряда. К ним относится метод электростатической индукции, метод индуцирования переменного тока в поле диэлектрика (вибрационный метод), компенсационный метод, метод электростатического взаимодействия, метод термодеполяризации и другие [214, 215].

Для исследования поверхностного заряда горных пород наиболее приемлемым и точным является вибрационный метод [214]. Этот метод основан на изменении воздушного зазора между электродом и диэлектриком. При изменении воздушного зазора в цепи, соединяющей электроды, появится ток (Рисунок 3.12). Зададим синусоидальное изменение зазора между электродом и диэлектриком l, тогда $l = l_0 + \Delta l \cdot sin\omega t$, где l_0 – средняя величина зазора, Δl – амплитуда колебания подвижного электрода относительно l_0 , ω – круговая частота колебания электрода. При периодическом изменении величины зазора в большую или меньшую стороны во внешней цепи через гальванометр G потечет переменный ток $I = C\omega \Delta l \sigma \cos \omega t$. В этой формуле $C = \varepsilon C/L \cdot l/(\varepsilon l/L + l)^2$ является коэффициентом, зависящим от размеров диэлектрика, величины зазоров l_0 и Δl , а также диэлектрической проницаемости материала диэлектрика.



Рисунок 3.12 – Схема индукции электрического тока при перемещении подвижного электрода в поле диэлектрика: а – минимальное приближение электрода к диэлектрику; б – максимальное отдаление подвижного электрода от диэлектрика; σ_{ind} – индуцированный заряд; G – гальванометр

Тогда измеряя амплитуду тока *I* и амплитуды колебаний подвижного электрода *∆l*, можно определить величину поверхностного заряда диэлектрика [214].

На рисунке 3.13 показан общий вид вибрационного прибор для реализации вибрационного метода определения заряда на поверхности диэлектрика.



Рисунок 3.13 – Общий вид вибрационного измерителя индуцированного переменного тока в поле диэлектрика для реализации вибрационного метода определения заряда на поверхности диэлектрика.

Прибор использовался для определения зарядового состояния поверхности срезов горных пород, которые перед этим шлифовались и подвергались сушке. В процессе измерения сравнивалось распределение заряда на поверхности образцов с их текстурой.

3.6. Автономные регистраторы электромагнитных и акустических сигналов для исследования электромагнитной и акустической эмиссий в лабораторных экспериментах и в натурных условиях рудных месторождений

Важным этапом в определении закономерных связей электромагнитных сигналов с подготовкой и развитием разрушения при силовом нагружении образцов горных пород, а также в исследованиях и выявлении связей развития деструктивных процессов и подготовки геодинамических событий в породном массиве в натурных условиях является создание автономных регистраторов электромагнитных сигналов. Как показали предварительные исследования, электромагнитные сигналы сопровождают изменения напряженнодеформированного состояния горных пород [216-218]. Поскольку одним из механизмов генерации ЭМС могут служить акустические возбуждения, то в создаваемых регистраторах необходимо предусмотреть регистрацию акустических импульсов [219, 220].

3.6.1. Развитие регистраторов электромагнитных сигналов

В процессе исследования электромагнитной эмиссии массивов горных пород под руководством профессора Воробьева А.А. в начале 79-х годов двадцатого столетия разрабатывалась и применялась различная аппаратура и регистраторы электромагнитных сигналов. Регистраторы разрабатывались в ПНИЛ ЭДиП ТПУ (г. Томск) [221-224], в Институте горного дела СО РАН (г. Новосибирск) [225, 226], в межотраслевом научном центре ВНИМИ (г. Санкт-Петербург) [227, 228], в Институт геофизики УрО РАН [229] и др. Изначально в качестве регистраторов ЭМС использовались ламповые приборы счета электрических импульсов ПС-10000. При работе на этих приборах требовалось постоянное присутствие оператора, записывающего показания через каждые 30 секундные. В дальнейшем аппаратура для измерения параметров ЭМС совершенствовалась в соответствии с элементной базой текущего времени.

После первых исследований ЭМЭ горных массивов в Красноярском крае, Кемеровской и Иркутской областях, после Ташкентского землетрясения в Узбекистане Самохваловым М.А., Горелкиным А.В. и сотрудниками ПНИЛ ЭДиП ТПУ были разработаны и изготовлены транзисторные специализированные приемники ЭМЭ [222]. В них электромагнитные сигналы преобразовывались и передавались на механический счетчик, показания которого также фиксировались оператором за установленный промежуток времени.

В дальнейшем был разработан радиоволновой индикатор напряженнодеформированного состояния (РВИНДС). Для индикации НДС использовались характеристики ЭМЭ. [223, 224]. Прибор изготавливался на базе радиометра СРП-68 и применялся при полевых наблюдениях динамики изменения НДС оползневых массивов по характеристикам ЭМЭ. В качестве приемника электромагнитных сигналов подключали индукционный датчик. Прибор работал на частотах 2 кГц и 17 кГц, а также полосе частот от 2 до 100 кГц при пороге чувствительности в 10 ·10⁻⁶ В. Измерялась также интенсивность счета импульсов, которая выводилась на стрелочный индикатор. Постоянная составляющая времени измерений выбиралась 2.5 или 5 секунд. Кроме того, регистратор РВИНДС хорошо зарекомендовал себя при профильных наблюдениях по пикетам с шагом 10-20 м [224]. Усовершенствованный вариант переносного прибора (РВИНДС-П), предназначался для суммирования числа электромагнитных импульсов, для измерения их частоты следования в диапазоне $10^2 - 10^5$ Гц. а также для усреднения амплитуды сигналов. Новая модификация РВИНДС-П оснащалась и индукционным, и емкостным датчиком. Это позволяло регистрировать ЭМС как по магнитной, так и по электрической составляющим электромагнитного поля. Усилитель прибора РВИНДС-П обеспечивал чувствительность по входу не менее $5 \cdot 10^{-5}$ В.

Недостатками регистраторов РВИНДС являлись: низкая чувствительность приемного тракта; малый промежуток времени стационарных наблюдений ЭМС; слабая защищенность от промышленных электромагнитных помех; отсутствие каналов регистрации акустических сигналов; невозможность оценивать геодинамическую обстановку в реальном режиме времени по параметрам и характеристикам ЭМЭ массива горных пород.

В дальнейшем в ТПУ разрабатывались приборы АИП [3-45]. В первый вариант регистратора АИП было заложено: измерение длительности ЭМС, его пиковых значений амплитуды и скважности. После регистрации им производился расчет статистических характеристик в заданном интервале времени на микро-ЭВМ и производил отображение их на мониторе, затем информация документировалась на магнитную ленту для внесения в банк данных [230].

Рабочий диапазон АИП для входных ЭМС по частоте находился в диапазоне от 0 до 50 кГц. Частота дискретизации входного сигнала соответствовала 500 кГц. Прибор имел два диапазона для измерения ЭМС по амплитуде: I диапазон – от 0 до $+1024 \cdot 10^{-3}$ B; II диапазон – от 0 до $+4096 \cdot 10^{-3}$ B. Погрешность преобразования аналогового сигнала в цифровой не превышала $4 \cdot 10^{-3}$ B. Диапазон длительностей измеряемых ЭМС находился в пределах $(0,01 \div 131) \cdot 10^{-3}$ с. Погрешность измерения длительности входного сигнала составляла $2 \cdot 10^{-6}$ с. Время усреднения записываемых сигналов задавалось оператором в секундном диапазоне. Прибор обеспечивал прием ЭМС с периодом следования входных сигналов от 0,01 до 655 секунд. Питание прибора осуществлялось от сети переменного тока 220 В +10 % частотой 50 Гц [230].

Регистратор АИП обеспечивал с помощью программного опроса определение пришедшего импульса ЭМС. При этом если во время обработки сигнала приходил другой сигнал, то программой он не воспринимался. В последующем прибор модернизировался и изготавливался как АИП-4. В прибор были включены индукционный датчик, анализатор характеристик импульсного электромагнитного потока и микро ЭВМ. На приборе с помощью микро ЭВМ по программе производили расчет положения импульса во времени, его пиковую амплитуду и длительность, а так же перезапись вычисленных данных через интерфейс RS232 на внешний ПК. Такая комплектность позволяла пользоваться различными каналами связи, что давало возможность получать информацию удаленному оператору [230].

Регистратор АИП-4 обеспечивал прием максимальной частоты следования ЭМС до 100 имп/с с амплитудой (50-300) $\cdot 10^{-6}$ В и длительностью входных сигналов 10^{-5} - 10^{-2} с. Управление регистратором осуществлялось с ПК по интерфейсу RS232. Напряжение питания АИП составляло 5 В ± 5% или 15В ± 10 %., а потребляемая мощность – 1.5 Вт

Новой модификацией АИП являлся мобильный анализатор импульсного потока МАИП-1. В состав МАИП-1 входили емкостной датчик, измерительный блок регистрации и измерения параметров ЭМС и блок ввода-вывода данных измерения на ПК. Регистратор обеспечивал определение длительности сигнала и фронта, его максимального амплитудного значения и временного разрыва между ЭМС. Чувствительность на входе прибора составляла $28 \cdot 10^{-6}$ В, а частотный диапазон приема сигналов находился в интервале (1–50) кГц. Коэффициент усиления изменялся дискретно в пределах 30, 300, 900, 3000, а разрядность АЦП составляла 8 бит. При этом частота дискретизации составляла 200 кГц. Длительность ЭМС находилась в диапазоне (0.02 - 20.4) $\cdot 10^{-3}$ с. Длительность и передний фронт входного ЭМС измерялись с погрешностью 5 $\cdot 10^{-6}$ с при частоте следования сигналов 20 кГц [230].

В результате анализа работы регистраторов АИП и МАИП выявились некоторые их общие недостатки. В первую очередь это большое энергопотребление, которое не позволяло даже в течение суток производить измерения ЭМС в автономном режиме. Во-вторых, это применение сложных систем запоминания параметров ЭМС и их воспроизведение, на то время в какой-то мере оправданное. Выяснился еще ряд недостатков: это малый диапазон рабочих частот; сложности с оцифровкой измеренных параметров ЭМС; отсутствие канала измерения параметров акустических сигналов; влияние промышленных электромагнитных помех из-за слабой защиты и их фильтрации; а также сложности в отображении параметров ЭМС в реальном режиме времени.

В межотраслевом научном центре ВНИМИ разрабатывался в различных модификациях регистратор «Ангел». Изначально регистратор «Ангел» предполагалось использовать для выявления участков с повышенной геодинамикой массивов горных пород и оползневых [227]. В принимающих датчиков использовались грунтов качестве индукционные преобразователи электромагнитных сигналов и сейсмоакустических полей. На выходе датчиков появлялись электрические колебания, которые связывались при анализе с изменением НДС массивов горных пород и оползневых грунтов. Аппаратура приспособлена для работы в подземных выработках, имеет защиту от пыли и газа. В шахтах регистратор «Ангел» может быть использован для контроля устойчивости горных пород. Прибор осуществляет прием и выборку поступающих от датчика сигналов, производит оценку параметров сигналов и их сравнение их установленными заранее пороговыми параметрами. Результаты оценки могут быть записаны на ПК для документирования.

Рабочий диапазон частот регистратора «Ангел» находится в интервале 10 - 50 кГц. Время установления рабочего режима не более 30 с. Время сохранения данных измерений не менее 100 ч. Электрическое питание регистратора осуществляется от аккумуляторного блока с напряжением на выходе 7,2 В. Потребляемый прибором ток в режиме измерения не более 45 мА. Время непрерывной работы регистратора без перезарядки или смены аккумулятора не менее 20 ч. Связь регистратора с ПК при перекачке данных через последовательный порт RS232. Управление работой прибора осуществляется оператором по командам с клавиатуры. Комплекс «Ангел» состоит из четырех частей: блока регистрации; приемная индукционная антенна; преобразователь акустической эмиссии; автоматическое зарядное устройство.

Гармонические электромагнитные помехи устраняются с помощью фильтров, которые включены в схемы индукционного датчика и блока регистрации и программной обработки. Кроме того, для целей исключения импульсных помех используется коэффициент электромагнитных помех, превышение которого, при программной оценке, производится дополнительная селекция для их устранения. Такая селекция производится только для периодических импульсных электромагнитных помех.

Программа регистратора «Ангел» оценивает уровни пиковых амплитуд ЭМС, соотношения амплитуд и суммарной удельной энергии импульсов. Кроме того, на экран прибора выводятся результаты этих оценочных данных, которые записываются также во встроенную память. Предполагалось, что удельная суммарная энергия отображает интенсивность импульсной составляющей ЭМС в месте расположения индукционного датчика, а показатели уровней пиковых амплитуд и соотношения амплитуд отображают структуру ЭМС [227].

Основными недостатками регистратора «Ангел» являются: слабая отстройка от электромагнитных помех; узкий частотный диапазон приема электромагнитных сигналов; невозможность регистрации ЭМС в течение длительного времени, в том числе и отсутствие возможности мониторинга параметров электромагнитных сигналов в реальном режиме времени, невозможность длительное время измерять параметры акустических сигналов, что очень важно при отсутствии сейсмостанции.

Последней разработкой межотраслевого научного центра ВНИМИ (г.Санкт-Петербург) является прибор «ANGEL-M» [228]. Аппаратура позволяет проводить локальную приближенную оценку напряженности массива в подготовительных и очистных выработках угольных шахт и рудников на базе метода регистрации естественного импульсного электромагнитного излучения. Новая модификация аппаратурного комплекса «ANGEL-M» в настоящее время проходит опытную эксплуатацию и наработку критериев на шахтах и рудниках России.

В регистраторе «ANGEL-M» использовался новый тип интерфейса USB 2.0 с реализацией Mass Storage Device класса. На компьютере он виден как внешний накопитель объемом 1Гб, с файловой системой FAT16. При считывании данных наблюдений пользователь переносит файлы измерений файловым менеджером из прибора в рабочий каталог на жестком

81

диске компьютера. Программа обработки работает с файлами из этого каталога, не взаимодействуя непосредственно с прибором.

Диапазон рабочих частот регистратора 5 -150 кГц. Частота дискретизации сигнала соответствует 467 кГц. Разрядность аналого-цифрового преобразования составляет 16 бит. Коэффициент усиления не более 30. Использованы аналоговые фильтры ФНЧ 1 порядка и ФВЧ 1 порядка. Напряжение питания прибора 7.2 В, а потребляемый ток (без антенны) составляет 60·10⁻³ А. Время непрерывной работы до перезарядки или смены аккумуляторов составляет 20 часов. Габаритные размеры регистратора составляют (225х165х55) мм, а вес - 1.5 кг [228].

В новом приборе недостатки остались прежними и с помощью него невозможно проводить длительное наблюдение изменений напряженно-деформированного состояния породного массива по параметрам электромагнитной эмиссии и передавать информацию удаленному наблюдателю или диспетчеру. Невозможно проводить в режиме мониторинга измерения, обработку и анализ параметров электромагнитных сигналов в реальном режиме времени.

В Институте горного дела СО РАН совместно с сотрудниками Новосибирского государственного технического университета разработаны регистраторы ЭМС серии РЭМИ. Последними модификациями этой серии были приборы РЭМИ-2 и РЭМИ-3. Приборы предназначались для диагностики НДС горного массива, предшествующего разрушению горных пород [225, 226]. В качестве основного параметра диагностики состояния массива горных пород использовалась мощность регистрируемого импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ). Предполагалось, что мощность ЭМС изменяется при смене стадийности во время подготовки разрушения на наблюдаемом участке горного массива. При превышении установленного порогового уровня среднеквадратичными значениями внешнего поля ЭМИ прибор выдает звуковой и световой сигналы. Кроме того, на цифровой индикатор прибора выводятся результаты измерений среднеквадратичных значений амплитуды ЭМИ. Таким образом, для прогноза разрушений участка горного массива вместо оценки мощности измеряемых электромагнитных сигналов используется среднеквадратическое значение регистрируемых ЭМС. Преобразование ЭМС в электрический сигнал производится на индукционном ферритовом датчике. Имеется также цифровой индикатор который для визуального контроля уровня электромагнитного излучения.

Основными недостатками РЭМИ-2 является невозможность длительного измерения во времени, накопления результатов измерений, предварительной их обработки для уменьшения количества выходных данных при мониторинге НДС горного массива.

Эти недостатки частично были учтены в приборе РЭМИ-3. С помощью этого прибора можно осуществлять длительное время мониторинг ЭМС в шахтах и рудниках, а также

82

выводить информацию о данных измерений в ПК для их обработки и анализа. Прибор РЭМИ-3 работает в частотном диапазоне от 10 Гц до 70 кГц при частоте дискретизации регистратора 200 кГц. Разрядность используемого АЦП соответствует 10. Чувствительность по входу составила 6 мВ/м. Интервал усреднения показаний на индикаторе выбран в течение 1 с. Объем энергонезависимой памяти соответствует 8 Мб при непрерывной регистрации до 8 часов [226].

Недостатки регистраторов РЭМИ такие же, как и в приборе «Ангел». Отсутствие дифференциального входа на канале регистрации ЭМС. Недостаточный частотный диапазон регистрации ЭМС. Нет возможности регистрации и анализа данных измерений ЭМС на различных частотах и в реальном режиме времени. Невозможность измерений параметров ЭМС и АС в режиме длительного мониторинга.

Таким образом, все приведенные выше регистраторы, используемые ранее или в настоящее время для контроля и мониторинга электромагнитных сигналов и связанные с ними изменения напряженно-деформированного состояния горных пород, в том числе в натурных условиях рудных шахт, обладают определенными недостатками. Это слабая защищенность от электромагнитных помех, узкий диапазон контролируемых частот, отсутствие возможности анализа изменения амплитуды ЭМС по частотам в реальном режиме времени.

Недостатки выше перечисленных приборов предполагалось учесть при разработке и создании автономных амплитудно-частотного регистраторов электромагнитных и акустических сигналов нового типа.

3.6.2. Автономный регистратор электромагнитных и акустических сигналов РЭМС1

Математическое и физическое моделирование механоэлектрических процессов в гетерогенных диэлектрических материалах [231, 232] и горных породах [190-193] показали, что для создания и продвижения метода мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород необходимо разработать автономные регистраторы электромагнитных и акустических сигналов.

3.6.2.1. Основные принципы построения аппаратно-программного регистратора РЭМС1

При разработке регистраторов нового типа необходимо было учитывать недостатки приборов, описанных выше в 3.6.1. При этом исполнение программно-аппаратного регистратора должно было быть построено на следующих основных принципах:

 возможность измерения параметров и характеристик электромагнитной эмиссии гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород при механическом нагружении и акустическом воздействии;

 возможность измерения параметров акустической эмиссии гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород при механическом нагружении образцов и развитии геодинамических процессов в натурных условиях;

- применение максимального подавления электромагнитных помех;

– высокая чувствительность принимающих трактов регистраторов: для приема электромагнитных сигналов не выше 10⁻⁵ B, а для акустических сигналов не более 5·10⁻⁵ B;

– расширенный диапазон частот в пределах (1-100) кГц;

- возможность получения информации на выделенных частотах 2, 15 и 100 кГц;

- измерение интенсивности импульсного потока ЭМС;

 предварительная программная обработка данных измерений ЭМС для уменьшения количества выводимой и передаваемой информации, предусмотреть усреднение данных измерений за 1 или 5 с;

 время работы в автономном режиме без замены или подзарядки аккумуляторов не менее 3 суток, при этом предусмотреть возможность замены блока питания;

 – для приема ЭМС разработать емкостные и индукционные датчики, а для приема акустических сигналов - пьезоэлектрические датчики.

– регистраторы должны быть мобильными, их весогабаритные размеры должны быть минимальными и позволяли переносить одному оператору средних силовых возможностей два комплекта регистраторов с датчиками, проводами и инструментарием на расстояние до 3 км;

 возможность функционирования при повышенной влажности и концентрации пыли не ниже IP53.

Как было показано в главе 1 настоящей работы, существует связь между параметрами электромагнитных сигналов с развитием процессов разрушения диэлектрических материалов. В результате для разработки физических основ и практического применения метода мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии под руководством и при непосредственном участии автора настоящей диссертации был разработан и создан первый вариант программно-аппаратного регистратора электромагнитных и акустических сигналов РЭМС1 [198, 199, 219]. Работа регистратора основана на принципах преобразования энергии электромагнитных сигналов посредством емкостного или индукционного датчиков в аналоговые сигналы с последующим усилением, оцифровкой, усреднением в установленный промежуток времени и запоминанием конечных данных на

встроенном носителе памяти. Такая же последовательность операций предусмотрена при регистрации акустических сигналов с пьезоэлектрического апериодического приемника [197, 233]. В дальнейшем, с помощью программы вывода, информация передавалась на ПК для графического построения и анализа [198, 199, 218, 234, 235]. В приемном тракте автономного регистратора РЭМС1 по электрической и магнитной составляющим электромагнитных сигналов реализована дифференциальная схема для подавления электромагнитных помех [236-238]. Чувствительность принимающих трактов регистратора составляла 10⁻⁵ В для ЭМС и 5·10⁻⁵ В для импульсных АС в интервале частот (1-100) кГц при частоте дискретизации 200 кГц. В приборе предусмотрена возможность получения информации в полосах с добротностью не более 8 на выделенных центральных частотах 2, 15 и 100 кГц. При этом усреднение данных измерений производилось за 1 или 5 с. Прибор имеет достаточно хорошие весовые характеристики, которые вместе с блоком измерения, блоком питания, электромагнитными и акустическим датчиками, соединительными проводами и заземляющим штырем составляют не более 12 кг. Время работы регистратора в автономном режиме без замены или подзарядки аккумуляторов составляет не менее 78 часов. При этом предусмотрена замена блока питания. Защита от пыли и влажности не хуже IP53. Наиболее подробно регистратор РЭМС1 описан в работах [198, 199, 234].

В комплект регистратора РЭМС1 входят: один электронный блок сбора информации (БИС) со встроенным аккумулятором, имеющий разъемы ввода-вывода информации; по два блока взаимозаменяемых емкостных (ДЕП) и индукционных (ДИП) принимающих устройств с усилителями мощности, описанными выше в разделе 3.2.2; один блок пьезоэлектрического датчика (АП); два сменных блока дополнительного аккумулятора (БДА) на 9 А·ч; блок для зарядки аккумуляторов (БП) ACS110 Traveller блоков БИС и БДА. К датчикам прилагается комплект из 3-х унифицированных соединительных 4-х жильных кабелей длиной 5 м для подключения блоков ДЕП с БИС, блоков ДИП с БИС и блока АП с БИС. Кроме того, прилагаются: кабель для подсоединения дополнительного аккумулятора к блоку БИС марки 2ПЭ (4×0,10) длиной 0.5 м; кабель для перекачки информации с блока БИС на ПК длиной 1 м; заземляющий штырь с проводом до 4 метров; ЗИП; техническое описание регистратора и инструкция по эксплуатации.

3.6.2.2. Датчики, используемые в регистраторе

Датчики ДЕП и ДИП разрабатывались для работы в натурных условиях шахтного поля рудных месторождений и приема электромагнитных сигналов. Конструктивно датчики изготавливались для приема ЭМС по электрической и магнитной составляющим электромагнитного поля с целью установления закономерных связей между изменениями напряженностей по электрической E(t) или магнитной H(t) составляющим электромагнитного поля в обозначенных выше интервалах частот и изменениями НДС горных пород. Фотографии емкостного принимающего датчика представлены на рисунке 3.14а, а индукционного датчика – на рисунке 3.14б.



Рисунок 3.14 – Фотографии датчиков для натурных исследований в шахтном поле рудных месторождений: емкостного (а) и индукционного (б)

Все электрические, индукционные и акустические датчики для согласования с входным сопротивлением усилителей блока БИС снабжены унифицированным усилителем мощности электрического сигнала [239, 240]. Усилитель выполнен в отдельном корпусе на микросхеме 140УД12 с отрицательной обратной связью и снабжен разъемами СР75 для подключения датчиков и кабелей. Сопротивление на входе усилителя не менее $5 \cdot 10^7$ Ом. Следует заметить, что соединительный кабель имеют малое омическое сопротивление одной жилы равное $9 \cdot 10^{-3}$ Ом/м и небольшую индуктивность на один погонный метр кабеля не более 0,7 10^{-6} Гн/м.

Конструктивно блок емкостного датчика состоит из фольгированной пластины стеклотекстолита размером (110×130) мм², расположенной на стальной прямоугольной коробке размером ($150 \times 130 \times 27$) 10^{-9} м³. При такой конструкции емкость ДЕП соответствует 20 пФ. В результате на частотах 1-100 кГц реактивное сопротивление ДЕП будет составлять 10^8 – 10^6 Ом, соответственно. Емкостной датчик с усилителем при выполнении измерений не регулируется и заземляется. Соединительные кабели позволяют разносить датчики на расстояние до 9 метров.

Индукционный датчик ДИП конструктивно более сложен и включает ферритовый, полистироловую катушку диаметром 2·10⁻² м и длиной 6.8·10⁻² м с намотанной на нее в несколько слоев медной проволокой и герметичный корпус с разъемом. Катушка по своим 12 секциям заполнена проводом ПЭТВ-2 диаметром 15·10⁻⁵ м. Разбивка катушки на секции

обусловлена необходимостью понижения ее собственной емкости [241] Для обеспечения минимальной емкости намотка катушки осуществлялась «в навал». В качестве сердечника катушки использовали ферритовый стержень 1000МН длиной 0.1 м и диаметром 10^{-2} м [242]. Корпус ДИП имеет диаметр $40 \cdot 10^{-3}$ м. Такой диаметр обусловлен размерами просверленных в горных породах массива шпуров (отверстий), имеющих диаметр не менее $42 \cdot 10^{-3}$ м. Для обеспечения пыле- и влагонепроницаемости на уровне IP53 корпус ДИП плотно с силиконовым уплотнением закрывается крышкой с разъемом СР75. Расстояние между ДИП при работе по дифференциальной схеме могут быть такими же как и у ДЕП.

В качестве блока АΠ использовался пьезоэлектрический апериодический преобразователь на основе пьезоэлектрической керамики ЦТС-19, которая отжигалась в соответствие с рекомендациями, данными в работе [197]. Отожженная пьезоэлектрическая керамика зажималась в блоке АП между латунной акустической задержкой и латунным конусным демпфером. При этом задержка и демпфер изготавливались из латуни ЛС-59, которая имеет акустический импеданс $\rho_l c_l$ равный 36.1·10⁶ кг·м⁻²·с близкий к $\rho_k c_k$ пьезоэлектрической керамики ЦТС-19 равный 36.6·10⁶ кг·м⁻²·с. При отжиге керамики сигнала на ее отожженной стенки не возбуждался. При этом плавное изменение градиента поляризации от отожженного до не отожженного края керамики существенно расширяло ее частотный диапазон приема акустических сигналов. Демпфирование еще более понижало резонансные характеристики керамики и существенно понижало уровень отраженных в демпфере акустических сигналов. Фотография акустического приемника представлена на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Блок акустического приемника, используемого для натурных исследований в шахтном полу рудных месторождений

Акустический пьезоэлектрический датчик снабжен закаленным конусом и системой его крепления. Конус акустического блока использовался для осуществления контакта с горными породами путем забивания его в расщелины массива.

Для работы общий комплект блоков регистратора РЭМС1 соединялся по схеме, представленной на рисунок 3.16.



Рисунок 3.16 – Схема соединения блоков регистратора РЭМС1: Ent₁ и Ent₂ - разъемы для присоединения ДЕП₁ и ДЕП₂; Ent₃ и Ent₄ - разъемы для присоединения ДИП₁ и ДИП₂, Ent₅ – разъем для присоединения АП, Ent+Out₆ – многофункциональный разъем для подключения блока дополнительных аккумуляторов БДА, зарядного устройства или ПК

Все разъемы обозначены на блоке БИС соответствующими надписями, а в инструкции даны подробные описания подключения тех или иных блоков. Для исключения неправильного подсоединения разных блоков регистратора разъем Ent₅ отличается по конфигурации от разъема Ent + Out₆, а оба они отличаются по конфигурации от разъемов Ent₁ – Ent₄.

3.6.2.3. Функциональная схема регистратора РЭМС1

Функциональная схема регистратора РЭМС1 приведена на рисунке 3.17. Электромагнитные сигналы из образцов или массива горных пород поступают на емкостные (ДЕП₁ и ДЕП₂) или на индукционные (ДИП₁ и ДИП₂) датчики. Сигнал с датчиков поступает на усилители тока для согласования выходных сопротивлений на датчиках и входных сопротивлений дифференциальных усилителей ДУ1 и ДУ2. Затем усиленные сигналы с ДУ1 и ДУ2 попадают на входы коммутатора. В свою очередь коммутатор передает сигнал на входы трех полосовых фильтров Ф1, Ф2, Ф3, а также к фильтру верхних и нижних частот Ф4. С полосовых фильтров и фильтра верхних и нижних частот сигнал поступает на регулируемые усилители У1 – У4, где проходит и усреднение амплитуд ЭМС за установленный промежуток времени. В нашем случае – за 1 или 5 с. Выходы усредняющих схем связаны индикатором (И1 – И4), на котором отображаются результаты усреднения ЭМС и с аналоговыми входами микроконтроллера. Кроме того, выход четвертого регулируемого усилителя У4 связан функционально с входом компаратора, подключенного к микроконтроллеру через счетчик С. Запись акустических импульсов проходит по похожей схеме. Акустический преобразователь АП связан с входом пятого электронного повторителя П5.



Рисунок 3.17 – Функциональная схема регистратора электромагнитных и акустических сигналов РЭМС1: ДЕП₁ и ДЕП₂ – емкостные датчики; ДИП₁ и ДИП₂ – индукционные датчики; АП – пьезоэлектрический акустический датчик; П1–П5 – унифицированные согласующие усилители тока; ДУ1 и ДУ2 – дифференциальные усилители; Ф1 – Ф5 – частотные фильтры; У1 – У5 – амплитудные усредняющие схемы; И1 – И5 –индикаторы на дисплее регистратора; ЗУ – запоминающее устройство; С – счетчик; ИС – интерфейс связи; Д – дисплей; К – клавиатура; Ч – блок реального времени; ПК – персональный компьютер; БА – блок аккумуляторов; СП – стабилизатор питания; БП – блок для зарядки аккумуляторов от сети 220 В

Выход электронного повторителя связан с входом второго фильтра верхних и нижних частот Ф5. Сигнал с этого фильтра поступает на регулируемый усилитель со схемой усреднения

У5 [243], а затем на индикатор данных измерений и на вход показаний микроконтроллера. К микроконтроллеру подсоединен блок интерфейса связи ИС, жидкокристаллический дисплей Д, запоминающее устройство ЗУ, клавиатура К и блок реального времени Ч. Блок интерфейса связи ИС может быть связан с компьютером ПК.

Блок аккумуляторов регистратора РЭМС1 обеспечивает электрическим питанием все элементы схемы регистратора кроме емкостных, индукционных и акустического датчиков, которые описаны выше в разделе 3.6.2.2. Как уже отмечалось, электронные повторители или усилители мощности выполнены на базе микросхем 140УД12. Дифференциальные усилители ДУ исполнены с применением микросхемы AD8032, а коммутатор выполнен на базе CD4051. В фильтрах верхних и нижних частот, в полосовых фильтрах и регулируемых усилителях использованы микросхемы AD8032. В качестве усредняющих схем использованы элементы 157ДА1. Компаратор построен на базе микросхемы LM2903, а счетчик – на базе микросхемы 561IE10. Элемент ADUC812 был использован в качестве микроконтроллера. Запоминающее устройство было выполнено на микросхеме HY628400A.

В качестве интерфейса связи использовалась микросхема MAX232A, а в качестве дисплея элемент PC1602. Клавиатура для набора параметров измерения и записи данных измерений ЭМС выполнена на базе ПКН125, а блок отсчета реального времени – на базе элемента DS1302.

3.6.2.4. Порядок работы и назначение элементов блока сбора информации БИС

Функционирование блока сбора информации БИС управляется сервисной программой. Функциональная схема регистратора электромагнитных и акустических сигналов РЭМС1 приведена на рисунке 3.17. Блок сбора информации осуществляет следующие функции: ввод аналоговых ЭМС с АП, с ДЕП или ДИП и их предварительную; оцифровку введенных аналоговых сигналов; подсчет количества поступивших импульсов выше установленного уровня амплитуд по всем каналам приема; обеспечение накопления данных подсчета за установленный промежуток времени в 1 или 5 секунд и их хранение во встроенной памяти 4 Мбайт; вывод информации на ЖК дисплей для оперативного наблюдения поступающих данных о количестве ЭМС по всем каналам, включая канал АП; обеспечивает вывод цифровой информации о количестве ЭМС по всем каналам на ПК. При этом работа БИС на встроенных аккумуляторах имеет продолжительность не менее 40 часов. В блоке БИС предусмотрена также подзарядка встроенных аккумуляторов.

Дифференциальные усилители $ДY_1$ и JY_2 производят вычитание электромагнитных помех, находящихся в ближней зоне приема ЭМС и предварительно усиливают его. При этом коэффициент усиления равен 4. Затем на трех узкополосных фильтрах $\Phi 1-\Phi 3$ производится

выделение ЭМС в частотных полосах с добротностью не выше 8 и центральными частотами (2, 15 и 100) кГц, а фильтры верхних и нижних частот Ф4 и Ф5 выделяют сигналы в полосе (1-100) кГц. При этом блок коммутации по команде оператора через меню с ЖК дисплея Д осуществляет выбор принимающих ЭМС приемников, а также установку необходимых уровней усиления 1, 4, 8 или 16. Усиление подбирается по фактическому наполнению каналов измерения по частотам для того, чтобы при работе в режиме мониторинга поступающие сигналы не регистрировались в переполненные каналы. Коэффициенты усиления отображаются в протоколе измерений, который выдается при программном выводе информации из БИС. Для уменьшения потока данных для записи на встроенное запоминающее устройство ЗУ проводили усреднение на всех пять каналах. Канал усреднения изготавливали на микросхемах двухполупериодного выпрямителя с постоянной времени 1 секунда. Для акустического канала коэффициент усиления регулируется по программе. Параметры усиления также как и для каналов ЭМС задавались через меню с ЖК дисплея дискретно 1, 2, 4, 8, 16 или 32. В дальнейшем сигнал приходит на компаратор, который производил выделение и сравнение импульсных сигналов. При превышении амплитуды сигнала установленного по программе порога сформировывался положительный импульс. Уровень порога может задаваться через меню с ЖК дисплея от в интервале 1-500 единиц. С помощью установки порога регулировали заполнение каналов регистрации ЭМС и АС. Для подсчета количества поступающих импульсов в микроконтроллер счетчик С на базе микросхемы 561IE10 обеспечивал деление высокой частоты с компаратора на 16. Часы Ч при выводе информации из БИС обеспечивали в считываемом протоколе показания реального времени при мониторинге или краткосрочном измерении. Связь с ПК обеспечивают интерфейсы ИС без оптической развязки RS232 и оптически изолированные RS485. Причем вывод информации проводился в соответствие с протоколом данных измерений, приведенный в Таблице 3.1.

Дата 04/04/16 08:38:29 Прибор: 2 Стр.: 0 Датчик: ДИП							
Усил.: 16 Усил. АП: 8 Уров.: 250 Усред.: 5 сек							
Индекс	Ф1	Ф2	Ф3	ШП	АΠ	Счет	АКК
32046	456	195	223	1143	0	0	695
32051	456	195	227	1144	0	0	695
32056	467	210	230	1203	10	4	695
32061	469	211	230	1220	11	2	695

Таблица 3.1 – Протокол вывода информации из блока измерения БИС

В начале протокола отображаются все параметры измерения, устанавливаемые с помощью меню на ЖК дисплее, имеющим две строки по шестнадцать символов, и клавиатуры

с 5 кнопками. В колонка «Индекс» отображается текущее время измерений в секундах, которое восстанавливается путем делением на 3600. В колонках Ф1,Ф2 и Ф3 выводятся величины амплитуд ЭМС в полосах с центральной частотой 2, 15 и 100 кГц, соответственно. Показания измерений амплитуд ЭМС в интервале частот 1–100 кГц приведены в колонке ШП, а данные измерений амплитуд акустических сигналов – в колонке АП. В колонке «Счет» выводится информация о количестве импульсов ЭМС в единицу времени. Колонка АКК отображает состояние аккумулятора в момент проведения измерений. Например, в таблице цифры 695 означают, что аккумулятор поддерживает напряжение 6,95 В.

Имеющееся в блоке БИС постоянное запоминающее устройство ППЗУ с возможностью перезаписывания, обладает объемом памяти 4 мегабайта. Это устройство сохраняет информацию при работе БИС, накапливает ее и хранит до принудительного стирания из памяти. Для обеспечения временного хранения информации о регистрируемых амплитудах ЭМС и АС используется оперативное запоминающее устройство ОЗУ с объемом памяти 512 килобайт при частоте оцифровки микроконтроллером 200 кГц.

Микроконтроллер на базе ADUC 812 включает в себя 8 канальный 12 разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) для оцифровки ЭМС и AC и две схемы преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал (ЦАП). Кроме того, в микроконтроллере имеются таймеры счетчика в количестве трех схем, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) данных в объеме 256 байт параллельные и последовательные порты ввода-вывода цифровой информации, постоянное запоминающие схемы (РПЗУ), которые обладают возможностью многократного перепрограммирования до 10⁵ раз. Одно из РПЗУ обладает объемом памяти 640 байт, а второе программное РПЗУ – 8 кбайт.

В обозначенном комплекте микроконтроллер производит программным управлением всех подключений и выбор параметров мониторинга ЭМС в регистраторе РЭМС1, которые описаны выше по тексту.

При работе регистратора в режиме мониторинга усредненные данные измерения сохраняется постранично. Запоминающее устройство содержит 512 «страниц». Каждая страница содержит 256 записываемых значений.

Важным является обеспечение электрическим питанием всех элементов регистратора напряжением (6+1) В. Поэтому для подзарядки встроенных в регистратор и дополнительно подключаемых аккумуляторов (БА) служит блок питания от сети переменного тока с частотой (50 \pm 0,5) Гц и напряжением (220 \pm 22) В с адаптером через стабилизаторы СП.

Персональный компьютер используется для перезаписи собранной информации в собственную память, графического построения по данным измерений и их анализ.

Конструктивно блок измерения исполнен из требований по безопасности проникновения влаги и пыли IP53. В качестве конструктивного материала использовали сталь. Стальной корпус является эффективной защитой от внешних электромагнитных помех, а также от механических повреждений. В корпусе имеются 6 разъемов, клавиатура, ЖК экран и клемма заземления. Разъемы, которые не участвуют в процессе работы регистратора для обеспечения условий IP53, должны быть закрыты соответствующими заглушками.

В блоке БИС имеется функция самотестирования. Калибровка регистратора производится стандартными методиками с использованием кольца Гельмгольца для магнитного поля и конденсаторных пластин для электрического поля. Для определения рабочих амплитудно-частотных характеристик регистратора, уровня электромагнитного шума в нем и для определения подавления синфазного ЭМС использовался генератор Tektronix AFG 3022B.

3.6.2.5. Технические характеристики аппаратно-программного регистратора РЭМС1

Разработанный аппаратно-программный комплекс регистратора РЭМС1 обладает следующими характеристиками:

- рабочий диапазон частот 1–100 кГц;
- чувствительность каналов измерения амплитуды ЭМС не менее 10^{-5} B;
- чувствительность каналов измерения амплитуды AC не менее $5 \cdot 10^{-5}$ B;
- наличие каналов узкополосных фильтров для выделения полос с добротностью не менее 8 с центральными частотами 2, 15, 100 кГц – 3 шт.;
- наличие каналов оцифровки 6 шт.;
- наличие аналоговых интеграторов сигналов 5 шт.;
- время усреднения сигналов 1 или 5 секунд;
 - •объем памяти ППЗУ 4 Мбайт;
- габаритные размеры блоков:
 - -БИС-(0.28×0.28×0.03) м;
 - ДЕП (0.15×0.13×0.027) м;
 - ДИП (ø 0.042×0.17) м;
 - АП (ø 0.036×0.17) м;,
 - Блок дополнительных аккумуляторов (0.205×0.085×0.040) м;
 - -БП (0.120×0.09×0.060) м;
- масса комплекта регистратора с ДЕП, ДИП и АП, БДА, соединительными кабелями и заземлением не более 12 кг;

- электрическое питание постоянным током (6.0+1.0) В;
- емкость встроенных 5-ти аккумуляторов конфигурации <u>АА</u> 2.5 А·ч;
- емкость блока дополнительных аккумуляторов 9.0 А·ч;
- время работы при работе только со встроенными аккумуляторами не менее 40 часов;
- время работы совместно со встроенными и дополнительными аккумуляторами не менее 180 часов.

Подробно технические характеристики и работа комплекса представлены в Техническом описании регистратора РЭМС1.

Работа регистратора апробирована в шахтном поле Таштагольского месторождения. Регистратор РЭМС1 являлся основным прибором при исследованиях изменения НДС массива горных пород и геодинамических проявлений в нем до и во время проведения технологических взрывов на Таштагольском руднике массой до 300 тонн марки № 6ЖВ, а также в период релаксации породного массива после взрывных воздействий. Кроме того, регистратор использовался в лабораторных экспериментах при исследовании связи электромагнитной эмиссии и развития деструктивных зон и разрушения образцов горных пород. Результаты данных измерений ЭМС м АС будут приведены в последующей главе.

Таким образом, создан и апробирован новый тип аналогово-цифрового регистратора электромагнитной и акустической эмиссий для работы в лабораторных экспериментах и для работы в шахтном поле рудников. Регистратор обладает малыми весовыми и габаритными размерам, удобными для работы в шахтных условиях. В регистраторе использовано подавление электромагнитных помех из ближней зоны приема сигналов, частотные и широкополосные каналы приема ЭМС с чувствительностью не менее 10^{-5} В, а также канал приема АС с чувствительностью не менее $5 \cdot 10^{-5}$ В. Регистратор позволяет проводить мониторинг ЭМС и АС в течении 7 суток. Усреднение амплитуд принимаемых сигналов по всем каналам за 1 или 5 секунд существенно снизили поток запоминаемых данных мониторинга. Для регистратора РЭМС1 разработаны специализированные датчики для приема ЭМС по электрической и магнитной составляющим электромагнитного поля и пьезоэлектрические датчики для приема АС.

3.6.3. Автономный регистратор электромагнитных и акустических сигналов РЭМАС1

В предыдущем разделе был достаточно подробно описан новый тип аппаратнопрограммного регистратора последовательностей электромагнитных и акустических сигналов РЭМС1, используемый в дальнейшем для исследования развития зон деструкции, процессов разрушения образцов и массивов горных пород. Регистратор РЭМС1 имел три узкополосных канала на частотах 2, 15 и 100 кГц, канал с широкой полосой (1-100) кГц и канал измерения интенсивности электромагнитной активности. В тоже время в процессе лабораторных экспериментов было выяснено, что при развитии разрушения спектр ЭМС не ограничивается только представленными выше частотами. Частотный диапазон ЭМС значительно разнообразней из-за разных размеров образующихся трещин, взаимодействия акустических импульсов разной длительности с двойными электрическими слоями и сегнетоэлектрическими включениями неодинаковой размерности. Кроме того, при усреднении за 1 или 5 секунд существенно уменьшается усредненная амплитуда регистрируемой электромагнитной эмиссии горного массива, поскольку появление ЭМС носит случайный характер, обусловленный МЭП преобразованиями в массиве горных пород при развитии геодинамических явлений.

В этой связи была разработана следующая модель полевого аппаратно-программного регистратора электромагнитных и акустических сигналов РЭМАС1. Предполагалось, что частотный диапазон в (1-100) кГц остается прежним из-за своей оптимальности, а выборка по частотам будет производиться через каждые 1 кГц. Чувствительность канала регистрации ЭМС необходимо было повысить до $5 \cdot 10^{-6}$ В, а чувствительность канала регистрации АС оставить на прежнем уровне $5 \cdot 10^{-5}$ В. При этом в реальном режиме времени от $8 \cdot 10^{-3}$ до $128 \cdot 10^{-3}$ секунд, устанавливаемые при начале работы, с помощью программного обеспечения необходимо было производить в непрерывном режиме Фурье анализ и запись, полученных при спектральном разложении усредненных амплитуд ЭМС, в запоминающее устройство ППЗУ FLASH. Уменьшение времени усреднения существенно повышает уровень регистрируемой амплитуды электромагнитной эмиссии. При изменении количества выборок по частотам до 100 и уменьшении времени усреднения результатов частотного анализа необходимо было увеличить объем встроенной памяти ППЗУ FLASH не менее чем до 2 гигабайт.

Кроме того, в регистраторе необходимо было предусмотреть возможность передачи данных мониторинга удаленному оператору или диспетчеру. Так же как и в РЭМС1, при автономной работе РЭМАС1 необходимо было обеспечить считывание регистрируемых данных мониторинга на персональный компьютер в виде удобного протокола для дальнейшего использования и анализа. Поскольку регистратор предполагалось использовать в условиях карьеров и подземных рудников, то при конструировании и изготовлении необходимо было обеспечить его автономность, оптимальные весогабаритные характеристики, а также защищенность от пыли и влаги на уровне IP64. Автономность работы регистратора в течение не менее 3 суток должен обеспечивать встроенный аккумулятор. В качестве емкостных или индукционных преобразователей предполагалось использовать те же датчики, что и в РЭМС1.

Изменение значений частот в процессе механических нагружений наряду с изменениями амплитуды ЭМС может служить прогностическим признаком развития разрушения и

геодинамических явлений. Кроме того, разрабатываемый регистратор РЭМАС1 должен стать исходной моделью прибора для образования сети мониторинга геодинамических явлений с перспективой передачи информации на удаленный компьютер. Автор настоящей диссертации обосновал техническое задание на создание регистратора РЭМАС1, принял непосредственной участие в разработке алгоритмов его компоновки, работы и программного обеспечения, а также в его калибровке и тестировании функциональных возможностей в натурных условиях Таштагольского месторождения.

3.6.3.1. Состав амплитудно-частотного регистратора РЭМАС1

Работа регистратора РЭМАС1 в основном определяется теми же принципами построения как и в регистраторе РЭМС1: это преобразование в дифференциальном режиме энергии электромагнитных сигналов посредством емкостных или индукционных преобразователей в аналоговые сигналы с последующим усилением, оцифровкой, усреднением в установленный промежуток времени и запоминанием конечных данных на встроенном носителе памяти. Такая же последовательность операций предусмотрена при регистрации акустических сигналов.

При разработке РЭМАС1 учитывались результаты исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии, полученных в лабораторных экспериментах на образцах горных пород и в натурных условиях рудников при изменении напряженно-деформированного состояния образцов и участков массива горных пород до разрушающих значений нагрузок [218, 244]. Основываясь на исследованиях связей изменения НДС горных пород и спектра ЭМС, проведены работы по созданию регистратора для применения в диагностике состояния горных пород и прогнозирования развития геодинамических событий в натурных условиях. В результате совместных усилий сотрудников ПНИЛ ЭДиП ТПУ и СКБ «Смена» Томского университета систем управления и радиоэлектроники создан новый тип автономного амплитудно-частотного аппаратно-программного регистратора электромагнитных и акустических сигналов горных пород РЭМАС1 [220, 245-247].

Регистратор построен по модульному принципу. Его центральным элементом является цифровой сигнальный процессор (ЦСП). Процессор управляет всеми математическими расчетами внутри прибора и управляет всеми периферийными модулями. На отдельные контроллеры возложены задачи логического разделения системы обеспечения электрического питания прибора и работы с пользовательским интерфейсом. На рисунке 3.18 приведена структурная схема периферийных модулей регистратора. При вводе и выводе информации о параметрах ЭМС в ходе первичной обработки используется графический

жидкокристаллический дисплей и клавиатура. Работу регистратора обеспечивает электрическое питание от аккумулятора, которое обеспечивает его автономность в течение 3 суток.



Рисунок 3.18 – Структурная схема периферийных модулей регистратора с цифровым сигнальным процессором

Контроллеры пользовательского интерфейса и системы обеспечения питания подключены к ЦСП через двухпроводной интерфейс *TWI*, который подключается к простой двухпроводной и двунаправленной шине. Шина состоит из линии синхронизации и линии последовательной передачи данных. Интерфейс RS-485 обеспечивает подсоединение нескольких РЭМАС1 в единый комплекс, который в перспективе может осуществлять анализ параметров и характеристик электромагнитной эмиссии и выявление корреляции между электромагнитными и акустическими сигналами для проведения пространственного мониторинга развития геодинамических явлений.

На рисунке 3.18 видно, что входной сигнал поступает на емкостной или индукционный датчик (ЭМД) для регистрации преимущественно электрической E(t) или магнитной H(t) составляющей внешнего возбуждения. Емкостной датчик представляет собой две квадратные пластины со стороной 10^{-2} м и расположенные друг от друга на расстоянии $15 \cdot 10^{-3}$ м. Индукционный датчик выполнен на ферромагнитном сердечнике с магнитной проницаемостью 2000. Катушка содержит порядка 1200 витков. Конструктивное исполнение представляет собой цилиндрическую форму с диаметром 42 мм для возможности размещения в шпуре, образованном от взятия проб породы. Входной каскад У1 (рисунок 3.19), обеспечивающий высокое входное сопротивление и согласование с чувствительными элементами, выполнен

внутри корпуса датчика. Выходной сигнал от датчика к прибору передается в дифференциальной форме для уменьшения синфазного внешнего воздействия. Внутри прибора выполняется усиление и фильтрация сигнала активными фильтрами верхних и нижних частот. Это обеспечивает ограничение частотных характеристик сигнала перед его цифровой обработкой. Фильтрация выполняется в диапазоне частот от 1 кГц до 100 кГц.



Рисунок 3.19 - Структурная схема акустического канала

Акустические колебания передаются в акустический канал через пьезоэлектрический преобразователь (рисунок 3.20). В связи с тем, что в данном приборе не требуется выполнять подробный спектральный анализ акустических колебаний, то после фильтрации сигнал поступает на интегратор, выполненный по активной схеме. Сигнал, который регистрирует АЦП2, несет информацию об энергии акустического воздействия.



Рисунок 3.20 - Структурная схема акустического канала

Обработанная информация сохраняется на съёмную флэш-память типа MicroSD. Интерфейс, обеспечивающий функционирование карт данного типа, реализован с использованием микроконтроллера ATMega64.

Регистратор РЭМАС1 обеспечивает следующие технические параметры для работы в шахтном поле рудников: прием сигналов в диапазоне частот (1–100) кГц; чувствительность приема ЭМС по входу не хуже $2 \cdot 10^{-6}$ В; чувствительность приема АС по входу не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ В; динамический диапазон не менее 60 дБ; фильтрация обеспечивается с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ); период регистрации, усреднения спектральных характеристик и запуск нового цикла приема данных измерений от $8 \cdot 10^{-3}$ до $128 \cdot 10^{-3}$ с; выборка по частотам не менее 1 кГц, а всего 100 выборок от 1 до 100 кГц; фильтрация частот соответствует 3 кГц на уровне 3 дБ; коэффициент прямоугольности фильтров составляет 0.3 на уровнях 3 дБ и 30 дБ; емкость встроенной аккумуляторной батареи не менее 16 А·ч; период

работы в автономном режиме не менее 72 часов; масса прибора с аккумуляторной батареей не более 8 кг. Защищенность от пыли и влаги на уровне IP64.

3.6.3.2. Математическая обработка данных измерений

Регистратор в процессе работы осуществляет с частотой дискретизации 10^6 Гц непрерывную регистрацию электромагнитной эмиссии образцов или массива горных пород при изменении их механического нагружения. В связи с большим потоком информации, сохранение сигналов в полном объеме с последующим их анализом в лабораторных условиях или удаленным оператором требует не только огромных для портативного автономного прибора объема носителя информации и высокой скорости передачи данных в условиях шахт, но и последующих временных затрат на обработку такого количества информации. Поэтому для уменьшения количества информации прибор помимо регистрации сигналов производит их математическую обработку в реальном масштабе времени и сохраняет результаты на сменный носитель памяти. Алгоритм работы математического блока прибора изображен на рисунок 3.21.



Рисунок 3.21 – Алгоритм работы математического блока регистратора

После регистрации и аналоговой обработки ЭМС в пределах установленного заранее цикла, например в 16·10⁻³ секунд, информация поступает на АЦП1, где преобразовывается в цифровой вид. Затем оцифрованные данные поступают в предварительный буфер, где ожидают последующей обработки. Первоначально математическая обработка заключается в выделении сигнала прямоугольным окном с последующим взвешиванием оконной функцией Кайзера для исключения эффекта Гиббса при дальнейшей обработке. Затем проводится спектральновременное разложение с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Как уже отмечалось выше, частота дискретизации в приборе принята равной 10⁶ Гц. Указанная частота дискретизации обеспечивает наилучшее соотношение между аналоговым выделением полосы частот (1-100) кГц и вычислительными мощностями, используемыми для последующей цифровой обработки в регистраторе. В результате ширина временного окна для БПФ находится в интервале 10⁻³ секунды, что соответствует 1024 отсчетам. Шаг по частоте в приборе при спектральном анализе изначально была принята 1 кГц. Такое соотношение между шагом по частоте и интервалом временного окна является оптимальной для спектрально-временного разложения сигнала. При взвешивании оконной функцией возникают потери в реально регистрируемом сигнале. Эти потери обусловлены потерями амплитуды сигнала вблизи краев временного окна. Поэтому для устранения этих потерь при использовании оконной функции во время расчета спектрально-временных параметров БПФ производится с шагом 512 отсчетов, то есть с 50% наложением. Параллельно с этими математическими действиями в течение установленного цикла производится счет поступивших электромагнитных импульсов и расчет энергии сигнала.

Следующими математическими операциями вычисление является оценок математического ожидания и дисперсии на заданном временном интервале. На сменную энергонезависимую сохраняются рассчитанные закономерности времени память от математического ожидания и квадрата среднеквадратичного отклонения спектральных амплитуд для частотных составляющих сигнала через каждый 1 кГц. Размер выборки, по которой производится вычисление времени математического ожидания и квадрата среднеквадратичного отклонения спектральных амплитуд, устанавливается при запуске прибора от 32 до 1024 анализируемых временных окон. Результаты математической обработки поступают в специально отведенный блок памяти, где ожидают записи во флэш-память. Более детально состав регистратора РЭМАС1 и алгоритм обработки данных мониторинга ЭМС описаны в работах [220, 245-247]. Акустический сигнал после предварительной аналоговой обработки и оцифровки сразу поступают в специально отведенный блок памяти и ожидают записи в съёмную память.

3.6.3.3. Апробация регистратора РЭМАС1 в шахтных условиях Таштагольского месторождения

В полевых условиях апробация регистратора РЭМАС1 проводилась в шахтном поле Таштагольского месторождения. Первоначально были проведены испытания по регистрации электромагнитных сигналов от источника, расположенного на известном расстоянии от прибора и с известными параметрами удара. В качестве такого источника был использован пневматический ударник, разработанный в Институте горного дела РАН (г. Новосибирск). Удары производились по горным породам пола орта с частотой близкой к 0.6 герц. На рисунке 3.22 представлена полная спектрограмма зарегистрированных электромагнитных сигналов, автоматически усредненных программой РЭМАС1 каждые 32·10⁻³ секунд. На рисунке 3.23 приведены амплитуды ЭМЭ на частоте 3 кГц, взятой из тестовой спектрограммы. Разница в амплитуде была запрограммирована, так как первоначально тестировались частотные характеристики, которые регистратор отработал успешно. В лабораторных условиях характеристики регистратора тестировались с помощью частотного генератора.



Рисунок 3.22 – Тестовая спектрограмма усредненных за каждые 32·10⁻³ секунд электромагнитных сигналов при их возбуждении ударником

На рисунке 3.24 приведена последовательность ЭМЭ в меньшем масштабе времени. Таким образом, была проведено первоначальное тестирование регистратора РЭМАС1 в шахте с естественными для рудника пылевыми и влажностными условиями. В дальнейшем тестировалась возможность записи электромагнитных откликов на геодинамическое событие. Ha 3.25 спектрограмма зарегистрированных P₃MAC₁ рисунке приведена полная электромагнитных откликов на геодинамическое проявление. Время усреднения электромагнитных сигналов выставлялось 32.10⁻³ секунд. А на рисунке 3.26 приведены спектральные составляющие этой спектрограммы на частоте 34 кГц и 5 кГц.



Рисунок 3.23 – Амплитуды электромагнитной эмиссии на частоте 3 кГц, извлеченной из тестовой спектрограммы



Рисунок 3.24 – Последовательность электромагнитных откликов на удары пневматического устройства, приведенных на рисунке 3.23 в меньшем масштабе времени



Рисунок 3.25 – Полная спектрограмма регистрации РЭМАС1 усредненных за 32·10⁻³ секунд электромагнитных сигналов

В 19 часов 12 минут был зарегистрирован толчок, который хорошо виден на частоте 5 кГц, а на частоте 34 кГц отобразилась дисперсия электромагнитных сигналов до толчка и после него. Видно также, что через час 5 килогерцовая составляющая стала уменьшаться по амплитуде и массив перестает излучать электромагнитные сигналы.



Рисунок 3.26 – Спектральные составляющие на частотах 5 кГц и 34 кГц, извлеченные из полной спектрограммы на рисунке 3.25

Это говорит о том, что массив горных пород перешел в стабильное состояние. Важным здесь является изменение откликов по частотам. Так на частоте 34 кГц такой ход электромагнитной эмиссии, вероятно, обусловлен прорастанием трещин малых размеров. Учитываю частоту и скорость звука в породах, составляющих массив Таштагольского месторождения, можно говорить о прорастании трещин двух первых десятков сантиметров. Учитывая же скорость прорастания трещин, которая в большинстве случаев не превышает 10^3 м/с, размер трещин может составлять размер до 3.10⁻² метра. Во время толчка, который виден на частоте 5 кГц, трещины из таких же расчетов могут иметь размеры уже в пределах метра и более при образовании трещин отрыва или скольжения. После толчка видно продолжение изменений дисперсии электромагнитных сигналов на частоте 34 кГц и в дальнейшем ЭМЭ массива уменьшается до фоновых значений. В этот же промежуток времен незначительно уменьшается и низкочастотная составляющая ЭМЭ с последующей релаксацией до фоновых значений на меньшем уровне. Это очень важный момент, который необходимо учитывать при проведении измерений спектров ЭМЭ. На рисунке 3.27 приведена общая спектрограмма дисперсии электромагнитных сигналов в промежуток времени 11 часов 20 минут до 23 часов по Кемеровскому времени. А на рисунке 3.28 приведен ступенчатый подъём дисперсии

спектральной амплитуды на частоте 1 кГц после массового технологического взрыва, который проведен в 12 часов. Самые активные частоты 4–8 кГц. Для сравнения на рисунке 3.28 приведена спектральная составляющая дисперсии ЭМЭ на частоте 13 кГц.



Рисунок 3.27 – Полная спектрограмма регистрации РЭМАС1 усредненных за 32·10⁻³ секунд электромагнитных сигналов с массовым технологическим взрывом

На спектрограмме четко виден взрыв и последующие изменения амплитуды ЭМЭ. При этом на частоте 1 кГц отчетливо видны 3 кратковременных периода дисперсии ЭМЭ с «полкой», причем каждый из них сопровождался в последующем электромагнитной эмиссией на более высокой частоте 13 кГц. Кроме того, на частоте 1 кГц наблюдалось изменение ЭМЭ с поднятием фонового значения, в то время как на частоте 13 кГц таких ступенчатых подъемов не наблюдалось.



Рисунок 3.28 – Амплитудные изменения дисперсии ЭМЭ на частотах 1 кГц и 13 кГц, извлеченных из полная спектрограмма на рисунке 3.27

Такой ход ЭМЭ на нижней частоте указывает на процессы скольжения массива по разломам, которые отмечались и при измерении с помощью регистратора РЭМС1. При этом на частоте 13 кГц отображаются развитие динамики массива горных пород.

Таким образом, разработан регистратор нового типа, способный обеспечивать непрерывную запись электромагнитных сигналов горных пород и диэлектрических материалов в процессе развития геодинамических явлений, в том числе в шахтном поле рудников. Способ обработки регистрируемых электромагнитных сигналов может успешно служить для уменьшения объема выходных данных при мониторинге в течение единиц и десятков часов, а также для получения амплитудно-частотных параметров электромагнитных импульсов. При наличии и наложении электромагнитных помех наиболее эффективным способом выделения ЭМС горных пород от стационарных помех является фильтрация по среднеквадратическому отклонению. Использование приведенного алгоритма анализа ЭМС горных пород позволит получить представление о развитии деструктивных процессов в рудном массиве или при длительном развитии разрушения диэлектрических материалов. Результаты обработки регистрируемых электромагнитных сигналов горных пород можно использовать для передачи в информационную сеть с последующим принятием решения удаленным наблюдателем. Приведенная последовательность обработки данных наблюдений может успешно применяться в информационной сети мониторинга и краткосрочного прогноза развития геодинамических процессов в подземных и открытых рудниках.

3.7. Общие схемы применяемых методов для исследования электромагнитной эмиссии образцов гетерогенных диэлектрических материалов и горных пород

На рисунке 3.29 изображена комплексная схема применяемых методов для исследования электромагнитной эмиссии модельных образцов гетерогенных диэлектрических материалов и образцов горных пород при акустическом возбуждении и силовом нагружении при одноосном сжатии или сдвиге.

Все применяемые методы и методики описаны выше по тексту в настоящей главе. Приведены также модели, используемые при теоретических расчетах и экспериментах. Применение этих методов обеспечило выявление связей параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии с процессами возникновения зон деструкции и развития разрушения образцов диэлектрических структур и горных пород.

На рисунке 3.30 приведена комплексная схема применяемых методов для исследования закономерных связей характеристик электромагнитной эмиссии горных пород с изменениями напряженно-деформированного состояния породного массива при его релаксации после

взрывных воздействий и проведения очистных работ в шахте железорудного месторождения, а также при проведении иных модельных экспериментов в шахтном поле рудника. Выявленные закономерности будут использованы при разработке метода мониторинга и краткосрочного прогноза развития геодинамических процессов по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии.



Рисунок 3.29 – Применяемые методы для исследования свойств и электромагнитной эмиссии образцов горных пород и гетерогенных диэлектрических материалов при акустическом возбуждении и силовом нагружении

Таким образом, в настоящей главе приведен практически полный комплекс применяемых в исследованиях разработанных специализированных универсальных стендов, методик и двух автономных аппаратно-программных регистраторов РЭМС1 и РЭМАС1 с программным обеспечением, которые могут использоваться при проведении измерения ЭМС и AC в лабораторных экспериментальных исследованиях и в натурных условия шахтного поля рудников.



Рисунок 3.30 – Применяемые методы для исследования электромагнитной эмиссии горных пород при изменениях напряженно-деформированного состояния породного массива

3.8. Выводы по главе 3

Подводя итоги описаниям в разделах и подразделах настоящей главы, можно констатировать, что в них приведен широкий круг методов и средств, необходимых для разработки мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических процессов в натурных условиях шахт по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии горных пород.

1. Разработан и изготовлен универсальный стенд, позволяющий исследовать закономерности изменений и измерять параметры электромагнитных откликов твердотельных диэлектрических образцов на внешнее импульсное акустическое воздействие. На этом же стенде возбуждаются и сами воздействующие акустические импульсы с заданными

параметрами, измеряется скорость звука в образцах и его затухание. Возбуждение акустических импульсов происходит либо на основе обратного пьезоэлектрического эффекта в пьезоэлектрической керамике, либо ударом шарика с известными весом и скоростью налета.

2. На другом разработанном и изготовленном стенде на основе пресса ИП-500 возможно проводить исследования параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии при нагружении образцов горных пород одноосным сжатием или сдвигом до разрушения. При нагружении образцов возможно исследование изменений параметров токов поляризации, проводимости, ИК радиометрии и отслоения микрочастиц, в том числе и при внешнем акустическом воздействии. Кроме того, на этом стенде возможно изменять тип нагружения (линейный, ступенчатый или циклический), измерять деформацию образца и параметры акустических импульсов, возникающих при развитии разрушения исследуемого объекта.

3. Разработан, изготовлен и применен в лабораторных и шахтных условиях Таштагольского рудника и на других объектах полевой автономный программно-аппаратный регистратор РЭМС1, обеспечивающий измерение параметров и характеристик электромагнитной эмиссии и акустических импульсов модельных образцов, образцов и массивов горных пород по 6 каналам с усреднением за одну или пять секунд интенсивности потока ЭМЭ, амплитуд ЭМС и АС в широкой полосе частот (1-100) кГц, максимальных амплитуд в полосах с добротностью не более 5 и с центральными частотами 2.0, 15.0 и 100 кГц.

4. Разработан, изготовлен и апробирован в лабораторных и шахтных условиях Таштагольского рудника регистратор электромагнитных и акустических сигналов горных пород РЭМАС1. Регистратор обеспечивает прием в диапазоне частот (1-100) кГц ЭМС с высокой чувствительностью по входу не хуже 2·10⁻⁶ В и АС не хуже 5·10⁻⁵ В. В приборе возможна установка временного цикла обработки данных измерения от 8·10⁻³ до 128·10⁻³ секунд во всем диапазоне с выборкой по частотам не менее 1 кГц. Регистратор обеспечивает также непрерывную запись ЭМС и АС горных пород в процессе развития геодинамических явлений в течение 72 часов без смены или подзарядки аккумуляторов. Способы программной обработки регистрируемых ЭМС и АС служат для уменьшения объема выходных данных при мониторинге, а также для получения амплитудно-частотных параметров электромагнитных импульсов. Работа регистраторов РЭМАС1 в руднике Таштагольского месторождения и результаты обработки регистрируемых электромагнитных сигналов горных пород позволили сделать вывод о возможности использования их для первичной записи, предварительной обработки и передачи данных наблюдения ЭМЭ и АЭ в информационную сеть для дальнейшего анализа и принятия решений удаленным диспетчером. Защищенность прибора от пыли и влаги на уровне IP64.

108
Глава 4. Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитной эмиссии образцов гетерогенных диэлектрических структур и горных пород

Для разработки метода мониторинга и краткосрочного прогноза развития деструктивных процессов породных массивах по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии необходимо изучить физические основы генерации ЭМС при внешних механических воздействиях на гетерогенные диэлектрические структуры и горные породы с различными петрофизическими свойствами. В первой главе настоящей работы представлены основные источники, механизмы и модели генерации ЭМС из образцов гетерогенных диэлектрических структур и горных пород. Однако, в приведенных публикациях недостаточно данных о поляризуемости горных пород, отличающихся структурно-текстурным строением (зернистость и слоистость), а также разными электрическими и магнитными свойствами.

В связи с этим, в настоящей главе кратко рассмотрены основы электрической поляризации горных пород, а также показано распределение зарядов на поверхности образцов горных пород различного генетического типа. Приведены экспериментальные и теоретические исследования влияния структурно-текстурных особенностей горных пород на параметры ЭМС и характеристики ЭМЭ. Изучено влияние постоянных электрических и магнитных полей, а также закономерности возникновение ЭМЭ при акустическом возбуждении поляризованных кальцитов. Проведено математическое и физическое моделирование влияние текстурных особенностей модельных образцов и горных пород, имеющих выраженную слоистость на параметры ЭМС при механическом воздействии. Поскольку в естественных условиях горные породы контактируют с минерализованными жидкостями, приведены результаты исследований и полученных закономерностей изменения параметров ЭМС при контакте горных пород с солевыми растворами. Исследована возможность мониторинга разрушения горных пород различной прочности и отличающихся электрическими свойствами по параметрам ЭМС при механическом воздействии. Показаны связи процессов развития разрушения образцов с параметрами ЭМС и характеристиками ЭМЭ, а также с возникающими токами поляризации. Приведены результаты исследования отслоения микрочастиц в процессе нагружения образцов горных пород. Приведены также доказательства возникновения инфракрасного свечения образцов горных пород при деформировании и разрушении. Обсуждаются механизмы возникновения такого свечения.

В настоящее время хорошо изучена поляризация горных пород при наложении внешнего электрического поля. Это приводит к смещениям центров положительных и отрицательных внутренних связанных зарядов в кристаллах. В результате такого смещения на поверхности

горных пород появляются не скомпенсированные заряды. Создаваемое этими зарядами поле направлено противоположно внешнему полю и ослабляет его. В соответствие с механизмами и типами частиц в настоящее время выделяют четыре основных вида поляризации: электронную, ионную, дипольную и миграционную (микроструктурную) [9, 187, 248].

При поляризации горных пород во внешнем электрическом поле различают электронную (время установления 10^{-15} сек.), ионную (время установления 10^{-14} - 10^{-12} с), дипольную ориентационную (время установления 10^{-10} - 10^{-7} с), объемную микроструктурную или миграционную (время установления 10^{-8} - 10^{-3} с) и медленную электрохимическую поляризацию (время установления сотни секунд до десятков минут) [187, 248]. Дипольная и миграционная поляризации имеют времена установления близкие к частотам, применяемым на практике электромагнитных полей, поэтому эти виды поляризации называют релаксационными или медленными по сравнению с временами смещения электронов и ионов.

В горных породах при их залегании всегда обнаруживаются естественные электрические поля, обусловленные локальными и теллурическими токами. Теллурические токи возникают при вариациях магнитного поля Земли [249]. Локальные токи сопровождают окислительновосстановительные, диффузионно-адсорбционные и фильтрационные, термоэлектрические и биологические явления, а также процессы трения и сдвижения в массивах горных пород.

Поляризации пород сопутствует явление электрострикции, которое заключается в деформировании диэлектриков под действием электрического поля. Это явление свойственно практически всем горным породам [9].

4.1. Особенности поляризации некоторых минералов и горных пород

Внешние электрические поля в массивах горных пород могут возникать в местах изменений механических напряжений, например, при добыче рудных и нерудных полезных ископаемых, при формировании геодинамических явлений в недрах Земли. Так в работах [73, 80] показали возможные связи изменений атмосферного электрического поля и НДС массива горных пород над месторождениями полезных ископаемых, находящихся в разработке. В работе [83] исследуют формирование квазистационарного электрического поля в подвергнутых нагружению горных породах, а в работе [250] рассматриваются процессы заряжания поверхностей при разрушении, контакте, трении или нагреве твердых тел.

Существуют особые случаи поляризации минералов и горных пород. Так из 32 кристаллографических классов минералов 11 имеют центры симметрии. Они поляризуются под действием внешних электрических полей по закономерностям, приведенным выше по тексту. Остальные кристаллографические классы не имеют центров симметрии. Для этих классов

минералов поляризация возникает под действием механических нагрузок. Это явление имеет название прямого пьезоэлектрического эффекта [248, 251]. Здесь величина поляризации пропорциональна действующим механическим напряжениям, где коэффициент пропорциональности является характеристикой пьезоэлектрического эффекта и носит название пьезоэлектрический модуль.

Известно кристаллографических также. что десять классов ИЗ известных пьезоэлектриков имеют оси, по которым свойства кристаллов во взаимно противоположных направлениях различаются. Такие кристаллы самопроизвольно поляризованы, и величина поляризации, в этом случае, зависит от температуры. Эти кристаллы называют пироэлектриками [252]. Нагрев пироэлектриков ведет к их заряжению по осям, имеющим разные свойства в положительном и отрицательном направлениях. Охлаждение приводит к переполяризации кристалла. Явление пироэффекта обратимо в электрических полях. При направлении электрического поля по электрической оси приводит к нагреву, а в противоположном направлении происходит охлаждение кристалла.

Пироэлектрики поляризуются спонтанно. При этом направление поляризации не может быть изменено внешним электрическим полем подобно сегнетоэлектрикам. B сегнетоэлектриках направление самопроизвольной поляризации меняется при воздействии внешнего электрического поля. Сегнетоэлектрическими свойствами обладают минералы кубической, тетрагональной, ромбической и моноклинной групп симметрии. Поляризация сегнетоэлектриков значительна даже при очень малых напряженностях электрического поля. Поэтому у них очень большая диэлектрическая проницаемость до нескольких тысяч. Их диэлектрическая проницаемость сильно зависит от температуры, которая имеет критические значения (точка Кюри), выше которых сегнетоэлектрики деполяризуются. У каждого минерала своя точка Кюри [252, 253].

Еше поляризации Практически одним механизмом является трение. все диэлектрические, а также слабые полупроводниковые минералы способны поляризоваться при трении. Возникающее при этом зарядовое состояние называют трибоэлектрическим заряжением. Трибоэлектричество имеет определенные закономерности. Так при трении двух химически одинаковых тел положительные заряды получает более плотное из них. Трение двух диэлектриков сопровождается положительным заряжением вещества с диэлектрической проницаемостью ε_B большей, чем у вещества с меньшей ε_M . В трибоэлектрическом ряду Майкла Фарадея показано, что предыдущее тело электризуется положительно, а последующее будет электризоваться отрицательно: (+) мех, фланель, слоновая кость, перья, горный хрусталь, флинтглас, бумажная ткань, шёлк, дерево, металлы, сера (–). При этом первый ректор Томского университета физик Гезехус Н.А. обнаружил, что в трибоэлектрическом ряду диэлектрики

111

следуют по убыванию их твердости. Первым с положительной стороны ряда электризации располагается (+) алмаз (твердость 10), топаз (твердость 8), горный хрусталь (твердость 7), гладкое стекло (твердость 5), слюда (твердость 3), кальцит (твердость 3), сера (твердость 2), а первым с отрицательной стороны электризации – воск (твердость 1) (-). Эта классификация называется рядом Гезехуса. Электризация пропорциональна поверхности натирающего тела. Жидкие диэлектрики имеют другие закономерности. Так положительный заряд приобретает жидкий диэлектрик с большей ε_{∞} или с большим поверхностным натяжением [254].

Все эти закономерности электризации минералов и горных пород необходимо учитывать при выявлении и уточнении связей параметров электромагнитных сигналов с изменяющимся механическим воздействием. При этом важным является моделирование и проведение исследований поляризации и электромагнитной эмиссии образцов горных пород с разной структурой, зернистостью и слоистостью, в том числе при наложении внешних электрических и магнитных полях, а также при механической нагрузке и акустическом воздействии.

4.2. Распределения зарядов на поверхности образцов горных пород

Исследования распределения зарядов без вызванной внешним электрическим полем электризации при нормальных условиях проводились на образцах известняка, сиенитового скарна и магнетитовой руды, изготовленных из кернов шахты Таштагольского месторождения. При этом образцы сиенитового скарна имели высокое удельное электрическое сопротивление $(10^6 - 10^7)$ Ом·м, известняка – $(10^4 - 10^5)$ Ом·м, а магнетитовой руды – $(10^3 - 10^{-2})$ Ом·м. Использование в экспериментах этих образцов обусловлено тем, что базовым месторождением для исследования электромагнитной эмиссии горных пород в лабораторных и натурных экспериментах было выбрано Таштагольское железорудное месторождение. Кроме того, для этих целей использовали и натечный сталактит из кальция с залеченной трещиной. Образцы магнетитовой руды отрезали от керна диаметром 4.2 10^{-2} м толщиной 5· 10^{-3} м.

Для исследования распределения вызванной электризации и ее релаксации во времени были отобраны образцы природных кальцитов или карбоната кальция CaCO₃. Кальцит встречается в природе повсеместно в виде мраморов, известняков, сталактитов и сталагмитов, а также в других видах и формациях. Отбирались образцы кальцита из мрамора, которые имели размеры $(8.0 \times 2.0 \times 2.0) \cdot 10^{-6}$ м³ и обладали следующими структурами: крупнокристаллическая (кр/кр) с зернами размером $(3-6) \cdot 10^{-3}$ м, мелкокристаллическая структурой (м/кр) с зернами размером $(1-3) \cdot 10^{-3}$ м. В дополнение к образцам из мрамора использовали аморфный сталактит с залеченной трещиной с такими же размерами.

Образцы изготавливались на отрезном станке Brilliant 230 алмазной пилой. Затем производили шлифовку поверхностей корундовыми порошками диаметром от $60 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ м на шлифовально-полировальном станке «Beta» с последующей промывкой и просушкой в сушильном шкафу при температуре не выше 100^{0} С.

Измерение электрических зарядов проводилось на установке с вибрирующим электродом, которая описана в разделе 3.5 главы 3 настоящей работы. На этой установке измерялась величина электрического тока, по которому рассчитывался поверхностный заряд σ_r [214, 248].

Для определения величины плотности эффективного поверхностного заряда на твердых телах использовали следующий алгоритм. Расчет напряженности электрического поля в воздушном зазоре проводился с использованием закона непрерывности интеграла по полю для двухслойного конденсатора [255]:

$$d_1 E_1 + d_2 E_2 = U, (4-1)$$

где d_1 и d_2 – величины толщины образца и воздушного зазора, соответственно, E_1 и E_2 – напряженности электрического поля в образце и воздушном зазоре, соответственно, а U – разность потенциалов между электродами. В соответствии с законом Гаусса

$$D_1 - D_2 = \sigma_r \,, \tag{4-2}$$

где D_1 и D_2 – электрическое смещение в образце и воздушном зазоре, соответственно, а σ_r – реальный заряд на поверхности образца.

Электрическое смещение в образце можно записать как

$$D_1 = P_1 + \varepsilon_0 E_1, \tag{4-3}$$

где P_1 – поляризационный отклик образца на внешнее электрическое поле, а ε_0 =8,85·10⁻¹² Φ/M – электрическая постоянная величина. Поляризация P_1 состоит из двух компонент

$$P_1 = P_i(t) + P_s(t) \quad , \tag{4-4}$$

где $P_s(t)$ – составляющая поляризации в медленно изменяющемся внешнем электрическом поле $E_l(t)$, а $P_i(t)$ – компонента поляризации, которая практически мгновенно отслеживает изменение напряженности внешнего электрического поля и может быть охарактеризована диэлектрической постоянной ε , тогда

$$P_i(t) = \mathcal{E}_0(\mathcal{E} - 1)E_1(t). \tag{4-5}$$

В воздушном зазоре $P_s(t)=0$ и, объединяя выражения (4-3) – (4-5) с учетом того, что

$$D_2 = \mathcal{E}_0 E_2 \tag{4-6}$$

получим полное выражение для D_1 :

$$D_1 = \varepsilon_0 \varepsilon E_1 + P_s(t) \,. \tag{4-7}$$

Комбинируя формулы (4-1), (4-2), (4-6) и (4-7), получили выражение для напряженности поля в воздушном зазоре

$$E_2 = [\varepsilon U - (\sigma_r - P_s)] / (d_1 + \varepsilon d_2), \qquad (4-8)$$

где ($\sigma_r - P_s$) – плотность эффективного поверхностного заряда. Если выполняется условие U = 0, тогда из (4-8) следует, что

$$\sigma_r = -\varepsilon_0 E_2 (1 + \varepsilon d_2 / d_1). \tag{4-9}$$

Таким образом, для определения σ_r электризованного диэлектрика достаточно определить величину напряженности поля в воздушном зазоре E_2 при известной величине $d_2 > 0.5 \cdot 10^{-3}$ м. Достаточно просто цель достигается путем калибровки по напряженности поля в воздушном зазоре. При калибровке можно определить коэффициент преобразования K_n в измеряемый ток I_k по величине известного поля в воздушном зазоре E_{κ} . С учетом K_n окончательное выражение для расчета σ_r буде иметь вид

$$\sigma_r = -\varepsilon_0 (I/K_n)(1 + \varepsilon d_2/d_1), \qquad (4-10)$$

где *I* – величина измеряемого тока.

Если к образцу приложено напряжение $U = U_6$ так, чтобы $E_2 = 0$, то выражение (4-8) будет иметь вид

$$(\sigma_r - P_s) = \varepsilon \varepsilon_0 U_B / d_1. \tag{4-11}$$

В этом случае свободный поверхностный заряд образца переходит в связанное состояние. При этом создаваемое им поле в воздушном зазоре становится равным нулю, а сигнал с измерительного электрода при его вибрации отсутствует. Здесь величина свободного поверхностного заряда, определяемая этим методом, не зависит от воздушного зазора d_2 . Однако следует учитывать, что это справедливо только в том случае, когда во время воздействия внешнего поля величина медленной составляющей поляризации P_s остается неизменной, а величина поверхностной проводимости образца незначительна.

При частичной компенсации поля в воздушном зазоре напряжением U₁, значение полной компенсации U_B определяется как

$$U_{B} = I_{0} / (I_{0} - I_{1})U_{1}, \qquad (4-12)$$

где I_0 – показания измерительного прибора при U = 0, а I_1 – показания этого же прибора при $U = U_1$.

Экспериментальные измерения поверхностных зарядов на двух противоположных сторонах образца сталактита показали их неравномерное распределение [256]. Расчеты показали, что величина поверхностного заряда находится в интервале от минус 10⁻⁸ Кл до минус 0.6·10⁻⁸ Кл, что соответствует распределению плотности заряда на поверхности от 6.25 ·10⁻⁶

 $K_{n/m}^{2}$ до 3.75 $\cdot 10^{-6}$ $K_{n/m}^{2}$. На рисунке 4.1а представлены изолинии распределение заряда σ_{cm} на поверхности образца сталактита без внесения внешнего заряда. Образец сталактита содержит залеченную сквозную трещину (рисунок 4.16) через всю его поверхность. Трещина выходит на противоположной стороне (рисунок 4.26). Наличие трещины существенно влияет на распределение заряда по поверхностям образца (рисунок 4.1a и 4.2a). Поэтому поверхностный заряд распределен неравномерно. Возрастание заряда наблюдали в центре образца (рисунок 4.1a). При сравнении структурно-текстурного строения верхней грани сталактита с полученным распределение заряда показало, что такое повышение заряда вызвано присутствием трещины в середине образца. На рисунке 4.26 приведена фотография внешнего вида нижней грани этого же образца сталактита, а на рисунке 4.2а изолинии распределения поверхностного заряда.

На следующем этапе проводились измерения распределение поверхностного заряда на образцах сиенитового скарна из Таштагольского месторождения. Удельное электрическое сопротивление сиенитового скарна высокое и находится в интервале (10⁶ – 10⁷) Ом·м.



Рисунок 4.1 – Распределение поверхностной плотности заряда на образце природного сталактита по верхней грани: а – изолинии распределения заряда по поверхности образца; б – фотография верхней грани образца сталактита



Рисунок 4.2 – Распределение поверхностной плотности заряда на образце сталактита, противоположной грани, приведенной на рис.4.1а,б: а – изолинии распределения заряда на противоположной поверхности образца; б – фотография нижней грани образца сталактита

Сиенит относится к группе кристаллических зернистых горных пород, близких к гранитам. В его состав в основном входят щелочной полевой шпат, роговая обманка, биотит или пироксен. Последние два очень хорошо электризуются. Структура образца полнокристаллическая и равномерно-зернистая. Распределение заряда измеряли на образце, изготовленного из керна диаметром 42.10^{-5} м и толщиной $7.5.10^{-5}$ м. На рисунке 4.3а представлен общий вид образца сиенитового скарна, в котором имеются вкрапления и прожилок из кальцита. Прожилок кальцита имеет толщину около 2.10 м.

На рисунке 4.36 представлены результаты распределения заряда на этой поверхности. Видно, что заряд на поверхности образца распределен неравномерно, а вокруг прожилка и вкраплений заряды близки по величине и имеют минимальные значения. Измерения также показали, что заряды имеют минусовые значения на всей поверхности образца, при этом одинаковые величины зарядов находятся в пределах изолиний, указанных на рисунке 4.36. Значения измеренных зарядов находятся в пределах (2.65 – 1.65)·10⁻⁸ Кл. В последующем проводились измерения поверхностных зарядов на образцах известняка, который в чистом виде состоит только из кальцита.



Рисунок 4.3 – Распределение заряда на поверхности образца сиенитового скарна: а – фотография поверхности образца; б – изолинии распределения заряда по поверхности образца в кулонах

Кальцит встроен в текстуру во всем массиве Таштагольского месторождения, в том числе и в исследуемых образцах скарна и магнетитовой руды. В соответствие со своим осадочным происхождением известняк имеет слоистую текстуру. Распределение заряда измеряли на двух противоположных поверхностях образца известняка, выпиленного также из керна диаметром 42·10⁻³ м. Удельное электрическое сопротивление известняка ниже, чем у сиенитового скарна, но выше чем у магнетитовой руды и находится в интервале (10⁴ – 10⁵) Ом·м.

На рисунке 4.4а представлена фотография общего вида поверхности образца известняка, на котором в нижней его части имеются вкрапления магнетита. На рисунке 4.46 представлены результаты распределения заряда на этой поверхности. Видно, что заряд на поверхности образца также распределен неравномерно по изолиниям. На всей поверхности заряд имеет минусовое значение. Там где имеются вкрапления магнетита заряд по величине меньше, а в чистом известняке или в известняке с очень малыми вкраплениями магнетита заряды имеют максимальные величины. Значения измеренных зарядов находятся в пределах (1,38 – 1.01)·10⁻⁷ Кл.

Для сравнения исследовали заряд на поверхности противоположной стороны этого образца (рисунок 4.5). На фотографии (Рисунок 4.5а) образец повернут на 90°. Здесь справа вверху явно видны участки с содержанием магнетита, а слева большие его вкрапления. В соответствие с этими текстурными особенностями получили и распределение зарядов по

поверхности образца, выделенное изолиниями. Значения измеренных зарядов находятся в пределах (1,01·10⁻⁷ – 5.37·10⁻⁸) Кл.



Рисунок 4.4 – Распределение заряда на поверхности образца известняка с содержанием в нижней части включения магнетита: а – фотография поверхности образца известняка; б – изолинии распределения заряда по поверхности образца в кулонах



Рисунок 4.5 – Распределение заряда на противоположной поверхности образца известняка: а – фотография поверхности образца известняка с содержанием включений магнетита; б – изолинии распределения заряда по поверхности образца в кулонах

В местах, где присутствуют вкрапления, значения заряда одинаковые и минимальные, а в местах образца с более «чистым» известняком значения заряда больше.

В дальнейшем исследовались образцы магнетитовой руды, удельное электрическое сопротивление которых существенно ниже, чем у сиенитового скарна и известняка и составляло всего 10² Ом·м. Образцы также выпиливались из керна диаметром 42·10⁻³ м. В образце магнетитовой руды №1 присутствуют вкрапления кальцита, а в образце №2 содержатся включения скарнов и прожилок кальцита.

Распределение заряда в образце №1 измеряли на двух противоположных поверхностях образца. На рисунок 4.6а преведена фотография образца №1, а на рисунок 4.7а – его обратная сторона. На рисунке 4.6б видно, что на расположенном внизу образца ряду включений кальцита заряд минимальный, но к верхнему включению заряд возрастает. На рисунке 4.76 на обратной стороне образца №1 максимальный заряд находится на вкраплениях кальцита, а минимальный на полосе чистого магнетита. Измерения показали, что величина заряда на двух противоположных поверхностях образца магнетитовой руды изменяется в пределах от (-10^{-8}) до $(-7,4\cdot10^{-8})$ Кл. При сравнении структурно-текстурного строения этого образца с измеренным распределение заряда можно однозначно сказать, что высокоомные включения кальцита сильнее электризуются, чем низкоомная магнетитовая руда. На образце магнетитовой руды №2 с включениями скарна и кальцита, фотография которого приведена на рисунке 4.8а, распределение заряда также повышается в окрестностях кальцита (рисунок 4.8б).



Рисунок 4.6 – Распределение заряда на поверхности образца №1 магнетитовой руды с включениями кальцита: а – фотография поверхности образца магнетитовой руды с включениями кальцита; б – изолинии распределения заряда по поверхности образца в кулонах



Рисунок 4.7 – Распределение заряда на обратной поверхности образца №1 магнетитовой руды с включениями кальцита: а – фотография поверхности образца магнетитовой руды с включениями кальцита; б – изолинии распределения заряда по поверхности образца в кулонах



Рисунок 4.8 – Распределение заряда на обратной поверхности образца №2 магнетитовой руда с включениями скарна и кальцита: а – фотография поверхности образца известняка; б – изолинии распределения заряда по поверхности образца в кулонах

Неравномерность распределения заряда по поверхности образца также обусловлена наличием в магнетите высокоомных включений скарна и кальцита.

Таким образом, измерения распределения зарядов на поверхности образцов сиенитового скарна, известняка, магнетитовой руды из Таштагольского месторождения и на поверхности кальцитового сталактита, взятого в качестве сравнительного образца, показали, что без вызванной внешним электрическим полем электризации максимальная величина заряда

120

находится в местах с наибольшим удельным сопротивлением. Причем такие максимальные значения заряда возникают как в горных породах с высоким удельным сопротивлением, имеющим низкоомные включения, так и на высокоомных включениях имеющих низкоомное окружение основной породы, содержащейся в образце. Измерения поверхностного распределения заряда на сталактите с залеченной трещиной подтвердили этот вывод, так как сопротивление залеченной трещины на четыре порядка ниже, чем основной материал, из которого состоит сталактит.

4.3. Электромагнитная эмиссия поляризованных кальцитов при акустическом возбуждении

В разделе 4.1 настоящей главы описаны процессы, способствующие заряжению поверхности горных пород, в том числе при механическом или акустическом воздействии на них. Электризация диэлектрических материалов и горных пород вызывает изменение их зарядового состояния. В процессе механического или акустического воздействия на такие материалы возникает электромагнитная эмиссия. Зарядовое состояние определяется электрическими характеристиками исследуемых объектов, которые в свою очередь зависят от структурно-текстурных особенностей и дефектности исследуемых материалов, а также от наличия минеральных включений в горные породы.

Для определения влияния зарядового состояния дефекта, как одного из факторов, приводящего к изменению амплитуды ЭМС при возбуждении акустическим импульсом, а также для определения влияния амплитуды возбуждающего акустического импульса при постоянном зарядовом состоянии модельного дефекта проводились следующие оценки.

Модель заряженного дефекта представляли в упрощенном виде, который выглядел в образце как воздушная полость или трещина с электрической емкостью, определяемой соотношением [254]

$$C(x) = \frac{\mathscr{Z}_0 S}{x+d},\tag{4-13}$$

где d – ширина полости без возмущения; $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $S = 4 \cdot 10^{-4}$ м²; ε – диэлектрическая проницаемость внутри полости или трещины; x(t) — смещение сторон полости или трещины при внешнем акустическом воздействии. Присутствие заряда q на обкладках конденсатора, каким является полость или трещина, означает появление разности потенциалов u на них. Если первоначально на обкладках приложено напряжение u(0) = E, тогда уравнение для напряжения будет выглядеть следующим образом

$$R\frac{d}{dt}[C(x(t))u(t)] + u(t) = 0,$$

где R — сопротивление образца. Учитывая то обстоятельство, что при смещении пластины конденсатора при внешнем акустическом возмущении изменяется его емкость, то уравнение (4-13) можно переписать как:

$$C(x)R\frac{d}{dt}u(t) + u(t)R\left(\frac{d}{dx}C(x)\right)\frac{d}{dx}x + u(t) = 0.$$

Решая уравнение относительно производной напряжения, получим следующее выражение:

$$C(x)R\frac{d}{dt}u(t) + u(t)Rv(t)\frac{d}{dx}C(x) + u(t) = 0 \rightarrow \frac{d}{dt}u(t) = -\frac{\left(v(t)R\frac{d}{dt}C(x) + 1\right)u(t)}{C(x)R}.$$
(4-14)

Зная колебания напряжения во времени u(t), можно определить изменения заряда q(t) и тока смещения i(t) из соотношений

$$q(t) = C(x(t))u(t), i(t) = u(t)/R.$$

При расчетах было принято, что вызванная акустическим возмущением деформация изменяется по колебательному закону. Тогда деформацию можно записать как $x(t) = \xi d \sin(\omega t)$, где ξ – доля смещения относительно d, а $v = d^2 x/dt = \xi d \omega \cos(\omega t)$ – скорость изменения деформации. В результате формулу (4-13) можно записать как

$$\frac{d}{dx}C(x(t)) = -\frac{\mathscr{E}_0 S}{(x(t)+d)^2}.$$
(4-15)

Решения уравнения (4-14) проводили с использованием численного метода Рунге – Кутта [257]. Для решения уравнения выбирались параметры со следующими значениями, близкими к параметрам образца руды Таштагольского месторождения: сопротивление образца среды R = 1 кОм, диэлектрическая проницаемость внутри полости среды $\varepsilon = 4$, поперечное сечение площади полости конденсатора $S = 4 \cdot 10^{-4}$ м². Емкость конденсатора соответствовала $C(0) = 3.54 \cdot 10^{-11}$ Ф при отсутствии акустического возмущения и определялась по формуле (4-13). Была проведена оценка амплитуды тока смещения в фиксированный момент времени от величины внешнего акустического возмущения. Сначала задавался заряд на обкладках конденсатора $q(0) = E \cdot C(0)$. Затем при внешних воздействиях, вызывающих смещение стенок полости, определяли изменения во времени напряжения u(t), заряда q(t) и тока смещения i(t). Амплитуда смещения стенок задавалась в процентах от ширины полости дефекта $d = 10^{-3}$ м и соответствовала значениям $\xi = 8$, 16, 32, 48%. Очевидно, что внешнее возмущение прямо пропорционально смещению стенок полости. На рисунке 4.9 приведен график, рассчитанный из соотношения (4-13) и показывающий изменения емкости C(t) при заданных смещения стенок полости во время внешних возмущений. Однозначно, что увеличение смещения стенок

полости приводит к уменьшению емкости. Это следует из соотношения (4-15). Из этого соотношения, очевидно, что производная емкости по координате всегда отрицательна (так как в знаменателе квадрат). Отсюда увеличение смещения x приводит к уменьшению емкости полости. Гармонические изменения смещения стенок от равновесного (x = 0) указывает на то, что при x < 0 емкость C увеличивается, а при x > 0 эта же емкость уменьшается.



Рисунок 4.9 – Изменения емкости во времени при смещении стенок полости дефекта акустическим возмущением, %: *1* – 48, *2* – 32, *3* – 16, *4* – 8

Далее методом Рунге-Кутта решали уравнение (4-14) при начальных заряде $q(0) = E \cdot C(0)$ и напряжении *E* равному 1 В. Результаты расчета показали, что амплитуда отклика тока смещения i(t) в фиксированный момент времени находится в пропорциональной зависимости от внешнего акустического возмущения $\xi \cdot d$. Оценка зависимости тока смещения от заряда проводилась в фиксированные моменты времени 0.7, 1.2, 1.4 и 1.6 с. В начальный момент времени зарядам задавали разные значения и определяли изменения напряжения u(t), заряда q(t) и тока смещения i(t). При этом значение внешнего возмущения, вызывающего смещение стенок полости дефекта, принимали одним и тем же. Для расчётов брали амплитуду смещения $\xi = 15\%$ от ширины полости $d = 10^{-3}$ м.

На рисунке 4.10 приведены результаты расчетов изменений во времени тока смещения i(t) при выбранных значениях внешнего акустического воздействия. Начальный заряд на обкладках конденсатора, имитирующего полость дефекта, в разные фиксированные моменты времени составлял: $q_1 = 0.7C(0) \cdot E$, $q_2 = 1.2C(0) \cdot E$, $q_3 = 1.4C(0) \cdot E$, $q_4 = 1.6C(0) \cdot E$. Результаты расчетов откликов системы в приведенные выше фиксированные моменты времени указывают на линейное возрастание токов смещения i(t) от величины заряда q(t) во всех случаях при одинаковом внешнем акустическом воздействии и, соответственно, пропорционально смещению обкладок конденсатора.



Рисунок 4.10 — Расчетные значения изменений во времени тока смещения при постоянном внешнем воздействии. Начальный заряд на обкладках конденсатора: $1 - q_1$; $2 - q_2$; $3 - q_3$; $4 - q_4$

Таким образом, проведено математическое моделирование изменения параметров ЭМС при разных амплитудах акустического воздействия на дефектную структуру с постоянным зарядом. Расчеты по приведенной модели показали, что в результате акустоэлектрических преобразований на двойных электрических слоях происходит переизлучение энергии воздействующих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. Показано, что амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной связи с характеристиками детерминированных акустических воздействий и зарядовым состоянием дефектов структур. Установлено, что изменение амплитуды ЭМС линейно зависит от величины заряда на обкладках дефекта и от величины возбуждающего акустического импульса при постоянном зарядовом состоянии дефекта.

Для подтверждения связи размеров структурных элементов горных пород и механоэлектрических преобразований было проведено физическое исследование в лабораторных условиях параметров электромагнитного сигнала (ЭМС) при акустическом возбуждении искусственно электризованных образцов [16, 258]. В качестве образцов был выбран кальцит, который, как показано в разделе 4.2, хорошо электризуется. Образцы представляли собой крупнокристаллический (кр/кр) мрамор с размером зерен 3-6 мм и мелкокристаллический мрамор (м/кр) с размером зерен 1-3 мм, а также сталактит, имеющий натечную структуру. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами (8.0×2.3×2.1)·10⁻⁶ м³.

Электризация поверхности образцов осуществлялась с помощью заряженного трением эбонита цилиндрической формы, величина плотности поверхностного заряда которого составила $\sigma_3 = 6 \cdot 10^{-5}$ Кл/м². На рисунке 4.11 приведена зависимость релаксации величины поверхностного заряда на эбонитовом цилиндре от времени. Время релаксации заряда по полуширине спада составило 5 минут или 300 секунд, а полное разряжение эбонита

происходило за 30 минут или 1800 секунд. Причем релаксация заряда с эбонитового цилиндра происходит по экспоненциальному закону.



Рисунок 4.11 – Зависимость релаксации заряда от времени на цилиндрическом эбоните

В нормальных условиях проведения эксперимента при температуре окружающего воздуха плюс 20°С, давлении 10⁵ Па и влажности 80% величина поверхностного заряда в исходном состоянии у крупнокристаллического мрамора составляла $\sigma_{\kappa} = -1.18 \cdot 10^{-7}$ Кл/м², у мелкокристаллического мрамора $\sigma_{M} = -1.15 \cdot 10^{-7}$ Кл/м², а у сталактита $\sigma_{cm} = +1.07 \cdot 10^{-6}$ Кл/м². При электризации с помощью заряда эбонита величина плотности наведенного поверхностного заряда на образцах изменилась и стала $\sigma_{\kappa H} = +1.0 \cdot 10^{-6}$ Кл/м² для крупнокристаллического мрамора, $\sigma_{MH} = +2.5 \cdot 10^{-6}$ Кл/м² для мелкокристаллического и $\sigma_{cm H} = +2.5 \cdot 10^{-6}$ Кл/м² для сталактита. Таким образом, произошла поляризация образцов, и суммарный заряд наэлектризованных поверхностей образцов стал положительным.

Далее исследовалось время релаксации наведенной плотности поверхностного заряда σ_{μ} на образцах крупнокристаллического и мелкокристаллического мрамора, а также на образце сталактита. Зависимости времени релаксации поляризованного состояния заряженных образцов представлены на рисунок 4.12. На рисунке видно, что время релаксации внесенного заряда для кр/кр мрамора составило 50 минут, для м/кр мрамора – 80 минут, а для сталактита – 90 мин. На полученных закономерностях видно, что с уменьшением размера структурных элементов образцов увеличивается время релаксации поверхностного заряда. Эксперимент повторялся 5 раз. В результате погрешность измерения наведенного заряда составила \pm 7%. Внесение электрического заряда приводит к возникновению наведенного электрического поля, которое в результате деформирования двойных электрических слоев на границе зерен приводит к вызванной поляризации исследуемых образцов [214].



Рисунок 4.12 – Зависимость релаксации наведенной плотности поверхностного заряда σ_{μ} на образцах кальцита от времени: ■ – мрамор крупнокристаллический; ▲ – мрамор мелкокристаллический; ◆ – сталактит

На рисунке 4.12 видно, что в момент электризации образцов величина наведенного заряда скачкообразно увеличилась, а затем спадает. Первоначальная величина поляризации для исследуемых образцов разная. Затем в образцах крупнокристаллического и мелкокристаллического мрамора идет снижение поляризованного состояния. Известно, что величина поляризации зависит от размеров зерен [189]. Изменения поляризации определяется по значению v, равное разности поверхностной плотности заряда наведенной и начальной отнесенной к начальной величине заряда в исследуемом образце, т.е. $v = (\sigma_H - \sigma)/\sigma$. Так для кр/кр мрамора $v_{\kappa} = 9.77$, для м/кр мрамора $v_{M} = 22.7$, а для сталактита $v_{cm} = 0.47$.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что скорость изменения наведенного заряда *v* или его подвижность зависит от размеров структурных элементов.

Величина поверхностного заряда при электризации образца сталактита изменяется незначительно и остается положительной как до внешней электризации, так и после ее проведения. Такое незначительное изменение наведенного заряда также вызвано структурнотекстурными особенностями образца сталактита. Используемый образец сталактита подбирался специально так, чтобы в нем имелась залеченная трещина. В данном образце она залечена окислами железа. Поскольку разница между исходным σ_{cm} и наведенным $\sigma_{cmн}$ зарядами небольшая, то и потенциал вызванной поляризации низкий. Процесс релаксации σ_{cmn} сталактита имеет особенности. В течение 15 минут после инжекции заряда на поверхность сталактита наблюдается постепенное увеличение σ_{cmn} , а затем его снижение с постоянной скоростью v_{cm} . Это связано с тем, что, по сравнению с крупнокристаллическим и мелкокристаллическим мраморами, в сталактите в компенсации инжектированного заряда участвуют другие более медленные виды поляризации, например, релаксационная поляризация, в том числе междуслойная, которая обусловлена наличием слоев с разной проводимостью. Это и наблюдается в сталактите. В залеченной трещине удельное электрическое сопротивление на четыре порядка выше, чем в основном материале сталактита. Такая поляризация может происходить как в натечных слоях, так и на закристаллизованной внутренней трещине, которая расположена вдоль заряжаемой плоскости. Наличие конкурирующих видов поляризаций, имеющих различные времена релаксаций, последующие их изменения в результате нейтрализации инжектированного заряда и привело к экспериментально полученной зависимости для сталактита. В результате можно с уверенностью констатировать, что наличие возрастания σ_{cmh} после внесения заряда на сталактит обусловлено не только подвижностью заряженных дефектов, но и слоистостью материала.

Таким образом, можно сказать о том, что при инжекции электрического заряда на поверхность образцов кр/кр и м/кр мрамора их поляризация протекает по одному типу, в то время как в сталактите с пространственным внутренним дефектом компенсация внесенного заряда происходит путем различных видов вызванной упругой и релаксационной поляризации. Релаксация плотности индуцированного поверхностного заряда определяется структурно-текстурными особенностями конкретного образца.

В соответствие с поставленными в разделе 4.2 настоящей главы задачами необходимо было экспериментально промоделировать связи структуры кальцита, поляризации и механоэлектрических преобразований в них. Дальнейшие работы развивались в этом направлении [16, 258]. Были проведены исследования электромагнитной эмиссии в процессе их акустического возбуждения. Эксперименты выполнялись на стенде для исследования электромагнитной активности образцов горных пород при акустическом возбуждении, описание которого приведено в разделе 3.2.1. При этом длительность возбуждающих акустических импульсов составляла 5·10⁻⁶ с. В качестве источника акустических импульсов использовался пьезоэлектрический преобразователь. Прием электромагнитных откликов на такое возбуждение осуществлялся емкостным дифференциальным датчиком с записью осциллографом Tektronix TDS210 с последующей передачей на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Воспроизводимость возбуждающих акустических импульсов и электромагнитных откликов на такое воздействие при неизменности геометрии и условий экспериментов очень высокая. Погрешность измерения при проведении таких экспериментов не превышала 2%.

Перед началом эксперимента образцы электризовались с помощью заряженного эбонита. Измерялся поверхностный заряд образцов. В образцах акустический сигнал создавался с помощью пьезоэлектрического преобразователя с интервалом 3 минуты до полной релаксации заряда с одновременной регистрацией электромагнитного сигнала. Зарегистрированная амплитуда ЭМС для исследуемых образцов кальцитов до внесения заряда имела один порядок величины и находилась в пределах (200-350)·10⁻³ В.

Дальнейшие исследования показали, что внесение на поверхность образцов одинакового по величине заряда привело к различным значениям амплитуды электромагнитных откликов. На рисунке 4.13 приведен график изменения через каждые 3 минуты максимальной амплитуды электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении электризованных образцов кальцита в процессе релаксации заряда.



Рисунок 4.13 – Закономерности изменения максимальной амплитуды электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении электризованных образцов кальцита в процессе релаксации заряда через каждые 3 минуты: 1 – мрамор крупнокристаллический; 2 – мрамор мелкокристаллический; 3 – сталактит

Электромагнитный отклик крупнокристаллического мрамора по амплитуде увеличился до десяти раз по сравнению с незаряженным образцом. Максимальная амплитуда отклика достигала значений в 2 В. При внесении заряда мелкокристаллический мрамор при акустическом возбуждении также испускал электромагнитный сигнал с повышенной амплитудой, но величина ее была меньше и составляла только (0.8-0.9) В. Из сталактита при таких же условиях эксперимента электромагнитный отклик свою амплитуду практически не менял.

Таким образом, внесение заряда на поверхность образцов вызвало их поляризацию, деформирование двойных электрических слоев и, как следствие, привело к увеличению амплитуда ЭМС крупнокристаллического и мелкокристаллического мрамора. По мере релаксации поляризованного состояния образцов наблюдается уменьшение амплитуды ЭМС. Приведенные на рисунке 4.13 зависимости для крупнокристаллического и мелкокристаллического мрамора имеют вид экспоненты, общий вид которой $A_{3MC} = A_0 \cdot exp$ -(x/k), где A_{3MC} – амплитуда регистрируемого электромагнитного сигнала; х – время измерений

с начала внесения заряда; A_0 , k, – эмпирические коэффициенты. Этот вид соответствует математическому описанию процесса релаксации поляризованного состояния образцов, а именно, $P(t) = P_0 \exp (t/\tau)$, где P(t) – изменения поляризованного состояния образца во времени, P_0 – значение поляризованного состояния образца в момент окончания инжектирования заряда на поверхность образца, t – время протекания процесса, τ - время релаксации, которое определено выше экспериментально.

Исследование амплитудно-частотных характеристик электромагнитного сигнала, выполненное с помощью быстрого преобразования Фурье, показало, что и в его спектре наблюдаются отличия для образцов мрамора, различающихся по размеру структурных элементов. На рисунке 4.14 приведены амплитудно-частотные характеристики поляризованных образцов. На рисунках видно, что основная разница в спектрах крупнокристаллического (рисунок 4.14а) и мелкокристаллического (рисунок 4.14б) мраморов наблюдается до 40 кГц и выше 80 кГц. Установлено, что диапазон 50-80 кГц обусловлен собственными колебаниями образцов в процессе акустического возбуждения. Существенное различие в низкочастотной части спектров вызвано большими размерами структурных элементов крупнокристаллического мрамора и, как следствие, большей величиной дипольного момента двойных электрических слоев.



Рисунок 4.14 – Амплитудно-частотные характеристики электризованных образцов мрамора: а – крупнокристаллический; б – мелкокристаллический

Появление отличий в высокочастотной области спектра обусловлено с большой вероятностью в крупнокристаллическом мраморе размеров межзеренного пространства. При акустическом возбуждении сталактита амплитуда ЭМС практически находится на одном уровне. Это вызвано тем обстоятельством, что при внешней электризации поверхностный заряд сталактита изменялся слабо, кроме того в нем нет кристаллических структур, а наличие залеченной трещины с повышенным удельным сопротивлением заполнителя только улучшает условия стекания заряда.

Известно, что в массивах на адгезионных границах породообразующих минераловдиэлектриков при механическом или акустическом воздействии на горную породу появление электрического заряда может быть вызвано вследствие пьезоэлектрического эффекта, развития пластической деформации и трения, разрушения диэлектрических минералов и адгезионных границ и другими процессами. В работе Балбачана М.Я. [259] показано, что в процессе трибоэлектризации горная порода приобретает электретное состояние, которое определяется приповерхностными слоями связанных зарядов и остаточной релаксационной поляризацией в объеме, а также поляризацией, обусловленной «свободными» зарядами. Поляризация в целом компенсирует связанные приповерхностные заряды, при этом электретное состояние локализуется на уровне минеральных зерен в объеме. Однако при механическом воздействии на горные породы возникают акустические сигналы, которые распространяются по образцу и участвуют в механоэлектрических преобразованиях на двойных электрических слоях. В результате, при акустическом возбуждении электризованных кальцитов (мраморов), при отсутствии механического воздействия, можно ожидать те же механизмы механоэлектрических преобразований, что и при деформировании или трибоэлектризации.

Таким образом, обобщая исследования, проведенные в настоящем разделе, можно отметить, что электризация образцов кальцита, отличающихся по размеру структурных элементов, приводит к их поляризации и к увеличению поверхностной плотности заряда с уменьшением размеров структурных элементов. Подобную зависимость имеет и время релаксации поверхностного заряда. При этом амплитуда электромагнитного отклика на внешнее акустическое возбуждение из крупнокристаллического мрамора выше, чем у мелкокристаллического. Такие закономерности амплитуды ЭМС зависят от величины дипольного момента структурных элементов. Этим же обстоятельством обусловлены и отличия амплитудно-частотных спектров ЭМС образцов мрамора. Это подтверждают И вышеприведенные расчеты акустоэлектрических преобразований на двойных электрических слоях полостей дефектов, в которых показано, что амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов нахолятся непосредственной в связи с характеристиками детерминированных акустических воздействий и зарядовым состоянием дефектов структур. В результатах расчетов также отображен тот факт, что изменение амплитуды ЭМС линейно зависит от величины заряда на обкладках дефекта и от величины возбуждающего акустического импульса при постоянном зарядовом состоянии дефекта.

В натечном кальците (сталактите) процесс поляризации носит более сложный характер, а суммарная плотность поверхностного заряда до электризации и после нее имеет тот же знак и несущественно отличается по величине. Это и определило слабые изменения амплитуды его электромагнитных откликов. Проведенные исследования показали, что размеры зерен,

130

являющиеся структурными элементами природных минералов и горных пород, существенно влияют на амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом возбуждении наэлектризованных материалов.

В конечном итоге, полученные закономерности влияния электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов показали, что в естественных условиях при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород, по каким-либо причинам, вариации напряженности электромагнитного поля будут определяться и поляризационными токами, отражающими динамические процессы в очаге готовящегося разрушения.

4.4. Влияние постоянных электрических и магнитных полей на параметры электромагнитных откликов при акустическом возбуждении образцов горных пород

В разделе 4.3 настоящей главы было показано влияние размеров зерен образцов кальцита на их электризацию и параметры электромагнитных откликов при внешнем акустическом возбуждении. На параметры ЭМС при таком внешнем воздействии оказывают и размеры блоков, о чем было указано при выборе входных параметров для регистраторов РЭМС1 [199, 260].

С другой стороны, на параметры ЭМС будут влиять и величины приложенных постоянных или слабо меняющихся электрического или магнитного полей, возрастание которых может происходить при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород. Полученные закономерности изменения параметров ЭМС показали бы их связь с развитием процессов разрушения как в образцах, так и в массивах горных пород. Поэтому важным и необходимым было провести исследование закономерностей изменения параметров ЭМС под действием постоянных внешних электрических и магнитных полей. Для экспериментов также использовались образцы горных пород из шахты Таштагольского месторождения.

4.4.1. Влияние постоянного электрического поля на параметры электромагнитных откликов при акустическом возбуждении образцов горных пород

Процессы поляризации образцов горных пород и возбуждение электромагнитных откликов при прохождении детерминированного акустического импульса представлены в предыдущих разделах настоящей главы. В этом разделе будет показано, как изменяются параметры электромагнитных сигналов в присутствии внешнего электрического поля.

Для исследований ЭМС использовались образцы сиенита. Сиенит - интрузивная горная порода. Структура выбранных сиенитов порфировидная. В порфировых выделениях содержится зерна полевого шпата размером 3-5 мм и до 10 мм. Темноцветные минералы образовывали вытянутые скопления. Наблюдалась их преимущественная ориентировка поперек образца. В образце №1 присутствовали тонкие трещины, залеченные карбонатами. Ориентировка трещин примерно совпадала с ориентировкой темноцветных включений. В образце №2 присутствовала тонкая трещина и наблюдалась залеченная трещина, мощностью (5-7)·10⁻³ м, заполненная кварцами и полевыми шпатами (рисунок 4.15).



Рисунок 4.15 – Образец сиенита №2 с трещиной, залеченной кварцем и полевыми шпатами

Образцы сиенита имели равные массы, объем и форму в виде параллелепипеда размером $(3.60 \times 4.65 \times 9.85) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Плотность сиенита составляет $2.63 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а диэлектрическая проницаемость равнялась $\varepsilon = 7.8$. Скорость звука определялась экспериментально, и она находилась в пределах табличных значений 6100 м/с.

Приложение электрического поля производилось с помощью накладных медных электродов на противоположные стороны по всей площади образца. Напряжение подавалось от источника питания от 0 до плюс 100 В и от 0 до минус 100 В. Возбуждение акустических импульсов в сиенитах производили с помощью металлического шарика на стенде для исследования электромагнитной активности образцов горных пород, описанном в разделе 3.2.1. Направление силовых линий электрического поля было таким, чтобы распространяющийся вдоль образца акустический импульс перпендикулярно пересекал силовые линии электрического поля. Один из электродов заземляли. Первоначально исследования проводились отдельно для каждого из образцов сиенитов. Образцы плотно зажимались в струбцине. Для улучшения акустического контакта использовалось минеральное масло. Удар шариком производился на торцевой поверхности образцов вдоль наибольшей грани.

На начальном этапе было проведено акустическое возбуждение без приложения электрического поля. На рисунках 4.16а,б и 4.17а,б показан вид электромагнитного сигнала и его амплитудно-частотный спектр для образцов сиенита №1 и №2, соответственно. Для получения спектра ЭМС использовалось быстрое преобразование Фурье. На рисунках 4.16а,б и 4.17а,б видно, что в исходном состоянии сигналы отличаются по форме, амплитуде и спектру.



Рисунок 4.16 – Аналоговый электромагнитный сигнал из образца №1 сиенита при акустическом возбуждении и нулевом внешнем постоянном электрическом напряжении (а), спектр этого ЭМС (б)



Рисунок 4.17 – Аналоговый электромагнитный сигнал из образца №2 сиенита при акустическом возбуждении и нулевом внешнем постоянном электрическом напряжении (а), спектр этого ЭМС (б)

Для образца №1 спектр сосредоточен в основном от 30 до 80 кГц. Для образца №2 спектр примерно равномерно распределен до 120 кГц. Отличия можно объяснить, во-первых, наличием кварца в составе образца №2 и, во-вторых, структурно-текстурными особенностями образцов.



Рисунок 4.18 – Спектр электромагнитного сигнала образцов сиенита №1 и №2 при акустическом возбуждении и внешнем постоянном электрическом напряжении плюс 100 В и минус 100 В

На следующем этапе эксперимента была произведена электризация образцов путем подачи напряжения +100В, а затем -100В. При включении источника напряжения проводили акустическое возбуждение образцов. На рисунке 4.18 приведены электромагнитный сигнал и амплитудно-частотные спектры при подаче плюс 100В на образцы №1 и №2, а также при включении минус 100В. Анализируя полученные результаты экспериментов, видим, что в процессе электризации происходит вынужденная поляризация образцов, причем этот процесс по-разному протекает в образцах №1 и №2. Для образца №1 поляризация приводит к возрастанию амплитудных полос спектра, наблюдаемых в исходном состоянии, однако появляются в спектре и низкие частоты. По-разному выглядят спектры, полученные при минусовом и плюсовом электрическом напряжении и при акустическом возбуждении образца №2. В процессе поляризации напряжением плюс 100В резко изменился спектр ЭМС. Наблюдается ярко выраженная низкочастотная часть спектра в районе 20 кГц. При приложении напряжения минус 100В спектр электромагнитного сигнала близок к спектру в исходном состоянии (рисунке 4.16б). Однако следует отметить, что и здесь появляется более выраженная низкочастотная часть спектра.

Таким образом, отличия в форме электромагнитного сигнала и в амплитудно-частотных спектрах образцов сиенитов обусловлены, прежде всего, минералогическим составом и их структурно-текстурными особенностями. Видно, что при электризации образцов сиенита в их амплитудно-частотных спектрах появляются низкочастотные его составляющие. Однако процесс поляризации в этих образцах протекает по-разному, что находит свое отражение в спектрах. Для образца №1, имеющего относительно равномерную структуру, смена знака поляризации не вносит существенных изменений в параметры ЭМС. По-другому ведет себя образец №2, имеющий в своем составе кварц. Неоднородность структуры существенно сказалось на параметрах ЭМС образца №2 при его акустическом возбуждении.

4.4.2. Закономерности изменения амплитуды электромагнитных откликов горных пород на акустическое воздействие при увеличении постоянного магнитного поля

Массивы горных пород при развитии геодинамических явлений подвержены воздействию разнообразных полей механических напряжений и сложных деформаций. Действующие механические поля изменяют физические свойства горных пород, в том числе и магнитные [261]. Магнитные свойства горных пород зависят от состава, структурных, морфогенетических и других факторов. Кроме того, магнитные свойства зависят от особенностей ферромагнитных минералов, слагающих конкретную породу. Все это влияет на интенсивность действующего геомагнитного поля. Локальные аномалии магнитное поле может иметь в определенных местах земной коры. Такие аномалии могут быть вызваны тектономагнитными эффектами природного и техногенного происхождения [262, 263]. Магнитные свойств горных пород и минералов, слагающих массив, оказывают существенное влияние на параметры ЭМС, возникающих в процессе развития деструктивных зон в породном массиве [184]. Знание закономерных связей намагниченности минералов и горных пород с параметрами их электромагнитных откликов на импульсное акустическое воздействие полезно и необходимо при разработке методов мониторинга и краткосрочного прогноза развития деструктивных зон и геодинамических событий в породных массивах, в которых возможно прохождение горных ударов.

В связи с этим были проведены исследования по выявлению связей намагниченности магнетитовой руды и параметров ЭМС при детерминированном акустическом возбуждении образцов. Образцами служили горные породы Таштагольского месторождения, которые отбирались из кернов, изъятых из массива при разведочном бурении. Образцы содержали разное количество магнетитовой руды, имели диаметр (42±1)·10⁻³м и длину вдоль оси цилиндра

135

равную (80±2)·10⁻³м. Для простоты расчетов содержания магнетитовой руды подбирались образцы только с рудой и кальцитом. Содержание руды в них определяли из соотношения

$$V_m = V_0 \cdot [1 - (\rho_0 - \rho_m) / (\rho_v - \rho_m)] , \qquad (4-16)$$

где V_m – объем магнетитовой руды в образце, V_o – объем образца, ρ_o – средний удельный вес образца, ρ_m – удельный вес магнетитовой руды, ρ_v – удельный вес породы (в нашем случае кальцита). Исследование закономерных связей намагниченности с параметрами ЭМС при импульсном акустическом возбуждении проводилось на 3 образцах руды с разным содержанием магнетита. Контрольным образцом служил эпидотовый скарн, не содержащий никаких магнетитовых включений. В таблице 2-1 настоящей работы представлены физикомеханические свойства минералов и горных пород Таштагольского железорудного месторождения. Из таблицы видно, что средний удельный вес магнетита составляет 5,17.10³ $\kappa \Gamma/m^3$, кальцита – 2.71·10³ $\kappa \Gamma/m^3$, эпидотового скарна – (2.5÷3.0)·10³ $\kappa \Gamma/m^3$ [264]. При расчете был определен средний удельный вес образцов с содержанием руды. Для образца №0 средний удельный вес составил 4,47·10³ кг/м³, для образца №1 – 4,0·10³ кг/м³, а для образца №3 – 3,25·10³ кг/м³. Расчет показал, что удельный вес образца эпидотового скарна (№4) равен 2,75·10³ кг/м³ и близок к приведенному в таблице 2-1. Используя полученный средний удельный вес, по формуле 4-1 рассчитывалось содержание магнетита в отобранных образцах. В результате расчётов было определено, что в образце №0 содержится по объему 74% магнетита, в образце №1 – 54%, в образце №3 – 0.23%, а в образце скарна - 0%.

Выявление закономерных связей изменения параметров ЭМС от намагниченности образцов и содержания магнетитовой руды проводились на стенде для исследования электромагнитной активности образцов горных пород при акустическом возбуждении, приведенной в разделе 3.2.1 настоящей работы. Для акустического возбуждения образцов использовались удары шариком. Для наглядности блок-схема этого стенда приведена на рисунке 4.19.

На ней с помощью струбцины (1 и 2) образец (6) зажимался между пьезоэлектрическим приемником акустических сигналов ПАП (3) и измерительной трубкой скорости пролета шарика (7). Для исключения наведенных шариком электромагнитных помех между трубкой (7) и образцом (6) вставлялась экранирующая пластина толщиной 2,5·10⁻³м. Акустический контакт между образцом (6), экранирующей пластиной и ПАП (3) осуществлялся минеральным маслом. Электромагнитные сигналы регистрировались индукционным датчиком ЭМД (4), который закреплялся на двухкоординатном оптическом столике (5) на расстоянии 1,5·10⁻³м от образца. Все элементы крепления, механической регулировки, измерительная трубка пролета шарика и датчик измерения ЭМС располагались внутри электромагнитного экрана (8).



Рисунок 4.19 – Структурная блок-схема установки для акустического возбуждения электромагнитных сигналов: 1,2-направляющие и зажимы струбцины, соответственно; 3пьезоэлектрический приемник акустических сигналов ПАП; 4-индукционный датчик ЭМД; 5двухкоординатный оптический столик: 6-образец; 7-измерительная трубка; 8электромагнитный Tektronix TDS2024B осциллограф; PCI-6133экран; NI многофункциональные платы ввода-вывода; СДВ-система динамического возбуждения акустических импульсов; ПК-персональный компьютер

Удар шариком производился с помощью системы динамического возбуждения (СДВ), которая состоит из пружинного устройства, направляющей трубки с двумя оптическими парами светодиодов и фотодиодов, осциллографической приставки Velleman PCS500 и персонального компьютера ПК. Оптические пары обеспечивали контроль времени пролета ударяющего и отскакивающего от мишени шарика. По времени весу и пролета шарика, а также по расстоянию между оптопарами, определялась энергию удара. Шарик, пролетая через СДВ, при ударе по экранирующей пластине и последующем отскоке возбуждал в ней акустический сигнал определенной длительности, амплитуды и энергии. Твердость материала экранирующей пластины создавалась при закалке близкой к твердости шарика. Величина начальной скорости шарика варьировать поджатием пружины. Это позволяло изменять энергию удара в диапазоне (8÷15)·10⁻³ Дж. Акустический сигнал из экранирующей пластины проходил в образец (6) и возбуждал электромагнитные сигналы [217]. Акустический и электромагнитный сигналы, регистрируемые, соответственно, ПАП и ЭМД записывались одновременно на экране запоминающего осциллографа Tektronix TDS2024B. Для сравнения использовался дополнительный измерительный тракт ЭМС, содержащий персональный компьютер и плату

ввода-вывода NI PCI-6133, которая обеспечивала прием сигналов с частотами до 1.0 МГц. Для обеспечения достоверности полученных данных производилось не менее 10 экспериментов. В результате погрешность измерений составила 1,5%.

Сначала проводились исследования параметров ЭМС на каждом из четырех выбранных образцах горных пород при одинаковом акустическом воздействии без наложения внешнего постоянного магнитного поля. По результатам экспериментальных исследований было выявлено, что амплитуды ЭМС находятся на уровне десятков микровольт. Длительность и амплитудно-частотные параметры ЭМС также существенно не отличались. Для определения закономерных связей намагниченности, содержания магнетитовой руды и параметров ЭМС в ходе экспериментов к выбранным образцам прикладывалось постоянное магнитное поле разной напряженности (рисунок 4.20). Внешнее магнитное поле *H* создавалось с помощью постоянного неодим-феррум-борового (NdFeB) магнита.



Рисунок 4.20 – Величины напряженности постоянного магнитного поля *H* на ближней поверхности образца при изменении расстояния установки магнита

Магнит имел размеры $(18 \times 16 \times 50) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ и располагался при намагничивании вдоль оси образца. При непосредственном расположении магнита на поверхности образца напряженность магнитного поля *H* имела величину 2900 Э или $2.3 \cdot 10^5$ А/м. После намагничивания образца магнит убирался, и производилось акустическое возбуждение.

Экспериментальные исследования показали, что при изменении напряженности магнитного поля амплитуды ЭМС при равных акустических воздействиях близки к линейным закономерностям до 180 Э, а далее наблюдаются существенные отклонения коэффициента пропорциональности линейного закона в меньшую сторону. Изменения максимальной амплитуды электромагнитных сигналов при равных параметрах акустического импульсного воздействия приведены на рисунок 4.21.



Рисунок 4.21 – Закономерности изменения максимальной амплитуды электромагнитных откликов на одинаковое импульсное акустическое возбуждение образцов с разным содержанием магнетита от намагниченности в постоянном магнитном поле

При этом надо отметить, что амплитуда ЭМС после акустического возбуждения возвращалась к первоначальной величине, измеряемой до намагничивания. На рисунке 4.21 явно видно, что максимальные амплитуды ЭМС исследуемых образцов возрастают с увеличением в них содержания магнетита. В эпидотовом скарне нет магнетита и амплитуда ЭМС имеет минимальные значения из всех исследуемых образцов. На рисунке также видно, что нарастание амплитуды ЭМС подчиняется явлению гистерезиса для ферромагнетиков при наложении разного по величине внешнего магнитного поля. Известно [265, 266], что магнитная восприимчивость для ферромагнетиков положительна и значительно больше единицы. К ферромагнетикам относится и магнетит. Это обстоятельство объясняет приведенные на рисунке 4.21 изменения амплитуды ЭМС. В приложенном магнитном поле происходит переориентация магнитных диполей. Снятие внешнего магнитного поля с последующим акустическим воздействием приводит к возвращению магнитных диполей в исходное состояние [266]. Эти выводы основываются на экспериментальных исследованиях амплитуд электромагнитных откликов на акустическое возбуждение образцов, постоянно находящихся во внешнем магнитном поле. В этом случае наблюдались ЭМС с волнистой протяженной во времени вершиной и имели существенно меньшие амплитуды. При этом временные параметры амплитудных экстремумов ЭМС соответствовали прохождению переотраженных акустических сигналов в месте нахождения магнита на поверхности образца. Тогда амплитудные экстремумы ЭМС проявляются как результат поочередной смены воздействия магнитных сил и акустических колебаний. В этом случае магнитное поле действует постоянно, а акустический импульс с частотой переотражения акустических импульсов от торцов снимает ориентацию

магнитных диполей в исследуемом образце. Такая закономерность и была выявлена в проведенных экспериментах.

Полученные в ходе исследований закономерности (рисунок 4.21) позволят независимо и объективно определять содержание магнетита в рудных образцах. Это необходимо для оперативного и мобильного определении запасов руды при разведке бурением.

Важным являлось определиться со временем спадания намагниченности в образцах магнетитовой руды без акустического воздействия для ее возврата в исходное состояние. На рисункеи 4.22 приведены результаты исследований изменений амплитуды ЭМС во времени при равных условиях намагничивания образца №1. Перед намагничиванием образец приводился в исходное размагниченное состояние акустическими импульсами.



Рисунок 4.22 – Изменения амплитуды электромагнитных сигналов от времени при равных условиях намагничивания

Контрольной отметкой служила амплитуда ЭМС первоначально не намагниченного образца (в начале экспериментов). Для получения каждой точки графика рисунка 4.22 производилось индивидуальное намагничивание образца в постоянном магнитном поле с равной *H*. Затем осуществлялась выдержка образца во времени без приложения магнитного поля до момента проведения акустического воздействия с одновременным измерением амплитуды ЭМС. На рисунке 4.22 видно, что максимальные амплитуды ЭМС слабо изменяются со временем. Это обстоятельство однозначно обусловлено и слабой переориентацией магнитных диполей образца в исходное состояние без акустического воздействия.

Таким образом, проведенные исследования [267] показали, что на амплитуду электромагнитных сигналов магнетитовой руды при акустическом воздействии оказывает существенное влияние присутствие внешнего магнитного поля. Изменения амплитуды ЭМС зависят от содержания магнетита в образцах руды и подчиняется явлению гистерезиса. Ориентация магнитных диполей магнетита без внешнего акустического воздействия сохраняется длительное время. Воздействие акустическими импульсами приводит ориентацию магнитных диполей в первоначальное не намагниченное состояние. Выявленные в ходе экспериментов закономерности позволяют оперативно и объективно с помощью аппаратурного контроля максимальной амплитуды ЭМС и акустического воздействия с равными параметрами определять содержания магнетитовой руды в кернах горных пород при разведочном бурении.

4.5. Влияние слоистости горных пород на параметры электромагнитных сигналов

Горные породы это сложные гетерогенные образования, в которых всегда имеются объемные дефекты различного содержания и структуры: газовые, жидкостные, твердотельные или их общность. При развитии разрушения горных пород появляются дополнительные протяженные нарушения в виде микротрещин [136, 268]. При прорастании трещин часть высвободившейся энергии переходит в энергию акустического импульса, параметры которого определяются размерами и скоростью раскрытия такого дефекта [269-271]. Распространяясь по горной породе или другому твердому телу, акустические импульсы взаимодействуют со всеми имеющимися или вновь возникшими дефектами. Результатом такого воздействия в диэлектрических материалах, какими являются в своем большинстве горные породы, возникают колебания зарядов или двойных электрических слоев [44, 265] на бортах трещин, на границах включений и блоков, на границах раздела сред и пород или на других поляризованных структурах горных пород. Возникшие колебания сопровождаются генерацией электромагнитных сигналов [59, 153]. При этом интенсивность излучения ЭМС будет определяться вектором Умова–Пойнтинга [265].

4.5.1. Математическое моделирование влияния слоистости материала на параметры электромагнитных сигналов

Для получения качественной связи между акустическим воздействием на образец горной породы и электромагнитным откликом на него проведем математическое моделирование такого процесса в упрощенном виде. В физической модели использовалось акустоэлектрическое преобразование, которое заключалось в возбуждении ЭМС в гетерогенных диэлектрических структурах путем воздействия на них детерминированным акустическим импульсом. Ранее в лабораторных экспериментах было показано [216, 272, 273], что акустические воздействия являются одним из способов возбуждения электромагнитных откликов гетерогенных материалах. Физические эксперименты проводились с емкостными датчиками на стенде для исследования электромагнитной активности образцов горных пород при акустическом возбуждении, приведенной в разделе 3.2.1 настоящей работы.

В расчетах применялся разделенный на четыре части образец, близкий по форме к реальному керну и являющийся моделью слоистой диэлектрической структуры (рисунок 4.23).



Рисунок 4.23 – Графическое представление математического моделирования слоистости образцов и ее влияния на параметры электромагнитного отклика при заданном акустическом воздействии: *а* –распределение плотности среды в виде кусочно-постоянных функций; δ — вид импульсного воздействия; *в* – распределение скорости смещения частиц среды в слоистонеоднородном образце за периоды времени в 10^{-3} с: $1 - 0 \div 0.7$; $2 - 0.7 \div 1.8$; $3 - 1.8 \div 2.2$; $4 - 2.2 \div 2.7$; $5 - 2.7 \div 3.1$; $6 - 3.1 \div 3.5$; c – возникающие давления за периоды времени в 10^{-3} с: $1 - 0 \div 0.7$; $2 - 0.7 \div 1.8$; $3 - 1.8 \div 2.2$; $4 - 2.2 \div 2.7$; $5 - 2.7 \div 3.1$; $6 - 3.1 \div 3.5$; c – возникающие давления за периоды времени в 10^{-3} с: $1 - 0 \div 0.7$; $2 - 0.7 \div 1.8$; $3 - 1.8 \div 2.2$; $4 - 2.2 \div 2.7$; $5 - 2.7 \div 3.1$; $6 - 3.1 \div 3.5$; d – распределение давления в фиксированной точке пространства

При математическом моделировании производилось определение влияния слоистости образца на параметры акустоэлектрических преобразований. Поскольку необходимо было получить качественные зависимости, то достаточно было использовать уравнения для одномерного случая $\{x\}$. При расчетах учитывалась также и временная координата *t*.

На рисунке 4.23а показано, что для двух крайних частей модели принята одинаковая плотность, которая равнялась $\rho = 10^3 \text{ кг/m}^3$, а для средних было выбрано две отличающиеся плотности $2 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^3$ кг/м³, соответственно. Акустическое возбуждение производили в точке, которое являлось аналогией удара шариком. Точка ввода акустического возбуждения располагалась на границе диэлектрического слоистого образца. Форма возбуждающего

акустического импульса приведена на рисунке 4.236, а точка его ввода в образец обозначена стрелкой. Акустические возмущения имели вид сферических волн. Под действием этих волн двойные электрические слои на границах раздела сред приходили в колебательные движения.

Расчеты выполнялись по следующему алгоритму. Сначала для выявления закономерностей распределения возмущений в приведенной на рисунке 4.23 модели осуществляли решение нестационарного уравнения акустики. Затем определяли распределения давления и скорости при известной плотности среды. В последующем производили расчет возбуждения ЭМС при колебании зарядов или двойных электрических слоев. Смещения и давление в определенных точках модельной среды рассчитывались, пренебрегая поперечными ультразвуковыми волнами. В одномерном приближении распространение ультразвука по модельному образцу описывается известными уравнениями акустики [251]:

$$\frac{du(x,t)}{dt} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = 0,$$
$$\frac{dp(x,t)}{dt} + \rho_0 a_0^2 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = 0.$$

В формулах u(x,t) – скорость смещения точек среды; p(x,t) – возникающее давление; ρ_0 – плотность среды; a_0 – скорость ультразвука в материале.

Для численного моделирования уравнение импульсного воздействия записывали в виде:

$$\begin{pmatrix} 0 & \rho_0(x) \\ \frac{1}{\rho_0(x)a_0^2(x)} & 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} p \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$
 (4-17)

Для решения уравнения (4-17) использовался метод конечных элементов. С этой целью использовался математический пакет COMSOL-Multiphysics-4.3a. Основой этого пакета и служит метод конечных элементов (FEM-finite element method). При задании неоднородной плотности среды, как в нашей модели образца, и расчете методом конечных элементов автоматически учитывались условия на границе раздела сред [274]. В результате на всех границах сред учитывалась непрерывность скорости и давления. На рисунке 4.23в,г приведены результаты решения уравнения (4-17) при распространении акустического импульса в слоистонеоднородном модельном образце. Изменения скорости смещения частиц среды во времени показаны на рисунке 4.23в. При этом соответствующая смещению динамика колебаний давления отображена на рисунке 4.23г. Динамику изменений скорости и давления рассматривали в интервале времени (0–0.07) с. Увеличение интервала времени не повышало информативность расчетов. На рисунке 4.23в,г видно, что каждое смещение частиц и давление соответствует определенному моменту времени. На границах сред с разной плотностью и, соответственно, с разным волновым акустическим сопротивлением возникают отражения и

преломление акустического импульса. Это приводит к колебаниям двойных электрических слоев и к генерации ЭМС [265]. Давление на границе раздела сред будет определяться временем, как $f(t) = P(x_0, t)$ (рисунок 4.23д). Возмущения на границе раздела сред будет описываться как:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = \lambda f(t),$$

где x – отклик динамической системы на возмущение, который соответствует отклонению двойного электрического слоя от положения равновесия; ω – резонансная частота колебаний динамической системы в области акустических частот; β – коэффициент упругости или демпфирования динамической системы, отражающий затухание процесса; f(t) – импульсное акустическое воздействие, приведенное выше по тексту и полученное в результате расчета акустической задачи. На рисунке 4.23д приведено давление на границе раздела сред в фиксированных точках (механическое напряжение), где сосредоточены двойные слои. При отражении и преломлении распространяющихся по модельному образцу акустических волн возникает череда импульсных функций с разной амплитудой. Коэффициент λ имеет размерность м²/кг и влияет только на амплитуду колебаний. В общем случае его можно установить равным единице.

В последующем определялось количественные значения величин ω и β в избранной динамической модели. Под действием внешнего акустического возмущения динамическая система входит в состояние резонанса. Это указывает на то, что в спектре регистрируемого ЭМС амплитуда на резонансной частоте ω будет максимальной. Надо помнить, что резонансные частоты ω_i могут определяться размерами щели, трещины, дефекта, шириной границы раздела, углом наклона диполя по отношению к направлению падающей акустической волны. При проведении расчетов была выбрана частота динамической системы, равная $\omega = 5.76 \cdot 10^5$ рад/с. Эта величина соответствовала частоте типичных максимумов в спектрах, полученных экспериментально [273].

В любой динамической системе коэффициент демпфирования β определяется "вязкостью" и упругостью системы, или способностью противостояния внешнему акустическому воздействию [251]. Величина β обусловлена шириной спектра регистрируемого ЭМС. Чем уже спектр, тем меньше значение β . В результате медленнее происходит затухание колебаний исследуемой динамической системы. В соответствии с экспериментальными значениями [251] в модельном эксперименте коэффициент демпфирования был выбран равным $\beta = 6 \cdot 10^{-4}$ 1/с.
При моделировании учитывалось, что начальные условия являются нулевыми, так как система до введения возмущения находилась в покое. При решении дифференциального уравнения использовался численный метод Рунге-Кутта 4-го порядка [275] в программноинтегральной среде MathCAD-13. Предварительно дифференциальное уравнение было записано в виде системы уравнений первого порядка (4-18). Это позволяло одновременно получать требуемые координаты и скорость.

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & -2\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ f(t) \end{pmatrix}.$$
 (4-18)

Решение этого уравнения является величиной, пропорциональной плечу диполя с зарядом q. Смещение заряда прямо пропорционально изменениям координаты x(t). Результатом дифференцирования выражения (4-18) является ток, который пропорционален скорости смещения пространственной координаты зарядов двойного электрического слоя:

$$i(t) = \frac{d}{dt}q(t). \tag{4-19}$$

Выражение (4-19) пропорционально первому уравнению системы (4-18) dx/dt = y. Результатом решения может быть определение изменений заряда q(t) и тока смещения i(t). Для оценки спектрального состава полученных решений q(t) и i(t) использовалось разложение в ряд Фурье:

$$q(t) = \frac{b_0}{2} + \sum_{k=0}^N a_k \sin(\omega_k t) + b_k \cos(\omega_k t) = \operatorname{Re}\left(\frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^N A_k \exp(-j\omega_k t)\right).$$

При этом коэффициенты разложения в ряд Фурье задавались выражениями:

$$a_{k} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T} q(t) \sin(\omega_{k} t) dt, \quad b_{k} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T} q(t) \cos(\omega_{k} t) dt, \quad j = \sqrt{-1}.$$

Очевидно, что $\frac{A_0}{2} = \frac{b_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt$ – среднее значение функции за период.

Такие же действия и операции справедливы и для тока смещения. Для использования быстрого преобразования Фурье очень удобна обозначенная комплексная форма представления ряда.

Решение дифференциального уравнения получилось в дискретном виде. Поэтому определение коэффициентов разложения проводилось с помощью быстрого преобразования Фурье при значениях $N = 2^9 - 1 = 511$. Результаты расчетов приведены на рисунке 4.24. Здесь отображены изменения заряда q(t) и тока смещения i(t). Здесь видно, что при колебаниях

заряда под действием акустической волны через образец протекает ток смещения. Далее производился расчёт амплитудно-частотных спектров заряда q(t) и тока смещения i(t).

Закономерности изменения спектров приведены на рисунок 4.25а, б. Надо отметить, что различие в них имеют место быть только в низкочастотной области спектров. Результатом изменений q(t) и i(t) будет испускание ЭМС слоистой диэлектрической структурой, параметры которого определяются распространяющимся детерминированным акустическим импульсом.







Рисунок 4.25 – Рассчитанные амплитудно-частотные спектры: a — заряда q(t); δ — тока смещения i(t)

В лабораторных экспериментах акустическое возбуждение образцов горных пород и других модельных гетерогенных материалов осуществлялось ударом шарика из пружинного устройства или посредством пьезоэлектрического излучателя [276]. Акустическое воздействие имело вид близкий по форме, используемой в расчетах. В результате в реальных экспериментах

при акустическом возбуждении регистрировались ЭМС образцов горных пород, параметры которых близки к расчетным по форме, временным и частотным параметрам [216].

Таким образом, проведено математическое моделирование акустоэлектрических преобразований при импульсном акустическом возбуждении, а также изменения параметров электромагнитных откликов в слоистых твердотельных материалах при импульсном акустическом воздействии с заданными параметрами. Расчеты показали закономерности преобразования на двойных электрических слоях энергии возбуждающих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. Кроме того, показана связь амплитудночастотных параметров генерируемых электромагнитных сигналов с зарядовым состоянием слоистых структур и характеристиками детерминированных акустических воздействий.

4.5.2. Физическое моделирование влияния слоистости материалов на параметры электромагнитных сигналов при акустическом воздействии

В процессе исследования влияния слоистости материалов на параметры ЭМС при детерминированном акустическом воздействии на образцы, рассматривались двуслойные системы на примере сиенитов, трехслойные системы из кристаллов искусственного кварца со вставками из полиметилметакрилата (оргстекло), меди и алюминия. Подробно также исследовалась многослойная горная порода серпентинит.

4.5.2.1. Двухслойная система на примере образцов сиенита и кварца

В разделе 4.4.1. настоящей работы приведены результаты исследования влияния постоянного электрического поля на параметры ЭМС при акустическом возбуждении образцов сиенита, приведены их размеры, структурные дефекты и величины прикладываемых внешних электрических полей. Основываясь на полученных результатах при исследовании параметров электромагнитных откликов на детерминированное акустическое воздействие для каждого образца сиенита №1 и №2 с залеченной трещиной, было проведено изучение ЭМС двухслойной системы, состоящей из этих образцов.

С этой целью было проведено акустическое возбуждение контактирующих образцов сиенитов, отличающихся минералогическим составом и текстурой. Описание стенда и методики проведения экспериментов для исследования электромагнитной активности образцов горных пород при акустическом возбуждении приведены в разделе 3.2.1. Образцы плотно зажимались в струбцине. Для улучшения акустического контакта использовалось минеральное масло.

Динамическое возбуждение проводилось по торцевой поверхности одного из образцов ударом шарика (рисунок 4.26). При ударе шариком по образцу №1 электромагнитный датчик (ЭМД) располагался посередине образцов. При этом ЭМД последовательно с помощью лимба двухкоординатного столика перемещался напротив образца №1, посередине контакта, напротив образца №2. При динамическом возбуждении образца №2 последовательность перемещения электромагнитного датчика у образцов и их контакта была сохранена.



Рисунок 4.26 – Схема контакта образцов сиенита №1 и №2, удара шариком и расположения электромагнитного датчика

На рисунке 4.27 приведены амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов образцов сиенита №1 и №2, а также их контакта при различных схемах возбуждения акустического импульса ударом шарика. Вначале возбуждался образец сиенита №1 и регистрировался ЭМС образца №1, контакта и образца №2 с последующим определением их амплитудно-частотных спектров с помощью быстрого преобразования Фурье. Затем такая же процедура производилась при возбуждении акустического импульса ударом по образцу №2. Для надежности воспроизведения применялась и другая схема возбуждения и регистрации ЭМС. В этой схеме, например, возбуждение производилось на образце №1, а ЭМС последовательно регистрировался на образце №1 и №2. Электромагнитный датчик во всех экспериментах был жестко зафиксирован от боковой поверхности контактирующих образцов на расстоянии 2·10⁻³ м, в том числе и при перемещении ЭМД вдоль нее.

Анализ приведенных на рисунке 4.27 данных экспериментов показал, что в спектрах регистрируемых ЭМС при разной схеме возбуждения образцов №1 и №2 присутствуют существенные отличия. Так для образца №1 спектр сигнала сосредоточен в области частот от 1 до 100 кГц.

Спектр ЭМС здесь почти сплошной с выраженными частотными полосами 10, 20, 40, 45 и 65 кГц. При перемещении датчика на контакт образцов амплитуда ЭМС возросла, и изменился его спектр. Здесь выделились три частотные полосы 15, 45 и 65 кГц. При регистрации ЭМС из образца №2 при возбуждении образца сиенита №1 спектр ЭМС резко изменился. Здесь явно выделилась полоса 15 кГц. Анализ спектров ЭМС при акустическом возбуждении образца №2 показал, что частотные полосы примерно равномерно распределены в диапазоне частот 1-160 кГц, когда электромагнитный датчик располагался у боковой поверхности образца №2. При расположении датчика вблизи контакта двухслойной системы спектр ЭМС опять заметно возрос по всем частотам, стал более ярко выраженным. Регистрация ЭМС у поверхности образца №1 показала уменьшение высокочастотной части спектра.



Рисунок 4.27 – Амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов образцов сиенита №1, №2 и их контакта при последовательном возбуждении акустического импульса ударом шарика по центрам образцов №1 и №2

Отличия амплитуды ЭМС двухслойной системы сиенитов и его амплитудно-частотных спектров обусловлены, прежде всего, минералогическим составом и их структурнотекстурными особенностями, которые были представлены в разделе 4.4.1 настоящей работы. Как уже отмечалось, в образце №1 наблюдаются тонкие трещины, залеченные карбонатами. Ориентировка трещин примерно совпадает с ориентировкой темноцветных включений. В образце №2 присутствует тонкая трещина, кроме того, наблюдается залеченная трещина, мощностью (5-7)·10⁻³ м, заполненная кварцем и полевыми шпатами. Наличие кварца в образце №2 изменяет спектр ЭМС, по сравнению со спектром образца №1 не имеющим его в своем составе.

Важным выводом является тот факт, что независимо от точки возбуждения контактирующих сиенитов амплитуда ЭМС на их контакте возрастает, существенно изменяется частотный спектр, а частотные полосы возрастают по амплитуде. Это обстоятельство, с большой вероятностью обусловлено тем, что контакт двух образцов даже одного состава представляет собой двойной электрический слой, при прохождении через который, акустическое возбуждение создает условия для механоэлектрических преобразований, которые отражаются на форме ЭМС и, соответственно, на их амплитудно-частотных спектрах.

Для подтверждения этого положения были взяты два одинаковых искусственных кристалла кварца и также как и образцы сиенита приведены в непосредственный контакт. Кристаллы имели размеры $(6.0 \times 4.0 \times 3.0) \cdot 10^{-6}$ м³. Исследования проводились на том же стенде, что и при исследовании сиенитов. Продольная скорость звука $V_{\kappa n}$ в кристаллических кварцах измерялась по направлениям кристаллографических осей. При этом вдоль этих осей возбуждался и акустический импульс. Экспериментально по трем разным осям были определены следующие продольные скорости звука: $V_{\kappa n l} = 6520$ м/с, $V_{\kappa n 2} = 5900$ м/с и $V_{\kappa n 3} = 6040$ м/с.

Для сравнения амплитудно-частотные характеристики ЭМС используемых в экспериментах одинаковых образцов искусственных кристаллов кварца приведены на рисунке 4.28а,б. При этом длительность их акустического возбуждения соответствовала 10^{-6} с. В экспериментах акустическое возбуждение проводилось вдоль грани кристаллов $6.0 \cdot 10^{-2}$ м³. Параметры ЭМС регистрировались дифференциальным емкостным датчиком. Датчик устанавливался на расстоянии $1.5 \cdot 10^{-2}$ м от поверхности образца, имеющей площадь $(6.0 \times 4.0) \cdot 10^{-4}$ м³. Собственная резонансная частота f_p образцов с продольным размером *L*, вдоль которого распространялся акустический импульс возбуждения, рассчитывалась как $f_p = V_{n3}/2L$. Проведенные расчеты показали, что в амплитудно-частотном спектре ЭМС наблюдается набор частот. Максимальными амплитудами в спектре обладают частоты 60 и 90 кГц. Эти частоты близки к резонансным частотам, которые определяются размерами кристаллов кварца.

Сравнение спектров на рисунке 4.28 подтверждает, что при детерминированном акустическом возбуждении спектральные характеристики подобны у одинаковых по составу и строению материалов.



Рисунок 4.28 – Амплитудно-частотные характеристики ЭМС при одинаковом акустическом возбуждении кристаллов кварца №1 и №2

В последующем осуществлялся контакт этих образцов, также как и образцов сиенита. Контактирующие образцы кварца возбуждались в той же геометрии и с теми же параметрами акустических импульсов, как И раздельные кристаллы. Электромагнитный датчик устанавливался посередине кристаллов №1 и №2, а затем размещался напротив контакта двух образцов. приведены Спектральные характеристики ЭМС контактирующих образцов кварца при акустическом возбуждении приведены на рисунке 4.29. Видно, что контакт кристаллов кварца внес существенные изменения в их амплитудно-частотный спектр. В спектре проявились дополнительные частоты, и снизилась амплитуда частотных полос. При установке емкостного датчика напротив контакта образцов №1 и №2 в спектральных характеристиках регистрируемого ЭМС присутствуют частотные максимумы, характерные для откликов от одиночных образцов. При этом существенно выделяется амплитуда полос вблизи 60 кГц. Такое увеличение амплитуды не может быть обосновано отражением акустического импульса от границы раздела двух кристаллов, так как их волновые сопротивления равны, а плоскости хорошо притерты и смазаны минеральным маслом.



Рисунок 4.29 – Спектральные характеристики контактирующих кристаллов кварца №1 и №2, а также их контакта

С большой вероятностью увеличение амплитуды ЭМС вызвано появлением на границе контактирующих кристаллов двойного электрического слоя. На каждой из граней кристаллов проходящий акустический импульс возбуждает переменное электрическое поле. В результате суперпозиции этих полей и происходят изменения амплитуды ЭМС. Результаты проведенного эксперимента с контактом двух кристаллов кварца указывают на механизм, который на границах прожилков в природных образцах и в натурных условиях на контактах горных пород определяет возрастание амплитуды ЭМС.

В дальнейшем на образцах кварца исследовалось влияние длительности возбуждающего акустического сигнала (AC) и изменения расстояния емкостного датчика от поверхности образца на амплитудные и спектральные характеристики ЭМС (Рисунок 4.30). Проводился цикл измерений параметров ЭМС при изменении длительности AC от 10⁻⁶ до 10⁻⁴с и на разном удалении принимающего датчика от поверхности образца.



Рисунок 4.30 – Зависимость амплитуды ЭМС от длительности возбуждающего импульса и расстояния принимающего емкостного датчика от грани исследуемого образца на частоте спектра 60 кГц

Анализ полученных в этих экспериментах данных измерений показал, что увеличение длительности акустического импульса возбуждения приводит к уменьшению амплитуды частотных полос во всем регистрируемом частотном диапазоне. При возбуждении акустическим импульсом длительностью 5·10⁻⁵с амплитуда ЭМС максимальна, что вызвано, вероятно, резонансом акустического возбуждения на гранях образцов.

В дальнейшем исследовалось влияние создаваемого давления на границе пьезоэлектрического излучателя акустического сигнала и кристалла кварца. Давление варьировалось путем изменения напряжения с импульсного генератора одиночных импульсов на обкладках пьезоэлектрической керамики ступенчато от 100 до 800 В. Причем значения воздействующего давления на образец кварца определялись путем сравнения амплитуды ЭМС при ударе шариком по одному и тому же образцу и амплитуды ЭМС при возбуждении с помощью акустического сигнала, источником которого являлся пьезоэлектрический излучатель. При этом сравнении длительность ЭМС подбиралась одинаковой. Давление при ударе шарика определялось по энергии удара и объема ямки сегмента полусферы в подвергнутом удару материале стали.

Полученные зависимости приведены на рис.4.31. Для анализа были рассмотрены изменение амплитуды на трех характерных частотах 60 кГц, 70 кГц и 88 кГц. Видно, что эти приведенные зависимости амплитуды гармоник ЭМС от воздействующего давления линейны. Это дает основание утверждать, что такая линейность соблюдается во всем диапазоне частот ЭМС в обозреваемом диапазоне давлений.



Рис. 4.31. Зависимость амплитуды гармоник ЭМС от давления возбуждающего импульса

Таким образом, исследования, проведенные на образцах кварца, показали, что также как и на образцах сиенита, на контакте даже двух одинаковых кристаллов амплитуда ЭМС на акустическое возбуждение резко возрастает. Кроме того, амплитудно-спектральные характеристики электромагнитных сигналов зависят ОТ расположения основных кристаллографических осей кварца относительно направления возбуждающего акустического сигнала, а также от параметров акустического возбуждения.

Однако важным является реакция природного кварца на акустическое воздействие. В натурных условиях кварц имеет различные агрегатные состояния и различный вид. В кварцах при наложении различного рода механических напряжений или температурных градиентов всегда возникает электрическая поляризация. Поляризация в нем определяется его кристаллической структурой. Учитывая особенности структуры кристаллов кварца и способность генерировать ЭМС при импульсных механических воздействиях, можно ожидать электромагнитные отклики с повышенными амплитудно-частотными характеристиками из

кварцсодержащих горных пород при развитии деструктивных зон и подготовке геодинамических событий.

В связи с этим в дальнейшем были проведены исследования параметров ЭМС на природных образцах кварцитов. Скорость продольного звука в образцах кварцитов 5930 м/с была определена экспериментально. Отличие от табличной [251] найденной в эксперименте скорости звука обусловлено особенностями структурно-текстурного строения и минеральным составом исследуемых кварцитов. Амплитудно-частотный спектр ЭМС образца кварцита в виде куба с гранью 50·10⁻³ м представлен на рисунке 4.32. Длительность возбуждающего акустического импульса составляла 10⁻⁶ с. Расстояние от ЭМД до грани образца было 1,5·10⁻³ м. В составе образцов кварцита присутствует кварц в кристаллическом и пластинчатом агрегатных состояниях.



Рисунок 4.32 – Амплитудно-частотный спектр ЭМС образца кварцита в виде куба с гранью 50·10⁻³ м

На рисунке видно, что по сравнению со спектром кристаллов кварца (рисунок 4.28) амплитудно-частотный спектр кварцита более насыщен частотными гармониками. При исследовании зависимости амплитуд гармоник спектра ЭМС кварцита отмечено влияние длительности импульса акустического возбуждения, выражающееся в том, что амплитуды гармоник ЭМС имеют максимальное значение при соответствующих длительностях АС. При этом, так же как и для кристаллических образцов, с увеличением длительности импульса акустического возбуждение амплитуда частотных полос во всем регистрируемом диапазоне.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать определенные выводы:

• При акустическом возбуждении в спектре ЭМС кристаллов кварца и природного кварцита всегда присутствуют резонансные частоты, связанные с размерами образца. Этот

вывод важен для выбора частотного диапазона измерительной аппаратуры, используемой в лабораторных и натурных исследованиях ЭМС.

• На контактах кристаллов и горных пород при акустическом возбуждении генерируются ЭМС с повышенной амплитудой и сложным частотным спектром.

• Параметры ЭМС исследуемых материалов и характеристики воздействующего акустического импульса находятся в непосредственной связи. Это обстоятельство указывает на то, генерируемые при росте трещин акустические импульсы участвуют в формировании частотного спектра ЭМС как при развитии разрушения образцов, так и при формировании деструктивных зон в массивах горных пород.

• Изменения параметров возбуждающего акустического импульса и расстояния от излучающей поверхности до принимающего датчика приводят также и к изменениям регистрируемых параметров ЭМС.

4.5.2.2. Трехслойные модельные системы со вставками, имеющими разный акустический импеданс

В качестве трехслойных систем использовались кристаллы кварца, результаты исследований которых представлены в подразделе 4.5.2.1. Для вставок по всей плоскости контактов использовались материалы, волновое акустическое сопротивление (акустический импеданс) которых $z_i = \rho_i c_i$, где ρ_i – плотность материала, а c_i – скорость продольная звука в нем, отличалось или было близким к акустическому импедансу кристаллов кварца $z_{\kappa} = \rho_{\kappa n} c_{\kappa n}$, где $\rho_{\kappa n} = 2650 \text{ кг/м}^3$, $c_{\kappa n} = 5900 \text{ м/с}$. Для используемого направления распространения продольного звука $z_{\kappa} = 15.6 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Используемые для моделирования кристаллы кварца, как уже отмечалось выше, имели форму параллелепипеда с размерами (6.0×4.0×3.0)·10⁻⁶ м³. Меньшими гранями кристаллы прижимались друг к другу через тонкие вставки из различных материалов, моделируя слоистость горных пород. В качестве вставки использовался метилметакрилат (ПММА, оргстекло) толщиной 3.10⁻³ м. Оргстекло имеет меньшую чем у кварца плотность $\rho_{opc} = 1200 \text{ кг/м}^3$ и почти в два раза меньшую скорость продольной волны c_{opc} = 2670 м/с. Для ПММА z_{opc} = 3.2·10⁶ кг/м²·с. В расчетах принималось, что прочностные свойства материала образца справочные. Контакт между кристаллами кварца и ПММА осуществляли с помощью минерального масла. Импульсная нагрузка прикладывалась по центру боковой грани одного образца кварца площадью (4.0×3.0)·10⁻⁴ м² нормально наибольшей поверхности вставки.

Производился численный расчет в представленной выше модельной системе образцов со вставкой [19]. Задача реализовывалась в плоской постановке. Это позволило использовать в

расчетах конечно-разностные сетки с мелким шагом. Такой подход особенно актуален при анализе деформаций и напряжений с большими градиентами. Подобные градиенты деформаций и напряжений неизбежно возникнут в окрестностях вставки. Такой подход относится и к статической задаче, когда рассматривается напряженно-деформированное состояние (НДС) среды в окрестности вставки, и к параметрам НДС, анализируемых в волновой постановке. С другой стороны, плоская постановка задачи, так же как и пространственная, позволяет проследить наличие основных эффектов в проходящей упругой волне. В частности, это относится к описанию продольных и поперечных волн, их скоростей и т.д. Используемая для расчетов область представляла форму прямоугольника. Размер прямоугольника определялся продольным сечением модельной слоистой системы со вставкой. При расчетах использовали линейные геометрические соотношения Коши, связывающие деформации и перемещения, и линейные физические соотношения между напряжениями и деформациями. Уравнения равновесия также принимались в стандартном для плоских постановок виде.

При распространении акустического импульса по модельной системе образцов со вставкой изменялось и ее напряженно-деформированное состояние. При численной реализации определения изменений НДС в такой системе использовалась нецентральная разностная схема второго порядка точности относительно шагов по пространственной и временной переменной. По внутренней сходимости при изменении параметров пространственной сетки и шагов интегрирования по времени оценивалась корректность результатов расчетов. Результаты расчетов визуализируются в виде трехмерных волновых областей, иллюстрирующих распространение упругих возмущений в среднем сечении модельной системе образцов со вставкой. На рис. 4.33 приведены результаты расчетов распространение упругих возмущений в трехмерном виде по модельной системе с ПММА. Общая длительность импульса приложенной нагрузки в расчетах составляла величину $t_0/2 = 50 \cdot 10^{-6}$ с. На рисунке 4.33а,6 представлены результаты расчетов изменения НДС при 6·10⁻⁶ с (а) и при 12·10⁻⁶ с (б). Приложенное упругое возмущение за это время еще не дошло до вставки. Таким образом, за это время процесс развивается в расчетной области как в случае однородного материала. Поскольку колоколообразный импульс, заданный для расчетов искусственно обрезался по ширине граничными условиями, то в зоне приложения нагрузки наблюдается два всплеска напряжений. Это обуславливает его скачкообразное изменение, и, соответственно, к появлению пиков напряжений. Далее на рисунке 4.33 приведены изменения НДС для моментов времени 24·10⁻⁶ с (в) и 27·10⁻⁶ с (г). Расчет показал, что за 15·10⁻⁶ с возмущения достигают вставки. По законам акустики [251] часть возмущений отражается, а другая проходит дальше, в соответствии с соотношениями волновых сопротивлений кварца и ПММА. В результате до вставки возникают высокочастотные колебания. Осцилляции напряжений хорошо заметны на рисунке 4.33 в

156

моменты времени, соответствующие $24 \cdot 10^{-6}$ с и $27 \cdot 10^{-6}$ с. За вставкой изменения НДС имеют меньшие амплитуды и частоты. Необходимо отметить, что изменение частоты очевидно связано с деформационно-прочностными характеристиками материала вставки. Здесь вставка из ПММА, имеющая в три раза меньший акустический импеданс, отсекает высокочастотный спектр волнового процесса и выполняет роль демпфера. В образце кварца при распространении колоколообразного импульса до вставки наоборот присутствуют высокочастотные колебания, которые возникают при наложении акустических возмущений в процессе отражения.



Рисунок 4.33 – Распределение интенсивности напряжений на поверхности модельной системы образцов со вставкой в моменты времени: а) – $6 \cdot 10^{-6}$ с, б) – $12 \cdot 10^{-6}$ с, в) – $24 \cdot 10^{-6}$ с, г) – $27 \cdot 10^{-6}$ с

Для выявления связи параметров акустических импульсов возбуждения тройных модельных слоистых структур и амплитудно-частотных спектров электромагнитных сигналов, возникающих в них вследствие механоэлектрических преобразований, были проведены исследования на слоистых модельных системах образцов кварца, описание которых приведено выше, со вставками между ними, имеющими разный акустический импеданс. При регистрации ЭМС использовался дифференциальный емкостной датчик с двумя принимающими

пластинками площадью по 10⁻⁶ м². Датчик перемещался вдоль оси боковой поверхности тройных модельных слоистых структур с помощью лимба оптического столика.

Акустическое возбуждение модельных систем проводилось с помощью пьезоэлектрического излучателя. Длительность акустического импульса воздействия $50 \cdot 10^{-6}$ с, а давление на поверхности кварца составляло $40 \cdot 10^{6}$ Па. При этом на обкладки пьезоэлектрической керамики подавали импульс напряжение 400 В. Сначала в качестве протяженного дефекта использовался полиметилметакрилат (оргстекло) толщиной $1.7 \cdot 10^{-3}$ м, $2.3 \cdot 10^{-3}$ м и $4.3 \cdot 10^{-3}$ м. Измерения проводились через каждые $5 \cdot 10^{-3}$ м по 20 точкам, на которые была разделена поверхность модельной системы.

Статистика измерений параметров ЭМС по каждой точке была не менее десяти возбуждений акустическим импульсом. Таким образом, «сканировали» всю длину распространения акустического сигнала по слоистой модельной системе. На рисунке 4.34 приведены характерные спектры электромагнитного и акустического сигналов при озвучивании слоистой системы.



Рисунок 4.34 – Амплитудно-частотные спектры электромагнитного сигнала (a) трехслойной системы и акустического импульса ее возбуждения (б)

На риссунке 4.35 приведены изменения максимальной амплитуды ЭМС при акустическом возбуждении модельной системы кварцев со вставкой из ПММА толщиной $1.7 \cdot 10^{-3}$ м. Погрешность измерения амплитуд ЭМС и акустического импульса возбуждения не превышала 2%. Начало координат по оси абсцисс соответствует положению точечных принимающих пластинок электромагнитного датчика от поверхности образца, через которую вводился акустический импульс. При толщине вставок из ПММА 2.3 · 10⁻³ и 4.3 · 10⁻³ м зависимости амплитуд ЭМС и расстояния от точки введения акустического импульса несколько видоизменялась, но тенденция закономерностей оставалась прежней. На рисунке 4.35 видно, что за вставкой из ПММА амплитуда ЭМС уменьшается. Это хорошо согласуется с

результатами расчетов, приведенных выше. Хорошее согласие выявлено и при анализе амплитудно-частотных спектров ЭМС в кварце до вставки и после нее. Так на расстоянии 15·10⁻³ м от поверхности ввода акустического импульса спектр насыщен более высокочастотными составляющими, а на отметке 95·10⁻³ м произошел существенный сдвиг в низкочастотную область спектра.



Рис. 4.35. Изменения максимальной амплитуды ЭМС при акустическом возбуждении системы кварцев с ПММА толщиной 1.7·10⁻³ м

В дальнейшем, подобно модельной трехслойной системе с ПММА, экспериментально исследовались закономерности изменения максимальной амплитуды ЭМС при распространении акустического импульса по системе кварцев со вставкой из силикатного стекла, имеющей акустический импеданс $z_{cm} = (\rho_{cm}c_{cm})=14,2\cdot10^6$ кг/с·м² близкий к акустическому импедансу кварца $z_{\kappa n} = 15.6\cdot10^6$ кг/м²·с.

На рис. 4.36 представлена закономерность изменения максимальной амплитуды ЭМС при импульсном акустическом возбуждении трехслойной системы из двух минералов кварца и вставки между ними из силикатного стекла, толщиной 2.1·10⁻³ м. На этом рисунке видно, что в данной трехслойной системе амплитуда ЭМС слабо изменяется. Это обусловлено близкими значениями акустического импеданса кристаллов кварца и вставки из силикатного стекла. В результате границы их раздела почти прозрачны для акустического импульса при его распространении.

В следующем эксперименте использовали в качестве вставки между кристаллами кварца медь, акустический импеданс которой почти в три раза выше акустического импеданса кварца (Рисунок 4.37). При скорости продольного звука 4720 м/с и удельным весом 8900 кг/м³ акустический импеданс меди z_m соответствует 42·10⁶ кг/с·м².



Рисунок 4.36 – Изменения максимальной амплитуды ЭМС при акустическом возбуждении системы кварцев с силикатным стеклом толщиной 2.1·10⁻³ м



Рисунок 4.37 – Изменения максимальной амплитуды ЭМС при акустическом возбуждении системы кварцев со вставкой из меди толщиной 0.5·10⁻³ м

Изменения амплитуды ЭМС симметричны и имеют минимальные значения в области вставки из меди. Этот провал, вероятно, обусловлен присутствием меди, которая, обладая высокой проводимостью и, соответственно большим количеством свободных носителей тока, понижает эффективность двойного электрического слоя.

Детальный анализ проведенных численных расчетов изменения амплитудно-частотных параметров распространяющегося детерминированного акустического импульса по трехслойной системе из кварца и ПММА, а также анализ результатов экспериментальных исследований максимальных амплитуд ЭМС в разных точках трехслойных систем из идентичных кристаллов кварца с вставками из ПММА, силикатного стекла и меди, имеющих разный акустический импеданс, показал:

160

• Амплитуда электромагнитных сигналов, генерируемых в слоистых образцах при механоэлектрических преобразований, находится в прямой связи с амплитудно-частотными параметрами акустического воздействия.

• Наличие слоистых включений во вмещающих материалах резко меняет параметры распространяющегося акустического сигнала. При этом надо учитывать, что слой с меньшим акустическим импедансом отсекает высокочастотную часть спектра колебаний, но пропускает его низкочастотную часть. В соответствие с этим изменяются и амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов слоистых сред, в том числе и горных пород.

• Наличие слоев и прожилков с акустическим импедансом равным волновому сопротивлению вмещающего материала или горной породы не будет вызывать значительных изменений амплитуды ЭМС вблизи включения. В области металлического слоя или, например, прожилка горной породы с повышенной проводимостью в слоистой системе происходит уменьшение амплитуды ЭМС.

4.5.2.3. Параметры электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении многослойных горных пород на примере образцов серпентинита

Для исследования влияния на параметры ЭМС многослойных систем при их акустическом возбуждении был отобран образец горной породы серпентинита [272], который очень хорошо электризуется. Образец серпентинита имел характерное полосчатое текстурное строение, которое заключалось в четком разграничении слоев минералов хризотил – асбеста и серпентина. Толщины слоев хризотил – асбеста соответствовали (1-1.5)·10⁻³ м. а слоев серпентинита – (2-4)·10⁻³ м. Минерал хризотил – асбеста имел поперечно-волокнистый тип расположения волокон, при котором волокна направлены по нормали к плоскости слоя. В этом же направлении в образце наблюдалась трещина мощностью 0.2·10⁻³ м. Кроме того, для экспериментов был изготовлен образец хризотил – асбеста с подобной волокнистой структурой, как в образце серпентинита. Образцы серпентинита и хризотил – асбеста имели идентичные размеры (6.0×3.5×2.4)·10⁻⁶ м³. Эксперименты проводились на стенде с пьезоэлектрическим излучателем акустических импульсов (ПАИ) для исследования электромагнитной активности диэлектрических образцов, который описан в разделе 3.2.1 настоящей работы. С помощью пьезоэлектрического приемника акустических сигналов (ПАП) осуществлялась синхронизация возбуждения акустическим импульсом образцов серпентинита и хризотил – асбеста и запоминающего осциллографа. Длительность импульса акустического возбуждения составляла 10⁻⁵ с. Измерения ЭМС осуществлялось на боковой наибольшей поверхности образца при двух разных ориентациях электромагнитных датчиков (ЭМД) по отношению к слоям хризотил - асбеста и серпентина, а также к направлению распространения акустического импульса (АИ) возбуждения к этим же слоям (рисунок 4.38).



Рисунок 4.38 – Геометрия возбуждения образца серпентинита акустическими импульсами и приема из него акустических и электромагнитных сигналов: а – перпендикулярно слоям и вдоль слоистости хризотил – асбеста; б – вдоль слоев и поперек направления слоистости хризотил – асбеста

Возбуждение с помощью АИ проводилось перпендикулярно слоям, но вдоль слоистости хризотил – асбеста, и вдоль них, но перпендикулярно слоистости хризотил – асбеста (рисунок 4.38). схематично показана грань образца, на которой штриховыми линиями обозначен хризотил-асбест, а между этими слоями – серпентин.

Вначале, с помощью установки с вибрирующим электродом, представленной в главе 3 настоящей работы, измеряли распределение поверхностных зарядов на образце серпентинита. Выявлено, что на слоях хризотил – асбеста величина заряда больше, по сравнению с величиной заряда на слоях серпентина. Поскольку наблюдаются отличия по величине заряда на разных слоях, то можно сказать, что границы минералов представляют собой двойные электрические слои и при акустическом возбуждении вдоль слоистости и перпендикулярно ей должны наблюдаться отличия в параметрах ЭМС. На рисунке 4.39а приведен амплитудно-частотный спектр ЭМС, полученный при геометрии распространения акустического импульса перпендикулярно простиранию слоев, но вдоль слоистости хризотил – асбеста, а на рисунке 4.396 – вдоль слоев, но перпендикулярно слоистости хризотил – асбеста.

Электромагнитный датчик располагался у боковой поверхности образца и ориентирован перпендикулярно фронту распространения акустической волны. На рисунке 4.38a видно, что слоистость волокон хризотил – асбеста направлена также как и акустический импульс при его распространении перпендикулярно слоям. Продольная скорость звука в этом случае составила 4110 м/с. Это объясняется направлением волокон хризотил – асбеста. При перпендикулярном направлении распространения акустического импульса волокна ориентированы вдоль распространения возбуждающего АИ, это и обусловило увеличение скорости звука. При прохождении акустического импульса волокна хризотил – асбеста

ориентированы поперек слоев (рисунок 4.38б). Измеренная скорость звука в таком направлении составила величину около 3240 м/с.



Рисунок 4.39 – Амплитудно-частотный спектр электромагнитных сигналов, при возбуждении акустическим импульсом перпендикулярно простиранию слоев, но вдоль слоистости хризотил – асбеста (а), и вдоль слоев, но перпендикулярно слоистости хризотил – асбеста (б)

Экспериментально определялась также скорость продольного звука в отдельных образцах хризотил – асбеста и серпентина (змеевик). При распространении звука вдоль волокон образца хризотил – асбеста скорость составила 7090 м/с, а поперек волокон – 2550 м/с. Таким образом, скорость продольного звука в серпентините определяется направлением волокон хризотил – асбеста. При переходе из слоя хризотил – асбеста в серпентин изменяется и акустический импеданс, так как при равном удельном весе около 2.5·10³ кг/м³, скорости продольного звука в них существенно отличаются. В образце серпентинита равных размеров с 2–5% включением хризотил – асбеста, взятом на том же месторождении Ак-Довурак (Тува), где подбирались образцы хризотил – асбеста и полосчатого серпентинита, измеренная продольная скорость составила (3800 – 4000) м/с.

При сравнении спектров ЭМС на рисунке 4.39а,6 видно, что положение частотных полос совпадает, однако амплитуды спектра, полученного при вводе акустического импульса вдоль слоев в два раза больше, чем при перпендикулярном зондировании АИ. Поскольку ЭМС возникает в результате механоэлектрических преобразований при прохождении акустического возбуждения границ неоднородностей образца, а скорость звука зависит от структуры составляющих серпентинит пород, это и объясняет увеличение амплитуды спектра ЭМС при продольном направлении акустического возбуждения слоев серпентинита. При этом следует отметить, что серпентинит, в силу хорошей электризации, обладает высокими амплитудами ЭМС. Так в исследуемом образце максимальные амплитуды ЭМС достигали значений 5 В. Это всего в 4-5 раз меньше, чем из аналогичного по размерам кристаллического кварца.

Для подтверждения предположения о существенном влиянии полосчатой структуры образца серпентинита на параметры ЭМС исследовались в такой же геометрии образцы

хризотил – асбеста и серпентинита, содержащего 2–5% включений хризотил – асбеста. Измерения показали, что амплитуда ЭМС из образца хризотил – асбеста на порядок меньше чем из серпентинита, а ее величина не превышает значения 0.2 В. Спектр этих сигналов насыщен низкими частотами, но основные полосы частот в районе (20-40) кГц и (40-60) кГц сохраняются. Амплитуда ЭМС из образца серпентинита, содержащего 2–5% включений хризотил – асбеста, при акустическом импульсном возбуждении такая же незначительная, как и из образца хризотил – асбеста.

Таким образом, экспериментально показано, что составляющие серпентинит минералы в отдельности при возбуждении в равной геометрии одинаковыми акустическими импульсами излучают ЭМС на уровне десятых долей вольта. Создание полосчатой текстуры из этих минералов приводит к появлению разности зарядового состояния на их границах, и при акустическом воздействии резко возрастает амплитуда ЭМС. Такие изменения амплитуды ЭМС вызваны созданием множественных двойных электрических слоев на границах минералов серпентина и хризотил – асбеста. Свой вклад в величину амплитуды ЭМС вносит простирание слоев контактирующих минералов и ориентация слоистости хризотил – асбеста относительно акустического возбуждения.

Подтверждением влияния слоистой текстуры на амплитуду ЭМС при акустическом возбуждении получено при дальнейших исследованиях на образце полосчатого серпентинита. В процессе эксперимента часть слоев последовательно убиралась, производилось возбуждение акустическим импульсом с одинаковыми параметрами. Регистрация ЭМС осуществлялась у одной и той же боковой поверхности образца. На рисунке 4.40а приведены изменения максимальной амплитуды ЭМС при уменьшении количества слоев хризотил – асбеста, а на рисунке 4.40б – изменения амплитуды частотной полосы 32 кГц.



Рисунок 4.40 – Изменения амплитуды электромагнитного сигнала (а) и амплитуды резонансной частоты 32 кГц (б) из полосчатого серпентинита при уменьшении количества слоев хризотил – асбеста при детерминированном акустическом возбуждении

На рисунках 4.40а,б видно, величина амплитуд при последовательном снятии слоев хризотил – асбеста, а следовательно и протяженных двойных электрических слоев серпентина с хризотил – асбестом, уменьшается по закону близкому к экспоненциальному. На рис. 4.41 показано, что не только резонансная частота 32 кГц, но и амплитуды всех других составляющих частотного спектра ЭМС уменьшаются.



Рисунок 4.41 – Изменение амплитуды частотного спектра ЭМС при уменьшении количества слоев хризотил – асбеста в полосчатом серпентините при детерминированном акустическом возбуждении

При исследовании многослойного образца серпентинита был получен еще один важный результат [272]. Регистрируемые в экспериментах электромагнитные и акустические сигналы имели вид затухающих колебательных процессов. В связи с этим, интерпретация результатов измерений производилась по колебательному механизму. При реализации этого механизма основные частоты должны определяться линейными размерами механических осцилляторов. В образцах полосчатого серпентинита такими осцилляторами служат размеры образца, толщина слоев хризотил – асбеста или серпентина и трещин. На рисунке 4.39 видно, что основная энергия ЭМС приходится на частоты до 40 кГц в районе 20–25 кГц. В этом же диапазоне находились спектральные частоты акустического импульса возбуждения. Известно, что резонанс может проявиться при равенстве размеров осциллятора и целого числа полуволн возникают [251]. При этом первая гармоника собственных колебаний f_1 через линейный размер осциллятора *L* связана как

$$L = \lambda / 2 = c / 2f_1, \tag{4.20}$$

где *с* – скорость распространения волны, λ – длина волны. Для частотной полосы ЭМС *f*₁ = 30 кГц при распространении акустического импульса по образцу серпентинита с продольной скоростью *c* = 4000 м/с размеры осциллятора должны соответствовать *L* = 6·10⁻² м. У образца

полосчатого серпентинита такой линейный размер присутствует. Эта частота являлась преимущественной в спектре акустического сигнала, прошедшего через образец. Тогда частотная полоса 30 кГц в спектре ЭМС может быть справедливо связана с наличием заряда на поверхности образца. Такой же вывод можно сделать и по частоте 60 кГц, которая соответствует линейному поперечному размеру образца $3,5 \cdot 10^{-2}$ м. В спектре ЭМС содержатся и высокочастотные составляющие, которые невозможно объяснить резонансными колебаниями осцилляторов в виде полос серпентина и хризотил – асбеста. Имеющаяся в образце трещина мощностью около $2 \cdot 10^{-4}$ м должна генерировать частоту близкую 10 МГц. Для слоев хризотил – асбеста $L_{ha} = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м и серпентина $L_{cn} = 4.0 \cdot 10^{-3}$ м собственные частоты должны иметь значения 2 МГц и 0,5 МГц, соответственно. Было сделано предположение, что имеющиеся максимумы на частотах 110 кГц, 135 кГц и выше в спектре ЭМС с большой вероятностью обусловлены вторичными процессами.

Одним из таких процессов является уменьшение резонансной частоты в результате затухания высокочастотных гармоник. Это предположение не подтвердилось при оценочных расчетах. Так при затухающих колебаниях уменьшение резонансной частоты определяется как [251]

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}, \qquad (4-21)$$

где β - коэффициент затухания, ω_0 – собственные частоты. Измеренная длительность ЭМС составляет приблизительно 4·10⁻⁴ с. Тогда, принимая эту длительность за время релаксации τ возбужденного состояния образца в результате акустического воздействия. Тогда коэффициент затухания $\beta = 1/\tau$, а величина его будет соответствовать значению 0,25· 10⁴ c⁻¹. Для слоя даже с большими размерами, как у серпентина, у которого линейный размер $L_{cn} = 4 \cdot 10^{-3}$ м, собственная частота будет соответствовать $\omega_{ocn} = 2\pi f = 3 \cdot 10^6 pa\partial/c$. Видно, что собственная частота на два порядка больше коэффициента затухания. Поэтому такое значение β не может способствовать заметному уменьшению частоты.

Другим, более продуктивным, оказалось предположение о сложении колебаний и возникновении биений. Период биений T_{δ} определяется как $T_{\delta} = 2\pi / \Delta \omega$, где $\Delta \omega$ – разность складываемых частот. Тогда частота биений $f_{\delta}=1/T_{\delta}=\Delta \omega/2\pi$. Возьмем в качестве близких по размерам осцилляторов слои хризотил – асбеста толщиной 1,5·10⁻³ м и серпентина – 3,0·10⁻³ м. При этом скорость звука в них возьмем $c_{ha} = 2500$ м/с и $c_{cn} = 4000$ м/с, соответственно. Тогда при расчете круговой частоты для слоя хризотил – асбеста получим $\omega_{ha} = 2\pi f / \lambda = 5.25 \cdot 10^6 \, pad/c$, а для слоя $\omega_{cn} = 4.18 \cdot 10^6 \, pad/c$. Поскольку 1 рад/с равен 0.159 Гц, то частота биений будет соответствовать 170 кГц.

Экспериментально на образцах полосчатого серпентинита и слоистых образцах алевролита были подтверждены предположения и математические расчеты о вкладе возникающих биений в частотный спектр электромагнитных откликов слоистых горных пород [196, 272].

Таким образом, проведенные исследования параметров электромагнитных сигналов из минералов серпентина и хризотил – асбеста при их детерминированном акустическом возбуждении показали, что амплитуда ЭМС из каждого минерала в отдельности не превышает значений (0.1–0.2) В даже при акустическом воздействии до 60·10⁶ Па. В тоже время, полосчатая текстура из этих минералов в горной породе серпентинита при таком же акустическом воздействию приводит к существенному десятикратному увеличению амплитуды ЭМС. Возрастание амплитуды, несомненно, вызвано присутствием большого количества двойных электрических слоев на границах полосчатых чередований минералов серпентина и хризотил – асбеста. Этот факт подтверждают и измерения зарядового состояния поверхности серпентинита, и уменьшение амплитуды ЭМС при равном акустическом воздействии после удаления части слоев. Изменения распространения фронта акустического импульса относительно простирания слоев приводит к преобразованиям параметров спектра ЭМС. Кроме того, полученные результаты исследований и их анализ подтверждают резонансный колебательный механизм возбуждения ЭМС при акустическом возбуждении горных пород, имеющих сложное структурно-текстурное строение. С другой стороны, эти же исследования и математические расчеты обосновали положение о том, что в спектре ЭМС сложных по текстуре образцов всегда будут присутствовать частоты разной амплитуды, обусловленные биением из-за сложения близких частот акустических импульсов, возникающих при отражении от структурных включений. При этом набор частот может определяться как размерами структурно-текстурных неоднородностей, так и разностью скоростей акустических импульсов в них.

4.5.3. Электромагнитные сигналы контакта солевых растворов с образцами горных пород при акустическом возбуждении

В предыдущих разделах настоящей главы описано влияние процессов поляризации, постоянных электрических и магнитных полей, контактов твердых минералов и горных пород, а также слоистости горных пород на параметры электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом возбуждении. При добыче полезных ископаемых шахтным способом на Таштагольском месторождении в большинстве проходок и выработок рудного тела присутствует контакт горных пород и воды. На таких контактах происходит минерализация воды. При разработке метода мониторинга развития геодинамических процессов важно знать о том, какое влияние оказывают на параметры электромагнитных сигналов контакты минерализованной воды с горными породами.

Исследования электромагнитной эмиссии при проведении на Таштагольском месторождении взрывов ВВ разного назначения показали, что ее характеристики зависят и от степени увлажнения массива. Наиболее насыщенными водой являются тектонические нарушения и трещины различной мощности, контакты пород, а также известняки. По данным работы [8] на Таштагольском месторождении химический состав воды в шахте в основном гидрокарбонатно-натриевый и кальциевый. Причем минерализация изменяется в пределах от 0,2 до 0,4 г/л [8]. На контактах интрузивных пород со сланцами происходит процесс сульфатизации воды. С одной стороны, вода оказывает существенное влияние на прочностные свойства горных пород, так как снижает межмолекулярные связи в кристаллах, а с другой стороны, она является иммерсионным слоем при распространении волн напряжений разной амплитуды через массив горных пород. В результате этого при проведении взрывных работ вода увеличивает устойчивость породного массива. Влажность в массивах горных пород не является постоянной величиной [277]. Она зависит от времени года и погодных условий, от горных пород, слагающих массив и его размеров, от солнечной активности, способствующей испарению и конденсации влаги, а также от интенсивности водоотвода. Известно [277], что галит KCl и каменная соль NaCl, гипс CaSO₄, кальцит CaCO₃, доломит CaCOMgCO₃ являются основными минералами, которые растворяются в воде. Следует отметить, что если на прочность горных пород влияют количественные и фазовые характеристики воды, то на электрические свойства воды дополнительно влияет ее минерализация. Тогда водные контакты горных пород и их влажность могут влиять также на параметры электромагнитных сигналов и на характеристики электромагнитной эмиссии при акустическом возбуждении горных пород массива.

В работе (278) показано влияние на параметры ЭМС минерализации солью *NaCl* дистиллированной воды, контактирующей с песчаником. Сравнение ЭМС сухого образца песчаника, а затем выдержанного в дистиллированной воде показало существенное снижение его амплитуды при замачивании. При этом растворение в дистиллированной воде соли *NaCl* приводило как к возрастанию амплитуды ЭМС песчаника, так и к изменениям его спектра. Следует отметить, что в экспериментах с водонасыщением, сушкой и минерализацией пористого песчаника амплитуда ЭМС во всех случаях была пропорциональна энергии, вносимой при ударе металлическим шариком.

Важным свойством для генерации электромагнитных сигналов горными породами является их удельное электрическое сопротивление *р_i*, которое может иметь значения от единиц

до 10^{12} Ом·м для разных пород (см. Таблицу 2.2). Разные значения ρ_i горных пород зависят от разных факторов: минерального состава; физико-механических свойств; температуры; давления; метаморфизма и техногенных воздействий [189]. Все эти факторы влияют на проводимость горных пород и их способность сохранять возникающее при развитии разрушения зарядовое состояние, а значит, они будут оказывать влияние и на параметры ЭМС. Для геофизиков важен не химический состав растворенных в воде солей, а лишь общая [289], что возрастание трещиноватости, минерализация. Известно закарстованности, глинистости, обводненности и минерализации подземных вод в магматических и метаморфических горных породах приводит к изменениям их удельного электрического сопротивления от нескольких десятков тысяч до первых десятков Ом.м. В результате между геофизическими методами исследований и методами, использующие механоэлектрические преобразования, существуют отличия. В работе [196] было показано, что уменьшение амплитуды регистрируемых ЭМС наблюдается при увлажнении горных пород и соответствующем понижении их ρ_i . Экспериментальные исследования показали, что минерализация воды в породе еще больше снижает ρ_i , но амплитуда ЭМС при этом начинает возрастать. Такое возрастание амплитуды ЭМС обусловлено тем, что в водных растворах химических элементов их ионы имеют определенный заряд. Заряженные ионы при каких-либо механических воздействиях на горную породу смещаются. Пространственное смещение ионов приводит к изменениям дипольного момента двойного электрического слоя на границе горной порода и минерализованной вода. В соответствие с этим процессом изменяются и параметры ЭМС.

Как уже отмечалось выше по тексту, на параметры ЭМС при механоэлектрических преобразованиях оказывают влияние обводнение горных пород и минерализация воды. Экспериментальные исследования акустического возбуждения контакта воды и горной породы позволят определить природу ЭМС, выявить связь электромагнитной эмиссии с изменениями НДС обводненного породного массива. Полученные закономерности будут использоваться при разработке метода мониторинга изменений НДС массива горных пород по параметрам ЭМС и характеристикам ЭМЭ.

В разделе 4.5.2 было детально показано, что на контактах твердотельных минералов и горных горных a В слоистых породах, происходит возбуждение пород, также детерминированными акустическими импульсами электромагнитных сигналов с более высокими амплитудными параметрами, чем в контактирующих материалах или в материалах слоев в отдельности. В настоящем разделе приводятся результаты исследований закономерных связей параметров ЭМС при акустическом возбуждении контакта горной породы с жидкостью, имеющей разную степень минерализации. Будут также исследованы параметры

169

электромагнитной эмиссии такого контакта при различных напряженностях приложенного постоянного электрического поля.

В качестве объекта исследования был выбран контакт образца микродиорита из Таштагольского месторождения с дистиллированной и минерализованной водой. Среднее удельное электрическое сопротивление микродиоритового образца составляло 2·10⁵ Ом·м. Горная порода отбиралась из дайки в блоке 34 горизонта минус 210 (глубина 660 м). Образец тонкозернистый с мелкими включениями пирита. Пирит из отдельных сформированных кристаллов образует агрегаты небольших размеров. Образец имеет залеченные карбонатами мелкие трещины, расположенные почти перпендикулярно (70-80 градусов) направлению распространения продольного акустического импульса возбуждения.

Для минерализации дистиллированной воды в экспериментах использовалась соль *NaCl*. Известно, что химический состав природных вод определяет их удельную электропроводность. Электропроводность водных растворов обусловлена способностью проводить электрический ток. Тогда электропроводность воды и контактирующих с ней горных пород определяется концентрацией ионов в ней и температурой окружающей среды [189]. Такими ионами могут являться Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl, SO_4^{2-} , HCO_3^- . Одним из главных компонентов химического состава природных вод является натрий, источником которого являются различные самородные растворимые соли натрия, изверженные и осадочные породы.

Результаты анализа подземных и шахтных вод Таштагольского месторождения в 2016 году позволили выделить два типа: гидрокарбонатный и сульфатный. Из катионов преобладают кальций, натрий и магний. Реакция слабощелочная, pH подземных вод составляет 7.85–8.35, pH подземных вод в водосборниках 8.27–8.36. Краткое название воды в Таштагольском месторождении по ионному составу: подземные воды сульфатно-гидрокарбонатные натриево-калиевые кальциевые; гидрокарбонатные кальциевые, гидрокарбонатные кальциевые натриево-калиевые.

Β начале исследований использовался контакт образца микродиорита И дистиллированной воды, возбуждаемый детерминированным акустическим импульсом. В экспериментах использовались методика определения электромагнитной активности горных пород, представленной в главе 3 настоящей работы. При этих исследованиях применялось возбуждение образца микродиорита ударом шарика и вычисления энергии этого удара, регистрация электромагнитного сигнала с помощью емкостного электромагнитного датчика с усилением 100, наложение постоянного электрического поля с заданной напряженностью, измерение проводимости солевых растворов и анализ амплитудно-частотных параметров ЭМС с помощью быстрого преобразования Фурье. Образец имел размеры (8.0×4.0×4.0)·10⁻⁶ м³. В экспериментах образец зажимался в струбцине вместе с пьезоэлектрическим приемником

акустических импульсов и металлической направляющей шарика. При ударе в образце возбуждался детерминированный акустический импульс, распространяющийся вдоль наибольшей его грани, находящейся в контакте с жидкостью. Удар производился стальным шариком весом 0,68 г. Среднее значение энергии, которую передавал стальной шарик образцу, составляло 18·10⁻³ Дж. Аналоговый электромагнитный сигнал запоминался на экране осциллографа Tektronix TDS210. Затем сигнал записывался через последовательный порт RS232 в память персонального компьютера с последующей его обработкой и анализом.

Удельное электрическое сопротивление растворов соли ρ_r измерялось с помощью устройства, представленного на рисунке 4.42. Раствор соли (4) заливался в стеклянную трубку (1), имеющей внутренний диаметр $d = 11.8 \cdot 10^{-3}$ м. Растворы создавались путем внесения определенного количества соли *NaCl* в дистиллированной воде. Заглушки - электрические изоляторы (2) предназначались для исключения вытекания раствора из трубки и образования пустот, а также являлись электрическими изоляторами при подаче напряжения на электроды (3). Между электродами устанавливалось определенное фиксированное расстояние *L*, которое при измерениях составляло $8.0 \cdot 10^{-2}$ м. В процессе измерения ρ_r отслеживалось отсутствие в солевом растворе воздушных пузырьков между электродами. Постоянное напряжение (40 В) подавали от источника постоянного напряжения марки Б5-13 (7). Значения напряжения *U* на электродах измерялось вольтметром (6), а тока *I* – амперметром (5). Исходя из знания установленных и измеренных величин, определялось удельное сопротивление солевого раствора как $\rho_r = U\pi d^2/4IL$.



Рисунок 4.42 – Схема устройства измерения проводимости солевых растворов: 1 - стеклянная трубка; 2 – заглушки-электрические изоляторы; 3 - электроды; 4 – раствор соли; 5 - амперметр; 6 - вольтметр; 7 - источник напряжения

Изменения удельного электрического сопротивления ρ_r солевого раствора от концентрации *NaCl* в процентах к весу дистиллированной воды приведены на рисунке 4.43. Видно, что удельное электрическое сопротивление уменьшается по закону близкому к экспоненциальному. Особенно резко ρ_r уменьшается при изменении концентрации от 0.3% до 0.7%. Дальнейшее увеличении концентрации *NaCl* до 3% приводит к незначительному снижению удельного сопротивления, а при увеличении концентрации от 3% до 5% заметного изменения ρ_r не наблюдалось.



Рисунок 4.43 — Изменения удельного электрического сопротивления ρ_r в соответствие с процентным содержанием *NaCl* в дистиллированной воде

Для контроля изменений параметров ЭМС при контакте с солевыми растворами вначале экспериментов исследовались механоэлектрические преобразования в микродиорите. Для усиления электромагнитного отклика на акустическое импульсное возбуждение образец помещали в электрическое поле, создаваемое с помощью источника постоянного тока Б5-13 и медных электродов площадью 24·10⁻⁴ м². В зависимости от поставленных задач на электроды подавался либо положительный, либо отрицательный потенциал в 40 или 100 В. Электрод, контактирующий с нижней гранью образца и который в дальнейшем вместе с образцом погружался солевой раствор, заземлялся. При ударе шариком возбуждаемый В детерминированный акустический импульс распространялся перпендикулярно силовым линиям электрического поля.

Амплитудно-частотные спектры ЭМС при значениях напряженности электрического поля 10^2 В/м и $2.5 \cdot 10^2$ В/м приведены на рисунках 4.44б и 4.44в, соответственно. Диэлектрическая проницаемость микродиорита $\varepsilon = 10$. При этом без приложения электрического поля $E_o = 0$ максимальная амплитуда ЭМС соответствовала 0.06В, при $E_{40} = 10^2$ В/м – 0.23 В, а при $E_{100} = 2.5 \cdot 10^2$ В/м составляла уже 0.8 В. На рисунке видно, что амплитудно-

частотный спектр ЭМС расширяется как в сторону низких, так и в сторону высоких частот. В спектрах сохраняются основные частоты, соответствующие размеру образца.

В следующих экспериментах образец микродиорита приводился в контакт с солевым раствором. При этом грань образца с прилегающим заземленным электродом помещали в



Рисунок 4.44 – Амплитудно-частотные спектры ЭМС образца микродиарита в отсутствии электрического поля (а), при напряженности электрического поля 10² В/м (б) и 2.5·10² В/м (в)

емкость с солевым раствором на глубину 5·10⁻³ Электрод на противоположной грани M. образца оставался в том же положении, что и в предыдущих экспериментах. Здесь так же, как экспериментах с сухим образцом И В микродиорита, создавалось электрическое поле, а затем измерялись параметры ЭМС. Солевой раствор имел разную концентрацию NaCl в дистиллированной воде: 0,1%, 0,4%, 0.7%, 1%, 2%, 3%, 4%, и 5%. Акустические импульсы в образце создавались ударом шарика. При этом регистрировался ЭМС с расчетом последующим его амплитудночастотного спектра с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье. На рисунках 4.45 приведены для сравнения амплитудночастотные спектры ЭМС сухого образца (рисунок 4.45а) и образца, контактирующего с 5 % раствором NaCl (рисунок 4.456) Напряжённость электрического поля при этом составляла 10² В/м. На рисунке видно, что контакт образца породы с минерализованной жидкостью существенно изменяет амплитудночастотный спектр ЭМС. Спектр уширяется, как в низкочастотную, так и в высокочастотную

части спектра. Исследования системы образец – дистиллированная вода при изменении напряженности приложенного электрического поля от 50 до 250 В/м показали, что амплитудночастотный спектр регистрируемого ЭМС существенно не изменялся. Тогда можно определенно сказать, что представленные на рисунке 4.45б изменения в амплитудно-частотном спектре ЭМС связаны только с растворенной солью *NaCl* в дистиллированной воде.



Рисунок 4.45 – Амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов сухого образца микродиорита (а) и его контакта с 5 % раствором *NaCl* (б) при напряженности электрического поля 10² В/м

Для выявления закономерностей изменения параметров ЭМС от концентрации водного раствора соли были выбраны значимые частотные полосы с максимальными амплитудами в амплитудно-частотных спектрах системы микродиорит – раствор соли *NaCl*. Для электрического поля с напряженностью $E_{40} = 10^2$ В/м такими частотами оказались 10 и 30 кГц

Зависимости изменения амплитуды частотной полосы 10 кГц от концентрации *NaCl* в дистиллированной воде приведена на рисунке 4.46а, а частотной полосы 30 кГц – на рисунке 4.46б.



Рисунок 4.46 – Изменения амплитуды спектральных полос электромагнитных сигналов от концентрации *NaCl* в дистиллированной воде при напряженности электрического поля $E_{40} = 10^2$ В/м: а - спектральная полоса 10 кГц, б - спектральная полоса 30 кГц

Видно, что с увеличением концентрации соли наблюдается уменьшение амплитуды спектральных полос. Кроме того, заметны нестационарные отклонения амплитуды ЭМС от закономерности, построенной сплошной линией.

На рисунках 4.47 показаны изменения амплитуд спектральной полосы 10 кГц при разных напряженностях электрического поля от $E_{40} = 10^2$ В/м до $E_{100} = 2.5 \cdot 10^2$ В/м. Увеличении *E* в 2.5 раза сопровождается ростом амплитуды спектральной полосы 10 кГц в 2.2 раза.



Рисунок 4.47 – Закономерности изменения амплитуд электромагнитных сигналов на частоте 10 кГц от концентрации *NaCl* в дистиллированной воде при напряженностях электрического поля на электродах: $a - E_{40} = 10^2$ В/м; $6 - E_{100} = 2.5 \cdot 10^2$ В/м

При этом надо отметить, что увеличение в растворе процентного содержания соли *NaCl* приводит к уменьшению амплитуды ЭМС по экспоненциальному закону при обоих напряженностях электрического поля, а интервал концентраций соли от 1 до 2% характеризуется нестабильностью амплитуды ЭМС.

Выше по тексту отмечалось, что при *E* более 10^2 В/м в спектре ЭМС появляется полоса на частоте 97 кГц. Было установлено, что в постоянном электрическом поле с $E_{100} = 2.5 \cdot 10^2$ В/м амплитуда спектральной полосы 97 кГц при концентрации соли в водном растворе до 3% имеет большой разброс. С увеличением концентрации наблюдалось устойчивое линейное увеличение амплитуды.

Сравнение закономерностей, приведенных на рис. 4.44, рис. 4.46 и 4.47, показало [279, 280], что амплитуды спектральных полос ЭМС, возникающих при акустическом возбуждении контакта образца микродиорита с минерализованной водой, в основном определяется удельным электрическим сопротивлением солевого раствора. Увеличение концентрации соли в растворе приводит к изменениям зарядового состояния двойного электрического слоя в этой системе и к изменениям амплитудно-частотных параметров ЭМС. Было также экспериментально установлено, что амплитудно-частотные спектры ЭМС имеют существенные различия при контактах образца микродиорита с дистиллированной водой и водным раствором *NaCl*. Растворение в дистиллированной воде соли *NaCl* сопровождается расширением спектра из контактирующей системы «образец микродиорита – водный раствор соли» в низкочастотную

(меньше 25 кГц) и в высокочастотную (до 100 кГц) части спектра ЭМС. При этом было обнаружено, что с увеличением минерализации воды до 3% амплитуда частотной полосы 97 кГц приобретает устойчивый рост.

Такое расширение спектра может быть обусловлены изменение свойств воды в пограничных слоях при контакте с минеральными стенками. Под воздействием поверхностных молекулярных сил такой стенки она приобретает свойства, отличающиеся от свойств «свободной» воды [281]. Воздействие локальных электрических полей возникающих водных центров, а также контактной поверхности твердого тела приводит к образованию цепочечных или плоских конфигураций молекул воды. Возникает новая симметрия водной среды на контакте с твердой поверхностью. Влияние поверхности образца горной породы на образование новой симметрии водной среды зависит от числа и расположения на ней активных центров. Такими центрами могут быть ненасыщенные элементы различных минералов, составляющих структуру микродиорита. Результатом новой симметрии является образование двойного электрического слоя на границе воды и микродиорита. Возбуждение акустическим импульсом этого слоя приводит к генерации ЭМС с определенными параметрами. Внесение NaCl в дистиллированную воду способствует возникновению двойного электрического слоя, насыщенного микрокристаллами этой соли. При концентрации NaCl в растворе до 3% количество и геометрию активных центров, вероятно, растет нелинейно, а при большей концентрации соли количество и геометрия активных центров начинает увеличиваться линейно. Такой характер изменения активных центров на контактирующей поверхности микродиорита будет приводить и к изменениям в двойном электрическом слое. Акустическое воздействие на такой измененный двойной электрический слой будет тоже сопровождаться изменениями в экспериментально наблюдаемых амплитудно-частотных спектрах ЭМС.

Таким образом, проведенными экспериментальными исследованиями показано, что при акустическом возбуждении контакта в системе «микродиорит – минерализованная вода» генерируемые ЭМС имеют параметры, изменяющиеся с увеличением концентрации NaCl в дистиллированной воде. Эти изменения носят двойственный характер. Так, с одной стороны, амплитудно-частотные параметры ЭМС определяются удельным электрическим сопротивлением водного раствора NaCl, что приводит к уменьшению амплитуды с увеличением концентрации соли. С другой стороны, увеличение концентрации NaCl в солевом растворе приводит к расширению частотного спектра ЭМС. С повышением концентрации контактирующего раствора NaCl появляются высокочастотные полосы с линейно возрастающими амплитудами. Показано также влияние величины приложенного электрического поля на параметры ЭМС из системы «микродиорит – минерализованная вода». При возрастании напряженности электрического поля от 10² В/м до 2.5·10² В/м

пропорционально увеличивается амплитуды ЭМС и его основных спектральных полос. Выявленные закономерности изменения амплитудно-частотных параметров ЭМС при контакте минерализованных водных растворов с горными породами необходимо учитывать при разработке информационной системы мониторинга и прогноза геодинамических событий в шахтном поле рудников.

4.6. Закономерности изменения параметры электромагнитных сигналов реальных образцов горных пород при акустическом возбуждении

Исследование влияния контактов слоистых модельных систем и горных пород, а также контактов минерализованной воды с горными породами показало их существенное влияние на параметры электромагнитных откликов при акустическом возбуждении. Горные породы в рудниках и шахтах при изменении напряженного состояния в результате добычи полезных ископаемых всегда находится в возбужденном и неустойчивом состоянии. Поэтому породные массивы стремятся занять энергетически выгодное положение. При этом происходят трещинообразование и смещения масс горных пород, которые сопровождаются акустическими импульсами разной длительности и частоты. Взаимодействие акустических сигналов с двойными электрическими слоями на контактах дефектов, слоев и блоков и сопровождается электромагнитными сигналами. Поэтому при разработке методов и средств мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния массива и краткосрочного прогноза развития геодинамических событий по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии необходимы знания основных закономерностей изменения этих параметров и характеристик при акустическом воздействии на горные породы. Одним из доступных средств исследования этих закономерностей является физическое моделирование механоэлектрических преобразований в лабораторных и натурных условиях. В настоящем разделе приведены результаты исследований параметров ЭМС образцов вмещающих и рудных пород месторождения Таштагольского железорудного на акустическое воздействие. При исследованиях на образцах необходимо учитывать неоднородности горных пород, являющиеся их фундаментальным свойством. Для образцов к ним относятся как неоднородности состава пород в пределах элементарного объема (образца), различие в химическом и минеральном составе, в форме и размерах зерен, а также неоднородности в виде включений, пор и микротрещин, так и неоднородности реальных кристаллов, дефектность кристаллической решетки, дислокации [282]. В реальных образцах горных пород даже изготовленных из одного керна содержатся все перечисленные выше неоднородности, которые являются либо сами источниками зарядов, либо местами концентрации зарядов. При акустическом колебании

зарядов электрическое поле вокруг них изменяется в соответствие с этим воздействием и происходит переход механической энергии в электромагнитную [283]. В следствие МЭП в образце генерируется электромагнитный сигнал, который можно зафиксировать с помощью специальных регистраторов [199, 245], представленных в главе 3 настоящей работы.

В экспериментах предполагалось провести исследования параметров ЭМС и их связи с составом, прочностью и проводимостью образцов. В качестве образцов использовались скарны без содержания магнетита, а также руда с разным содержанием магнетита. Образцы имели разный петрографический состав, включающий в основном кальцит и сиенит в скарнах, кальцит в магнетитовой руде. Образцы изготавливались на отрезном станке Brillant 250 из кернов, поднятых из шахты Таштагольского месторождения. Размеры образцов были одинаковыми и имели диаметр $(42\pm1)\cdot10^{-3}$ м и длину вдоль оси цилиндра $(80\pm2)\cdot10^{-3}$ м. Торцевые стороны образцов изготавливались перпендикулярными к оси цилиндра и были плоскопараллельными с расхождением не более $(0,5\pm0,1)$ градусов. По данным петрографического анализа образцы были разделены на две группы: группа скарнов (S1, S2, S3) и группа магнетитовой руды М1, М2, М3, М4. Содержание магнетита в исследуемых образцах V_m определяли из соотношения 4.16.

Объем всех образцов V_o , был одинаковый и равнялся $111 \cdot 10^{-6}$ м³. Количество магнетита в каждом образце приведено в Таблице 4.1. В этой же таблице представлена предельная прочность исследуемых образцов при одноосном сжатии.

Исследования проводились на стенде для исследования электромагнитной активности образцов горных пород при акустическом возбуждении, представленном в разделе 3.2.1. настоящей работы и в публикации [284]. В качестве источника акустических импульсов использовался пьезоэлектрический излучатель, возбуждаемый напряжением генератора прямоугольных импульсов величиной 800 В с длительностью $5 \cdot 10^{-6}$ и 10^{-5} с. Генератор обеспечивал изменения длительности импульсов напряжения в пределах $10^{-6} - 10^{-4}$ с, а напряжение от 100 до 800 В. Широкополосные пьезоэлектрические излучатель и приемник изготовленные на базе ЦТС-19 имели особую конструкцию [197]. Пьезоэлектрический приемник использовался для регистрации акустического сигнала, прошедшего через образец и обеспечивал регистрацию акустических сигналов в диапазоне $10^{-6} - 10^{-5}$ с.

Исследуемый цилиндрический образец зажимался в струбцинах. Акустический сигнал от пьезоэлектрического излучателя, проходя через образец, генерировал ЭМС, который регистрировался с использованием электромагнитного датчика, закрепляемого на двухкоординатном столике в $2 \cdot 10^{-3}$ м от образца. Двухкоординатный столик позволял с высокой точностью устанавливать электромагнитный датчик около образца. Электромагнитный датчик состоял из двух медных пластин длиной $2 \cdot 10^{-2}$ м и шириной 10^{-2} м и толщиной $0,3 \cdot 10^{-2}$ м, а

также согласующего дифференциального усилителя с коэффициентом усиления 100. Поскольку образцы горных пород имели форму цилиндра, то пластины были изогнуты таким образом, чтобы между боковой поверхностью образца и плоскостью пластины сохранялось расстояние 2·10⁻³ м. Каждая пластина подсоединена к своему входу дифференциального усилителя.

Электромагнитные сигналы и прошедший через образец акустический импульс записывались в память запоминающего осциллографа Tektronix TDS2024B. Затем сигналы передавались через порт RS232 на персональный компьютер. При обработке и анализе сигналов использовались процедуры быстрого преобразования Фурье (спектр Фурье) и лицензионная программа Origin7.

Первоначально исследовались параметры электромагнитных сигналов из образцов скарна, являющегося одной из пород, вмещающей магнетитовую руду. На рисунке 4.48а приведен электромагнитный сигнал, полученный при возбуждении образца скарна S2. Соответствующий этому сигналу спектр Фурье показан на рисунке 4.486. На рисунке 4.486 видно, что пиковые значения амплитуд напряжения в спектре приходятся на частотные полосы в районе 30, 65, 90, 100, 115, 125 кГц. На этих же частотных полосах наблюдались пиковые значения амплитуд спектра для образцов скарна S1 и S3. В спектре Фурье для образцов скарна выделялся пик на частоте 65 кГц. Для образцов скарна по всем пиковым значениям указанных частотных полос был построен график изменения максимальной амплитуды от частоты (рисунок 4.49). После исследований амплитуд ЭМС при акустическом возбуждении образцов скарна и магнетитовой руды была определена их прочность при одноосном сжатии на прессе ИП-500. Образцы скарна имели следующие предельные прочности: S1 – 188 кH; S2 – 234 кH и S3 – 320 кH.



Рисунок 4.48 — Осциллограмма электромагнитного сигнала при возбуждении акустическом импульсом 10⁻⁵ секунды образца S2 (а) и его амплитудно-частотный спектр (б)

179



Рисунок 4.49 – Частотные зависимости пиковых значений амплитуд спектральных составляющих электромагнитных сигналов для образцов скарна S1, S2 и S3: а – при импульсном акустическом возбуждении длительностью 5·10⁻⁶ с; б – при длительности импульса возбуждения 10⁻⁵ с

Из сопоставления данных рисунка 4.49 и величин P_{nped} , представленных в таблице 4.1 следует, что для образцов скарна S1, S2 и S3 с высоким удельным электрическим сопротивлением амплитудные составляющие спектра Фурье уменьшаются при увеличении P_{nped} .

Образцы	Предельная	Удельное	Удельный	Содержание	Амплитуда
	прочность,	электрическое	вес,	магнетита,	ЭМС на
	Рпред	сопротивление,	σ	%	частоте 65 кГц,
	кН	ρ	10 ³ кг/м ³		В
		Ом•м			
Скарны					
S1	188	$4.5 \cdot 10^3$	2.9	0	$135 \cdot 10^{-3}$
S2	234	$5.1 \cdot 10^3$	3.1	0	40.10^{-3}
S 3	320	$4.8 \cdot 10^3$	2.8	0	8·10 ⁻³
Руда					
M1	234	16	3.4	11.7±1	$800 \cdot 10^{-6}$
M2	193	17	3.4	11.7±1	350·10 ⁻⁶
M3	317	19	3.7	18.9±1	$12 \cdot 10^{-6}$
M4	258	21	3.8	21.05±1	3.10-6

Таблица 4.1 – Характеристики образцов скарна и магнетитовой руды

Кроме того, на рисунках 4.49а,б видно, что повышение длительности возбуждающего акустического импульса с 5·10⁻⁶ с до 10⁻⁵ с приводит к уменьшению в 10-100 раз амплитуд частотных полос электромагнитных сигналов, а также к смене порядка следования
зависимостей от частоты пиковых значений амплитуд спектральных составляющих электромагнитных сигналов образцов S2 и S3. Такие изменения параметров ЭМС могут быть связаны с взаимодействием акустических импульсом с размерами включений и образца.

Таким образом, экспериментально установлено существенное понижение амплитуды ЭМС при изменении основной частоты акустического возбуждения от 200 кГц до 100 кГц. Также экспериментально установлена связь предельной прочности диэлектрических горных пород с амплитудой ЭМС. Так на образцах скарна, имеющих близкий минеральный состав, наблюдается увеличение максимальных амплитуд спектральных составляющих ЭМС при уменьшении их предельной прочности. Это обстоятельство указывает на влияние размеров включений и слоев, а также наличие трещин в ослабленных по прочности образцах, на границах которых имеются двойные электрические слои. За счет количества и протяженности двойных электрических слоев в разных по прочности диэлектрических горных породах даже одного минерального состава эти неоднородности способствуют переходу механической энергию в энергию электромагнитного поля и, соответственно, в энергию электромагнитных откликов на акустическое воздействие.

Как известно, в скарнах существуют поры, наполненные минерализованной жидкостью, кроме того, наблюдаются микротрещины различной ориентации и размеров. Именно такие нарушения однородности в образцах скарна ведут к образованию двойных электрических слоев внутри исследуемых нами образцов [69]. В работе Хатиашвили Н.Г. показано, что при прохождении акустических импульсов через такие двойные электрические слои (ДЭС) происходит изменение дипольных моментов, которое сопровождается генерированием ЭМС сигналов. Согласно [285], каждый плоский ДЭС может рассматриваться как система из трех параллельных конденсаторов, соответствующих области пространственного заряда в диэлектриках, слою Гельмгольца на поверхности и слою Гуя - Чапмана в электролите [286, 287]. В зависимости от изменения давления акустического импульса p(t) электростатическая энергия *E* системы будет меняться. Акустическое давление $p(t) = \omega A$, где *A*-величина акустического поля, ω – круговая частота. В работе [69] было показано, что при наличии в породе тонких капиллярных трещин основной вклад в изменение *E* вносят колебания концентрации пространственного заряда на «берегах» трещин:

$$\Delta E(t) = -0.5p(t)[(2\varepsilon - 1/\varepsilon Y)E_0], \qquad (4.22)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость породы, E_0 – начальная энергия ДЭС, а *Y*-модуль Юнга. Максимальная интенсивность потока электромагнитных сигналов *I* из множества синхронно генерирующих ДЭС с поверхности трещин *S* в акустическом поле с частотой ω имеет порядок:

$$I = \omega \Delta ES / \pi \approx E_0 \upsilon_s \rho \omega^2 SA(2\varepsilon - 1) / Y \varepsilon \pi , \qquad (4.23)$$

где v_s – скорость звука, ρ – плотность породы. Таким образом, из выражения 4.23, полученного с помощью модели ДЭС, следует, что величина предельной прочности прямо пропорциональна модулю Юнга $I \sim 1/Y$.

Следовательно, полученный нами результат снижения *I* при увеличении прочности образцов скарна, по крайней мере, не противоречит выводам, которые могут быть сделаны на основе модели ДЭС.

Образцы магнетитовой руды, имеющие те же геометрические размеры, что и образцы скарна, при возбуждении детерминированными акустическими сигналами длительностью 10^5 секунд и такой же амплитуды, как и для S1, S2 и S3, испускали совершенно разные ЭМС, в том числе отличающиеся от ЭМС диэлектрической горной породы скарна. Поэтому на рисунках 4.50 приведены осциллограммы ЭМС и их амплитудно-частотные спектры, а на рисунках 4.51 отображен график пиковых значений амплитудно-частотного спектра для всех четырех исследуемых образцов магнетитовой руды M1, M2, M3 и M4. В Таблице 4.1 и на графике (рис.4.51) видно, что максимальные амплитуды пиковых значений спектральных составляющих ЭМС образцов M3 и M4 на 2-3 порядка меньше амплитуды ЭМС образцов M1 и M2. По петрографическому составу эти образцы отличаются от образцов первой группы содержанием магнетита.



Рисунок 4.50 – Осциллограммы электромагнитных сигналов (а, в, д, ж) и их амплитудночастотные спектры (б, г, е, з) образцов магнетитовой руды М1, М2, М3, М4 при детерминированном акустическом возбуждении

Таким образом, на эмиссионную способность оказывает влияние не только неоднородность состава и дефектность, но и содержание минералов, отличающихся

электрическими и магнитными свойствами. В этом разделе работы рассматривалось влияние только электрических свойств минералов, входящих в состав образцов горных пород. В связи с этим сравним удельное электрическое сопротивление скарнов ρ_{sc} и магнетитовой руды ρ_m .



Рисунок 4.51 – Графики максимальных амплитуд пиковых значений спектральных составляющих электромагнитных сигналов образцов магнетитовой руды М1, М2, М3 и М4 с разным содержанием магнетита

Так у скарнов ρ_{sc} находится в пределах $10^3 \cdot 10^6$ Ом·м, у магнетита ρ_m находится в диапазоне $10 \cdot 10^3$ Ом·м. В магнетитовой руде, за счет включения минералов с большим ρ ,

удельное электрическое сопротивление ρ_{rm} повышается до 10 Ом·м [189]. Тогда можно сделать вывод о том, что эмиссионная способность ЭМС горной породой по электрической составляющей зависит от ее удельного электрического сопротивления. Соответственно, процентное содержание магнетита будет влиять на эмиссию ЭМС магнетитовой руды. В отличие от скарна для исследованных образцов магнетитовой руды прямой зависимости амплитуды ЭМС от прочности или P_{nped} не наблюдалось. Если для образцов скарна S1 and S2 двадцатипроцентное увеличение P_{nped} дает трехкратное падение амплитуды ЭМС, то для образцов руды М1 и М2 при двадцатипроцентном увеличении P_{nped} регистрировался обратный эффект: сигнал ЭМС увеличивается в два раза (Таблица 4.1). Обращает на себя внимание также большая величина ЭМС сигнала для образцов М1 и М2 по сравнению с ЭМС из образцов М3 и М4 сигналами, полученными при равном акустическом воздействии.

Оба вышеуказанных эффекта могут быть объяснены наличием кварцевых включений в магнетитовой руде. Ранее [184] были проведены сравнительные измерения параметров электромагнитных сигналов образцов скарнов, сиенитов, диорита, сланца и руды. Причем отбирались образцы магнетитовой руды, не содержащие кварцевых включений и содержащие 10% кварца (рисунок 4.52). Эксперименты показали, что амплитуда ЭМС в магнетитовой руде с кварцем возрастает в 10 раз по сравнению с амплитудой сигнала в руде без кварца. Аналогичные результаты были получены в работах [288, 289]. В частности, авторы [288] показали, что содержание 36% кварца от объема в образце гранита и 2% кварца от объема в образце габбро при динамическом сжатии увеличивает амплитуду ЭМС почти в 6 раз.

Включения кварца в магнетитовую руду распределены хаотично по объему. Это обстоятельство может быть причиной большого разброса амплитуды ЭМС от образца к образцу. Для сравнительного определения параметров ЭМС при акустическом возбуждении, наряду с влиянием кварца, исследовалось также влияние включений в образцах минерала магнетита [184]. Отобранные для экспериментов 10 образцов различного петрографического состава были распределены в три группы. В первую группу (образцы 1-4) вошли скарны различного состава, в том числе и содержащие магнетит и пирит (образцы 3и 4). Во вторую группу (образцы 5-8) вошли горные породы, которые не имели в своей структуре магнетит. В третью группу выделены образцы магнетитовой руды (образцы 9-10), причем в одном содержался кварц. Каждый из образцов возбуждался детерминированным акустическим импульсом с одинаковой амплитудой и длительностью. Методика возбуждения описана в начале настоящего раздела. Для каждого образа проводилось не менее 10 экспериментов. По полученным аналоговым ЭМС определены максимальные амплитуды. Разброс значений максимальной амплитуды составил порядка 2%.

На рисунке 4.52 в виде гистограмм приведены результаты анализа среднего значения максимальной амплитуды ЭМС для всех образцов. Из гистограмм видно, что средняя амплитуда ЭМС от образцов, имеющих в своем составе пирит и магнетит (образец 3-4), меньше в 1,5-2 раза по сравнению с образцами (1-2), в составе которых нет пирита и магнетита. Для второй группы образцов (5-8) без магнетита амплитуды их электромагнитных сигналов сравнимы со скарнами (1-2) не содержащих в своем составе магнетита. Для образца магнетитовой руды (9) наблюдалось минимальное значение средней амплитуды ЭМС порядка 25·10⁻³ В, а присутствие в образце руды кварца (образец 10) увеличивало среднюю амплитуду ЭМС почти в 10 раз.



Рисунок 4.52 – Максимальные амплитуды электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом возбуждении горных пород: 1 – скарн эпидотовый; 2 – скарн эпидот-гранатовый; 3 – скарн с включения пирита и магнетита; 4 – скарн гранат-магнетитовый; 5 – сиенит; 6 – микросиенит; 7 – метаморфический сланец; 8 – диоритовый порфирит; 9 – магнетитовая руда; 10 – магнетитовая руда с трещиной, залеченной кварцем

Таким образом, в результате экспериментальных исследований для электрической составляющей электромагнитной эмиссии горных пород было показано, что для образцов скарна амплитуда спектральных составляющих ЭМС уменьшается при увеличении предельной прочности образца. Такой эффект может быть с большой вероятностью обусловлен возбуждением ЭМС при прохождении акустического импульса через сетку микротрещин с двойными электрическими слоями. Показано, что увеличение удельного электрического сопротивления на 10% приводит к снижению амплитуды спектральных составляющих ЭМС почти в 4 раза.

Для образцов магнетитовой руды прямой зависимости амплитуды спектральных составляющих ЭМС от предельной прочности не выявлено. Малое удельное электрическое сопротивление магнетитовой руды существенно понижает накопление зарядов на двойных

электрических слоях, что и приводит к снижению амплитуды ЭМС в руде. При этом в образце магнетитовой руды с незначительным содержанием кварца почти в 10 раз повышается амплитуда ЭМС. Кроме того, анализ параметров ЭМС показал, что присутствие в образцах высокопроводящего минерала магнетита приводит к снижению амплитуды в 1,5-2 раза. Была обнаружена прямая связь между удельным электрическим сопротивлением породы и количеством содержащихся в ней минералов с высокой проводимостью. Эта связь обусловлено главным образом структурно-текстурным строением породы. Если между высокопроводящими минералами, такими как магнетит, в породе с высоким удельным электрическим сопротивлением нет непосредственных контактов, и они находятся в ней в виде изолированных друг от друга включений, то проводящие включения не оказывают заметного влияния на сопротивление породы и параметры ЭМС даже при очень высокой их концентрации. Проведенные исследования показали, что существует зависимость амплитуды возбуждаемых ЭМС и амплитуд его спектральных составляющих от количественного содержания в образцах друг пород высокопроводящих минералов, таких как магнетит.

Полученные результаты необходимо учитывать при разработке методов мониторинга и краткосрочного прогнозирования изменений напряженно-деформированного состояния породного массива по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массивов горных пород.

4.7. Мониторинг разрушения образцов горных пород по параметрам электромагнитных сигналов

Измерениями, образцах выполненными на горных пород, показано, что электромагнитный сигнал является хорошим предвестником для определения максимальной прочности образцов [153, 290]. Это может быть использовано для мониторинга изменения напряженного состояния горного массива [22, 291, 292]. В основе этих исследований лежит экспериментально доказанное на образцах горных пород увеличение электромагнитной активности на этапе предразрушения [293]. Однако, при изменении напряженнодеформированного состояния горных пород, как для образцов в лабораторных исследованиях, так и для горных пород в массиве, процесс механоэлектрических преобразований происходит на всех этапах деформирования, начиная с момента зарождения микротрещин, и заканчивая разрушением. В зависимости от этапа деформирования в характеристиках ЭМС присутствуют свои особенности [294].

Наряду с автором настоящей работы проводились исследования этапов разрушения и иностранными учеными. Основное внимание исследователей обращалось на источники ЭМС.

Японскими учеными установлено [12, 265], что возбуждение ЭМС связано с созданием или ростом микротрещин. Также было замечено, что ЭМС появляются за несколько микросекунд перед генерацией АС. Эта задержка, обусловлена разностью скоростей распространения ЭМС акустических импульсов. Чешские исследователи [18, 296] показывают, что возникновение трещин сопровождается перераспределением электрического заряда из-за ослабленных химических связей. Электрические заряды создают дипольные моменты. Колебания бортов трещин изменяют конфигурацию диполей, и, следовательно, создают электрические и магнитные моменты. Это подтверждает дипольный механизм генерации ЭМС в процессе механического воздействия на горные породы. Израильские исследователи [297, 298] в своих работах проводили измерения параметров ЭМС при сжатии образцов горных пород и модельных образцов. Изучение модельных прозрачных образцов позволило выяснить последовательность зарождения трещины, рост и их взаимодействия. В своих работах они, так же как и в работе [293], установили, что на определённых этапах нагрузки изменяются длительности ЭМС.

Измерения, выполненные на образцах горных пород польскими исследователями [299], подтверждают, что ЭМС является хорошим предвестником для определения максимальной прочности материалов и подходит для определения состояния напряжения массива горных пород. Это было продемонстрировано в лабораторных испытаниях на угольных образцах, где непосредственно перед самим разрушением наблюдали ЭМС и АС.

В работах профессора Воробьева А.А., Коктави П., Беспалько А.А. было показано, что генерация ЭМС в горных породах вызывается как эффектами, связанными с образованием микротрещин, так и с прохождением акустических волн через них, которые вызывают колебания заряженных дефектов. Появление заряженных дефектов должно определяться возникновением токов поляризации, которые возникают при силовом нагружении.

4.7.1. Исследования влияние прочности образцов магнетитовой руды на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении в процессе одноосного сжатия

В настоящем подразделе работы показано влияния петрографических свойств образцов горных пород на параметры ЭМС, возбуждаемого детерминированным акустическим сигналом. Объектами исследований являлись образцы горных пород, представленные магнетитовой рудой Таштагольского железорудного месторождения (Таштагол, Западная Сибирь). Образцы подготавливались по методике, описанной в разделе 4.6 настоящей работы. Диаметр образцов составлял (42 ± 1)·10⁻³ м и длину вдоль оси цилиндра (80 ± 2)·10⁻³ м. В таблице 4.2 приведены петрографические данные исследуемых образцов железной руды. Эксперименты проводились

187

на стенде для комплексных исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии при развитии процесса разрушения образцов горных пород, блок-схема которого представлена в разделе 3.2.4 настоящей работы. Одноосное сжатие осуществлялось на прессе ИП-500, развивающим усилие до 500 кН. Аналоговый сигнал силоизмерительной системы управления и значения продольной деформации, возникающей в процессе сжатия образца, записывали в память компьютера с использованием специальной программы.

Образцы магнетитовой руды							
N⁰	Macca	Плотность	Объем	Объем	Macca	Содержание	Предел
образца	образца,	образца,	образца,	магнетита,	магнетита	магнетита в	прочности
	10 ⁻³ кг	10^3кг/m^3	10 ⁻⁶ м ³	10 ⁻⁶ м ³	в образце,	образце,%	на сжатие,
					10 ⁻³ кг		κН
4	456	4,15	110	59	302	66	167
5	399	3,66	109	33	172	43	261
7	384	3,52	109	27	137	36	120
10	401	3,68	109	34	177	44	273
13	434	3,98	109	50	256	59	131
16	463	5,45	104	70	362	78	213

Таблица 4.2 – Петрографические данные экспериментальных образцов

В образец через акустический контакт (минеральное масло) с помощью пьезоэлектрического вводился детерминированный излучателя акустический сигнал. Акустический сигнал, проходя через образец, регистрировался с помощью пьезоэлектрического приемника акустических сигналов. Электрическую составляющую ЭМС, генерируемого образцом при прохождении акустического сигнала принимали дифференциальным емкостным датчиком ЭМД со встроенным усилителем мощности и предварительным усилителем ЭМС с коэффициентом 100. Информационные данные записывали с помощью многофункциональной платы ввода-вывода NI BNC 2120 на ПК для дальнейшего анализа его параметров. Возбуждение образцов акустическими импульсами регистрация И аналоговых электромагнитных откликов образцов горных пород производилось также как и в разделе 4.6 настоящей работы. В эксперименте использовалось ступенчатое нагружение образцов одноосным сжатием на прессе ИП 500, которое после увеличения или уменьшения нагрузки характеризуется поддержкой определенных напряжений на заданном уровне. На рисунке 4.53 приведена типичная нагрузочная кривая, на которой показано ступенчатое одноосное сжатие образца №5 до разрушения. Скорость изменения сжимающих усилий соответствовала 0,3 кН/с. В начале нагружения через каждые последующие 30-40 кН поддерживалось усилие сжатием на достигнутом уровне. На этих уровнях проводилось десятикратное детерминированное акустическое возбуждение образцов.



Рисунок 4.53 – Нагрузочная кривая образца №5

На рисунке 4.54 приведена итоговая осциллограмма изменения амплитуды электромагнитных откликов (ЭМО) при акустическом воздействии на различных этапах нагружения образца. Цифрами на рисунке 4.54 приведена нумерация ступеней при одноосном сжатии.



Рисунок 4.54 – Зависимость амплитуды электромагнитных откликов на акустическое воздействие при нагружении одноосным сжатием для образца №5. Этапы нагружения образца отмечены цифрами 1–8

Видно, что амплитуда электромагнитного отклика на акустическое воздействие изменяется не только на каждое акустическое возбуждения на ступени нагружения, но и по

мере увеличения сжимающей нагрузки. Для выявления амплитудно-частотных характеристик ЭМО на каждой ступени использовалась процедура быстрого преобразования Фурье (БПФ). В экспериментах исследуемые образцы имели различия в текстурном строении, наблюдались трещины различной ориентации и размеров, залеченные и незалеченные кальцитом. В результате неоднородность состава, включения, дефектность приводит к увеличению количества и протяженности двойных электрических слоев, а значит к увеличению количества диполей, излучающих электромагнитные импульсы.

При акустическом воздействии на такие образцы это обстоятельство способствует активному переходу механической энергии в энергию электромагнитного поля, что выразилось в увеличение амплитуды спектральных составляющих ЭМС в наших экспериментах. На рисунке 4.55а приведены полученные зависимости размаха амплитуды ЭМО на различных этапах акустического возбуждения для образца №13 и на рисунке 4.556 для образца №5.



Рисунок 4.55 – Зависимость амплитуды электромагнитного отклика на разных этапах нагружения одноосным сжатием образцов магнетитовой руды: а – образец №13; б – образец №5

Разным цветом на рисунках отмечены статистические значения амплитуд ЭМО, которые были получены в процессе эксперимента. Анализируя полученные результаты, следует отметить, что независимо от того, сколько раз производятся акустические возбуждения, тенденция изменения амплитуды ЭМО сохраняется. Так для образца №13, имеющего в своем составе 59 % магнетита, с увеличением нагрузки до $0,45P_{npe∂}$ амплитуда ЭМО сначала уменьшалась. Начиная с этой нагрузки, амплитуда электромагнитных откликов начинает расти до достижения образцом предельной прочности, которая для образца №13. Ход зависимости

амплитуды ЭМО для образца №5 на разных этапах нагружения одноосным сжатием представлен на рис.4.556. На первых этапах нагружения наблюдалось уменьшение амплитуды, которое продолжается до нагрузки 0,5P_{пр}. Затем амплитуда ЭМО возрастала до значений нагрузки 0,7 *P_{np}*. После этой нагрузки опять наблюдалось уменьшение амплитуды с последующим незначительным ростом до разрушения образца. Такое отличие в амплитуде ЭМО образцов с разным содержанием магнетита можно объяснить тем, что предельная прочность этих образцов разная. Для образца №13 она составила 131 кН, а для образца №5 - 261 кН. По предельной прочности эти образцы отличаются в два раза. Известно, что на прочность горных пород большое влияние оказывают такие факторы, как структурно-текстурное строение, наличия включений, имеющих различную прочность, пор, залеченных и незалеченных трещин. И чем больше неоднородностей, тем меньше предельная прочность, а значит больше источников механоэлектрических преобразований. Из представленных на рисунках 4.55а,б результатов экспериментов видно, что для образца №13, имеющего меньшую предельную прочность, амплитуда электромагнитных сигналов больше, по сравнению с образцом №5, имеющего предельную прочность 261 кН. Увеличение амплитуды ЭМО образца №5 на нагрузке 0,7 Р_{пр} указывает, что на этом этапе нагружения одноосным сжатием произошло формирования очага разрушения, которое отмечалось повышением электромагнитной активности. Для образца №13 такой зависимости не наблюдалось, так как подготовка разрушения этого образца началась сразу же от начала одноосного сжатия.

Следует отметить, что на амплитуду электромагнитных сигналов диэлектрических образцов, включая и образцы магнетитовой руды, существенное влияние оказывает наличие в образцах пьезоэлектрического кварца и электропроводящих минералов, таких как пирит, халькопирит, галенит и графит. Скопления кварца в образцах магнетитовой руды под действием механических сил (акустической волны и нагружения) способны индуцировать электрический заряд, который и обуславливал большую амплитуду ЭМО. Чем больше содержание кварца в образце, тем выше амплитуда ЭМО. Немаловажным является влияние эффекта поляризации электропроводящих минералов пирита и халькопирита. Так на рисунке 4.56 представлена зависимость размаха амплитуды ЭМО от относительной нагрузки для трех образцов магнетитовой руды. На этом рисунке для каждого образца указано процентное содержание кварца (SiO₂), пирита (FeS₂) и магнетита (Fe₃O₄), полученное с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA. Анализируя рисунок 4.56 можно сделать вывод о том, что разница в амплитуде ЭМО образцов магнетитовой руды обуславливалась содержанием минеральных включений кварца и пирита. Так, для образца №16 выявлено высокое содержание магнетита (Fe_3O_4), а амплитуда ЭМО на порядок ниже, чем у образца №5, имеющим в своем составе почти в два раза меньше магнетита, но большее содержание кварца (SiO₂). Для

низкопрочного образца №5, у которого в составе содержится 20 % кварца, амплитуда ЭМО самая высокая.



Рисунок 4.56 – Зависимость размаха амплитуды ЭМО от относительной нагрузки для образцов с различным содержанием кварца и проводящих минералов

В результате проведенных исследований установлено, что чувствительность электромагнитных сигналов к дефектности при многократном прохождении акустической волны возбуждения через объект контроля позволяет отслеживать эволюцию накопления дефектов в условиях напряженно-деформированного состояния.

С увеличением количества содержащегося в горных породах высопроводящего минерала, такого как магнетит, наблюдается уменьшение амплитуды аналогового электромагнитного сигнала и амплитуды спектральных составляющих электромагнитного отклика в процессе одноосного сжатия, а, следовательно, и при изменении напряженнодеформированного состояния образцов горных пород. Амплитудно-частотный спектр электромагнитных откликов образцов с большим содержанием магнетита характеризуется изрезанностью и широкими пределами. Наличие кварца в образцах магнетитовой руды приводит к увеличению амплитуды ЭМО при акустическом возбуждении в процессе одноосного сжатия.

Таким образом, проведенное физическое моделирование влияния прочности образцов руды на параметры электромагнитного сигнала, возникающих при акустическом возбуждении в процессе одноосного сжатия, способствовало дальнейшему продвижению работ над методом мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния образцов горных пород до их разрушения по параметрам электромагнитных сигналов.

4.7.2. Мониторинг разрушения образцов горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии

Известно, что процесс разрушения твердых тел, в том числе горных пород, характеризуется определенной временной продолжительностью и поэтапным развитием. В результате различных геологических, химических и термальных процессов при своем образовании горные породы получили сложную структуру. При механическом воздействии эти структуры преобразовываются и разрушаются по синергетическим законам и образуют разномасштабную иерархию элементов [300]. Участвующие на определенных этапах образовании горных пород физические процессы способствуют накоплению разномасштабных дефектов с последующим проявлением себя на макроуровне. Сначала это проявление приводит к появлению микротрещин, а при дальнейшем развитии к образованию трещин отрыва.

Поскольку реальные образцы горных пород состоят из структурных элементов и минералов, имеющих разную прочность, то и деформация при механическом воздействии будет неоднородной. Неоднородность деформации и разная прочность структурных элементов уже на начальном этапе механического нагружения приводит к повреждениям наименее прочных минералов в объеме горной породы. Кроме того, повреждения в виде микротрещин могут образовываться также на контактах минералов и горных пород, на границах изолированных включений и пор. Увеличение нагрузки сопровождается крупномасштабными процессами, результатом которых является образование устойчивых блоков и неустойчивых блочных систем [301].

Образование микротрещин и их увеличение в диэлектрических материалах всегда сопровождается переносом зарядов в устьях трещин. Возникающие при продвижении трещин акустические импульсы или другие внешние акустические воздействия, образующиеся при зарождении и развитии других дефектов в объеме диэлектрического образца или горной породы, приводят к колебаниям мозаичной структуры зарядов берегов трещин. В результате изменяется дипольный момент заряженных трещин или дефектов структуры и, как следствие, возникновение электромагнитных сигналов [184, 244, 256, 302, 303]. Параметры электромагнитных сигналов будут зависеть от размеров развивающихся трещин и дефектов, а также как показали исследования, приведенные в главе 4 настоящей работы, от электрических, магнитных и прочностных характеристик горной породы. Известно, что электромагнитные сигналы могут вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта возникать в минералах,

обладающих пьезоэлектрическими свойствами. При деформировании пространственновременное распределение параметров ЭМС, их количество и интенсивность следования будут существенно зависеть от структурно-текстурных изменений горных пород или других диэлектрических твердых тел при возникновении деструктивных зон и их развитии до разрушения. В результате в лабораторных экспериментах или при натурных исследованиях горных пород параметры регистрируемых ЭМС будут изменяться в процессе развитии деструктивных процессов.

Поэтому одним из наиболее перспективных методов мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния диэлектрических материалов сложной co структурой, к которым относятся и горные породы, а также выявления предвестников прорастания трещин отрыва в них является метод, основанный на механоэлектрических преобразованиях механической энергии в энергию для генерации ЭМС. При этом в параметрах электромагнитных сигналов присутствуют особенности, характеризующие определенный этап деформирования [244]. Это объясняется тем, что разрушение любых материалов возникает не внезапно, а является заключительным процессом, проходящим в своем развитии несколько этапов за определенный промежуток времени. Механическое воздействие на гетерогенные материалы приводит к неоднородности возникающих внутренних напряжений уже на самых ранних этапах деформирования. Как показали результаты исследований, приведенных в предыдущих разделах настоящей работы, механоэлектрические преобразования обладают высокой чувствительностью к изменениям зарядового состояния, к дефектности, к структурнотекстурными и другими изменениями в гетерогенных материалах. Поскольку возникающие внутренние напряжения через механоэлектрические преобразования обуславливают электромагнитную эмиссию, то это влечет также пространственное и временное распределение электромагнитных предвестников. В результате при деформировании изменяются параметры регистрируемых электромагнитных сигналов, которые могут служить прогностическими признаками возникновения и развития деструктивных зон в материалах.

Вследствие этого, одной из основных задач является изучение параметров и характеристик электромагнитных предвестников как одного из методов контроля процессов разрушения горных пород. Для разработки методов мониторинга развития деструктивных процессов в породных массивах и краткосрочного прогноза геодинамических явлений в шахтном поле рудников по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии необходимо выяснить их связи с изменениями напряженнодеформированного состояния горных пород. Некоторые закономерности таких связей можно установить в лабораторных экспериментах при физическом моделировании механоэлектрических преобразований в процессе разрушения образцов на лабораторных

194

стендах, которые представлены в главе 3 настоящей работы. Поскольку каждый образец горной породы, строго говоря, не имеет себе подобных, а разрушение является необратимым процессом, то в экспериментах необходимо получать максимум информации о связях параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ с изменениями НДС исследуемого образца.

Моделирование механоэлектрических преобразований в горных породах осуществлялось путем одноосного сжатия образцов на установке и по методике, описанной в главе 3 настоящей работы. Объектами исследований были выбраны образцы вмещающей горной породы Таштагольского железорудного месторождения, представленные сиенитами, скарнами и диоритами, образцы кварцсодержащего диабаза, а также образцы руды с разным содержанием магнетита. Первоначально в качестве модельных образцов для выявления основных закономерностей в амплитудно-частотных спектрах ЭМС при одноосном сжатии использовались образцы кварцсодержащего диабаза.

Присутствие кварца гарантировало генерацию ЭМС с амплитудой, существенно превышающей чувствительность используемых приемников, и, соответственно, обеспечивало уверенный прием ЭМС при возникновении и развитии деструктивных зон в образцах диабаза до прорастания трещин отрыва и последующего разрушения. В экспериментах в процессе одноосного сжатия образца воздействие на пьезоэлектрические кристаллы кварца и двойные электрические слои осуществлялось акустическими сигналами при образовании и росте трещин. На рисунке 4.57 приведена осциллограмма изменения амплитуды ЭМС в процессе одноосного сжатия диабаза, записанная в память персонального компьютера с помощью осциллографической приставки PCS500, работающей в режиме самописца. В качестве приемника использовали емкостный датчик. Скорость нарастания сжимающих усилий составляла $(0,30 \pm 0,03)$ кH/с.



Рисунок 4.57 – Осциллограмма изменения амплитуды электромагнитного сигнала в процессе одноосного сжатия до разрушения образца кварцсодержащего диабаза

195

На рисунке видно, что на протяжении всего цикла сжатия изменяется амплитуда ЭМС, причем в зависимости от этапа нагружения происходит либо увеличении амплитуды, либо ее уменьшение. Наряду с амплитудой изменяется и частота следования ЭМС. В процессе эксперимента параллельно с измерением частоты следования ЭМС проводилась регистрация аналоговых сигналов, с записью на цифровой запоминающий осциллограф TDS-2024B. В дальнейшем это позволило с помощью быстрого преобразования Фурье провести расчет спектров ЭМС. На рисунке 4.58 приведены амплитудно-частотные спектры ЭМС на разных этапах развития НДС. Сравнение этих спектров показало, что в зависимости от напряженнодеформированного состояния образца изменяется амплитуда частотный И спектр генерируемого ЭМС. В начале сжатия образца диабаза максимальные амплитуды спектральных составляющих располагалась в интервале (130-150) кГц (рисунок 4.58а). При возрастании нагрузки спектр уширяется от единиц кГц до 270 кГц, а максимальные амплитуды спектральных линий увеличиваются почти в 3 раза (рисунок 4.58б).



Рисунок 4.58 – Амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов на различных этапах напряженно-деформированного состояния образца кварцсодержащего диабаза: а - 80 кH, б – 124 кH, в – 168 кH

Уширение спектра в область больших частот продолжалось до сжимающих усилий, соответствующих формированию деструктивной зоны. Ориентировочно, судя по рисунку 4.57, формирование этой зоны происходит при напряжениях около 124 кН. Продолжение сжатия образца приводит к смещению частотных полос с максимальными амплитудами в сторону меньших частот (рисунок 4.58в). Это происходит на этапе, предшествующему разрушению. Объективный анализ амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов на значимых частотах 100 кГц, 300 кГц и 800 кГц во всем диапазоне изменения НДС образца показал, что максимальные амплитуды выбранных частот различны при нарастании относительной нагрузки. Относительная нагрузка, записываемая как P/P_{nped} , – это отношение текущей нагрузки *P* к предельной P_{nped} , при которой образец разрушается. На рисунках 4.59а,6

показаны изменения максимальных амплитуд выбранных частотных полос от нарастания отношения *P*/*P*_{*nped*}.



Рисунок 4.59 – Изменения максимальных амплитуд частотных полос электромагнитных сигналов при нарастании относительной нагрузки образца диабаза: а – 100 кГц и 300 кГц, б – 800 кГц

Приведенные на этом рисунке зависимости позволили по изменениям максимальных амплитуд спектральных характеристик ЭМС выделить этапы нарастания или уменьшения НДС для всех образцов, независимо от их прочности *P_{nped}*. Предшествующие исследования показали, что изменения интенсивности ЭМС отображают определенные этапы подготовки разрушения и, соответственно, указывают на разные стадии трещинообразования в подвергнутом одноосному сжатию образце горной породы [302, 244, 303]. В работе [304] приведены экспериментальные доказательства влияния прочности исследуемого образца на диапазон нагрузки, соответствующей формированию деструктивной зоны. Формирование очага разрушения соответствует среднестатистической нагрузке (0.4–0.8) *Р*_{пред}. При этом формировании происходит, с одной стороны, активный рост микротрещин, а с другой стороны, существенное возрастание плотности таких трещин. Необходимо учитывать, что чем прочнее образец горной породы, тем ближе формирование очага разрушения приближается к его *P*_{nped}. Это обстоятельство объясняется тем, что в начальной стадии нагружения одноосным сжатием происходит смыкание существующих в нем трещин и пор. В результате более прочные образцы деформируются почти линейно. Эта закономерность подтверждается на экспериментальных зависимостях изменения напряжения и деформации, которые записывались в базу данных и строились автоматически на экране ПК. Длительное деформирование образца горной породы способствует и увеличению накапливаемой упругой энергии. Обратимся опять к экспериментальным исследованиям кварцсодержащего образца диабаза.

На примере образца диабаза (рисунок 4.59) видно, что максимальные амплитуды частот 100 кГц и 300 кГц ЭМС находятся в пределах сжимающих нагрузок (0.5-0.75) *Р_{пред}*. Это соответствует диапазону нагрузок формирования деструктивной зоны в образце. На рисунке также выделяется область сжатия (0.3-0.4) *P*_{пред}, которая предшествует этапу формирования очага разрушения. Здесь также наблюдалось увеличение максимальной амплитуды ЭМС, что обусловлено локальным трещинообразованием на участках породы, ослабленных дефектами или менее прочными минеральными включениями.

На частоте 800 кГц (рисунок 4.59б) ход изменений максимальных амплитуд ЭМС близок к зависимостям, приведенным на рисунке 4.59а. На частоте 800 кГц при нагрузке (0.3-0.4) P_{nped} тоже присутствует увеличение максимальной амплитуды ЭМС. Этот диапазон сжимающих нагрузок сопровождался небольшим локальным разрушением образца. С другой стороны, этап формирования деструктивной зоны во всем образце по зависимости, приведенной на рисунке 4.596, развивается раньше, чем на более низких частотах и начинается с нагрузки не более 0,45 *P_{пред}*. Это отклонение от начала развития деструктивной зоны указывает на то, что сначала появляются трещины малых размеров, акустические импульсы от которых способствуют генерации ЭМС с более высокой частотой. Снижение величины амплитуд на частоте 800 кГц подтверждает образование микротрещин, так как при их образовании генерируются акустические импульсы с небольшой энергией. А выше по тексту в настоящей главе показано, что амплитуда ЭМС находится в прямой зависимости от амплитуды акустического воздействия. При повышении нагрузки происходит срастание малых микротрещин, а появление трещины больших размеров сопровождается генерацией ЭМС в более низком диапазоне частот. На спектральных характеристиках (рисунка 4.58) видно расширение частотного спектра и возрастание амплитуд во всем частотном диапазоне. На рисунках 4.59а,б видно, что после образования очага разрушения при сжимающих нагрузках (0.7-0.8) P_{nped} на частотах 100 и 800 кГц наблюдается увеличение максимальных амплитуд ЭМС. На частоте 300 кГц в указанном диапазоне нагружения такого возрастания амплитуды ЭМС отсутствует, но наблюдается промежуточный максимум в интервале (0.45-0.7) *Р*_{пред}. Это также указывает на то, что развитии очага разрушения происходит путем слияния более мелких трещин. Наличие максимумов на частотах 100 и 800 кГц на нагрузках (0.7-0.8) *Р_{пред}* является свидетельством того, что процесс разрушения нагружаемого образца развивается путем подпитки уже сформированных деструктивных зон вновь образующимися трещинами. При достижении P_{nped} наблюдалось разрушение образца, и, соответственно, прекращалась регистрация ЭМС.

В дальнейшем были проведены исследования характеристик электромагнитной эмиссии и параметров электромагнитных сигналов при таком же нагружении одноосным сжатием до разрушения образцов вмещающих диэлектрических горных пород Таштагольского железорудного месторождения. Для образцов использовался скарн и сиенит. Объединение скарнов и сиенитов в одну группу вмещающих пород обусловлено близкими электрическими свойствами.

Образцы подготавливались по методике, описанной в разделе 4.6 настоящей работы. Диаметр образцов составлял (42±1)·10⁻³ м и длину вдоль оси цилиндра (80±2)·10⁻³ м. Прилегающие к пуансонам пресса торцевые поверхности образцов выравнивались путем шлифования до плоскопараллельности с расхождением менее 0.005 рад.

В качестве приемника при проведении модельных экспериментов использовался регистратор электромагнитных и акустических сигналов РЕМС1, описанный в главе 3 настоящей работы и в статье [199, 219]. Регистратор в режиме самописца фиксировал во встроенную память с усреднением 1 секунда электромагнитную эмиссию сжимаемых образцов. В качестве информативных параметров в течение всего цикла сжатия до разрушения образца в память РЭМС1 записывалось изменение во времени усредненной амплитуды ЭМС по 5 каналам: в частотных полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц; в широкой полосе от 1 до 100 кГц и интенсивность ЭМЭ или изменения количества регистрируемых ЭМС за время усреднения. Чувствительность регистратора РЕМС1 по входу составляла 40 мкВ. Для приема ЭМС к регистратору РЭМС1 подключали емкостный дифференциальный датчик с коэффициентом усиления 36 dB. В качестве второго регистратора использовалась плата вводавывода National Instruments (NI) BNC-2120, работающая в режиме самописца с подключенным персональным компьютером. В ПК для регистрации и анализа полученных результатов была установлена специализированная программа NI Labview Signal Express. С помощью этой программы цифровая обработка проводилась с частотой дискретизации 1МГц. Чувствительность платы по входу составляла 150 мкВ. К плате также как и к регистратору РЭМС1 подключался емкостный дифференциальный датчик с усилением сигнала 20 или 40 dB. Схема регистрации с платой NI BNC-2120 позволяла в реальном режиме времени отслеживать появление ЭМС.

В процессе одноосного сжатия на прессе ИП-500 для всех исследуемых образцов поддерживалась одинаковая скорость нагружения (0,30 \pm 0,03) кH/с. Нагружение образца изменялась линейно до фактического его разрушения. Автоматически измерялось текущая силовая нагрузка одноосным сжатием, продольная деформация и предельная нагрузка разрушения. На основании измеренных данных в ПК автоматически строился график в осях «напряжение–деформация». Это позволило в дальнейшем оценивать этапы развития разрушения образцов горных пород по характеристикам ЭМЭ. Для каждого образца при разрушении характерна своя предельная прочность P_{nped} , обусловленная минералогическим составом и особенностями структурно-текстурного строения.

Используя результаты выше приведенных исследований модельного кварцсодержащего образца диабаза, для каждого образца вмещающей породы определялись этапы уплотнения, формирования деструктивной зоны (очага разрушения), предразрушения и разрушения. На рис. 4.60 показано типичное изменение усредненной за 1 секунду амплитуды ЭМЭ для образца вмещающей породы с предельной прочностью при сжатии 184 кН.

Ранее по тексту уже было показано, что при изменении напряженно-деформированного состояния горная порода процесс МЭП сопровождается электромагнитной эмиссией, которая возбуждается на двойных электрических слоях или на минералах с пьезоэлектрическими свойствами акустическими импульсами, возникающими при трещинообразовании. В зависимости от изменений НДС образца в процессе одноосного сжатия наблюдались особенности ЭМЭ. Отчетливо выделяются: этап уплотнения до 0,2 P_{nped} , этап формирования очага разрушения в области (0.3-0.5) P_{nped} , а также этапы предшествующий разрушению в интервале (0.7-0.96) P_{nped} и разрушения (0.96-1.0) P_{nped} .

В эксперименте использовались емкостные датчики с предварительными усилителями осциллограф тока напряжения, а также запоминающий цифровой TDS-2024. И Регистрировались аналоговые электромагнитные сигналы на различных этапах деформирования образца вмещающей породы. Усредненная электромагнитная эмиссия этого образца при нагружении от нуля до *P_{nped}* показана на рисунке 4.60. В дальнейшем был проведен расчет амплитудно-частотных параметров ЭМС с использованием быстрого преобразования Фурье.

На рисунке 4.61 приведены типичные осциллограммы ЭМС, зарегистрированные при деформировании образца горной породы на этапах формирования очагов разрушения и предшествующего фактическому его разрушению. На начальном этапе формирования очага разрушения частота ЭМС более высокая (рисунок 61а), чем на этапе предшествующего разрушению образца (рисунок 61б).

Для ЭМС, отображенного на рисунок 4.61а, основная частота лежит в пределах 100 кГц, 300 кГц и от 450 до 700 кГц. Такой разброс частот характеризует процессы интенсивного образования дефектов различного масштаба в образце, а это может происходить только на этапе формирования очага разрушения. На этом этапе появились так же ЭМС, параметры которых обусловлены биениями (рисунок 4.62). Появление биения и механизм его возникновения при акустическом возбуждении образцов горных пород описывались выше и в работе [272].

Как уже отмечалось, при одноосном сжатии образцов горных пород возникают трещины различного масштаба, которые в процессе своего роста испускают акустические импульсы.



Рисунок 4.60 – Изменение усредненной амплитуды электромагнитной эмиссии образца вмещающей породы в широкой полосе частот (1–100) кГц



Рисунок 4.61 – Типичные осциллограммы электромагнитных сигналов, зарегистрированные на этапах деформирования образцов вмещающей горной породы: а – 0,54*P*_{pasp} – формирования очага разрушения; 0,82*P*_{pasp} – этап предшествующий разрушению. Усредненная электромагнитная эмиссия этого образца приведена на рисунке 4.60

Амплитудно-частотные параметры этих импульсов задаются размерами трещин, а также скоростями их роста и раскрытия, электрофизическими и прочностными свойствами разрушаемых пород и минеральных включений. Проходя через границы различных дефектов образца, контакты различных минералов, часть из которых образовывают двойные электрические слои, акустические импульсы вызывают генерацию ЭМС.



Рисунок 4.62 – Осциллограмма биения электромагнитного сигнала на этапе формирования очага разрушения

При этом частота и амплитуда ЭМС пропорциональна амплитудно-частотным параметрам возникающих акустических сигналов, а, следовательно, размерам и скоростям раскрытия трещин, величине и ориентации в пространстве дипольных моментов заряженных дефектов в разрушаемой горной породе. Таким образом, биение обусловлено не только разностью скоростей распространения акустического сигнала в гетерогенной напряженнодеформированной горной породе, но и набором близлежащих размеров механических формирования очага разрушения при множестве осцилляторов. В процессе вновь образующихся микро- и макротрещин существенно облегчается подбор осцилляторов с близкими размерами и характеристиками. Появление биений наблюдались и исследовались при нагружении гранитных образцов в работах Коктави П. [18]. В результате работы резонансного колебательного механизма возбуждения электромагнитной эмиссии и появления биений происходит существенное расширение спектра частот ЭМС в область сотен килогерц. Следует отметить, что формирование биений ЭМС как при распространении акустических сигналов от вновь возникающих трещин, так и при внешнем возбуждении образцов горных пород происходит по близким механизмам. В дальнейшем на этапе, предшествующему глобальному разрушению, когда начинается нарушение целостности образца, резко возрастает амплитуда ЭМС, а спектр частот смещается в более низкую область в районе первых десятков килогерц. Однако небольшой пик наблюдается и в более высокочастотной области в диапазоне 450-650 кГц (рисунок 4.62б). Это указывает на возникновение и более мелких трещин при развитии трещин отрыва. Зарегистрированные на различных этапах деформирования электромагнитные сигналы были подвергнуты спектральному анализу, по результатам которого построены амплитудно-частотные зависимости (рисунок 4.63).

Предельная прочность образца скарна, амплитудно-частотные параметры ЭМС которого представлены на рисунке, составила 187 кН. На рисунке видно, что этап формирования очага разрушения, исходя из параметров ЭМС, находится в интервале (0.56-0.68)*P_{nped}* и характеризуется генерацией ЭМС в широком частотном диапазоне. На этом этапе спектры ЭМС имеют максимумы на частотах близких к 100, 300, 400 и 500 кГц.



Рисунок 4.63 – Амплитудно-частотные зависимости максимальных амплитуд электромагнитных сигналов на определенных этапах деформирования образца скарна

На этапе предшествующему разрушению в интервале относительных сжимающих усилий $(0.84-0.89)P_{nped}$ увеличивается доля высокочастотных (450-650 кГц) сигналов. Причем при приближении к предельной прочности 0,89 P_{nped} происходит смещение максимума амплитудно-частотной параметров сигналов (450-650 кГц) в область низких частот.

На рисунке 4.64 для сравнения представлена электромагнитная эмиссия образца скарна с предельной прочностью 295 кН, полученная в тех же условиях, что и образец с предельной прочностью 187 кН. На рисунке видно, что в процессе развития деструкции более прочный образец также обладает этапностью подготовки разрушения. Отличие заключается только в том, что третий этап, предшествующий разрушению $0.8P_{nped}$, имеет более выраженный характер, а этап формирования очага разрушения сдвинут в сторону большей относительной нагрузки (0.45-0.85) P_{nped} . Также отчетливо выделяется этап уплотнения до 0.25 P_{nped} , и разрушения (0.92-1.0) P_{nped} .



Рисунок 4.64 – Изменение электромагнитной эмиссии образца вмещающей породы скарна с предельной нагрузкой разрушения 295 кН

Такие закономерности ЭМЭ наблюдались и на других образцах вмещающих пород с большим удельным электрическим сопротивлением. Кроме того, представленные здесь образцы и разрушались по двум разным механизмам (рисунок 4.65). Наименее прочный образец разрушался в виде столбиков вдоль направления приложения силовой нагрузки при одноосном сжатии (рис.4.65а), а более прочный образец разрушился с образованием многочисленных конусов и клиньев.



Рисунок 4.65 – Виды разрушения образцов скарна: а – столбчатое разрушение образца с предельной прочностью *P_{nped}* соответствующей 184 кH, б – конусный и клиновидный тип разрушения образца с предельной прочностью *P_{nped}* соответствующей 295 кH

Из сравнения закономерностей изменения ЭМЭ образцов, представленных на рисунках 4.60 и 4.64, можно сделать вывод о возможности определения по параметрам и характеристикам ЭМЭ этапов развития разрушения. На рисунках также видно, что на этапах формирования зоны деструкции наблюдалось увеличение вариативности коэффициента амплитуд ЭМС. Эта же не стационарность наблюдалась у прочного образца и на этапе предшествующего разрушению. Поскольку более прочный образец обладает большей упругостью, то и зона деструкции может перекрываться с зоной предшествующей разрушению. Это обстоятельство указывает на не стационарность и не одинаковость размеров возникающих трещин и лавинообразный их рост.

В дальнейшем для сравнения с электромагнитной активностью вмещающих пород проводились экспериментальные исследования на образцах магнетитовой руды, обладающих более низким удельным сопротивлением. Эта группа образцов, так же как и группа образцов вмещающих пород, составляла не менее 15 образцов. Одноосное сжатие образцов руды было идентичным нагружению образцов вмещающих пород. В результате исследований было установлено, что для образцов из магнетитовой руды, имеющих нагружаемую поверхность 13,85·10⁻⁴ м², приводящие к разрушению предельные нагрузки *Р_{пред}* изменялись в два раза в пределах от 135·10³ кН/м² до 289·10³ кН/м², а для образцов из вмещающих пород при той же площади эта разность изменялась в три раза от 108·10³ кH/м² до 325·10³ кH/м². Типичные экспериментально измеренные изменения усредненных за одну секунду на частоте 100 кГц средних значений амплитуд ЭМЭ (рисунок 4.66а) и интенсивности ЭМЭ в диапазоне следования ЭМС до 30 кГц (рисунок 4.66б) при одноосном сжатии образца магнетитовой руды приведены на рисунок 4.66. Так же как и для образцов из вмещающих пород на этом рисунке отчетливо отслеживаются все основные этапы развития деструктивной зоны до разрушения по изменениям характеристик ЭМЭ. На рисунке 4.66 этапы развития разрушения подписаны. На частотах 2.0 и 15.0 кГц и в широкой полосе (1-100) кГц изменения усредненных значений амплитуд ЭМС также четко видны. Первый этап, соответствующий закрытию имеющихся в образце трещин и пор, хорошо выделяется как по каналу, измеряющему усредненную амплитуду на частоте 100 кГц, так и по усредненным значениям интенсивности поступления ЭМС в самом начале одноосного сжатия. Еще большие значения амплитуды и интенсивности ЭМЭ наблюдалось при формировании очага разрушения, развивающегося в интервале (0.3-0.55) *Р_{пред}*. Предшествующий разрушению этап по приведенным характеристикам ЭМЭ прослеживается в интервале (0.55-0.96) *Р_{пред}*. При повышении нагрузки образец разрушался. При этом усредненные значения амплитуд ЭМС на частоте 100 кГц и интенсивность ЭМС возрастает в несколько раз.



Рисунок 4.66 – Изменения усредненных за одну секунду амплитуд на частоте 100 кГц (а) и усредненные значения интенсивности (б) электромагнитных сигналов во время электромагнитной эмиссии при разных значениях относительной нагрузки

Следует еще раз отметить, что амплитуды ЭМС образцов магнетитовой руды, как показано в разделе 4.6 настоящей работы, существенно ниже амплитуд ЭМС вмещающих пород при тех же условиях нагружения одноосным сжатием и при аналогичном внешнем акустическом воздействии. Пониженная амплитуда ЭМС с большой вероятностью обусловлено низким удельным сопротивлением магнетитовой руды и, соответственно, повышенной ее проводимостью. Отсюда пониженные амплитуды можно объяснить потерями энергии ЭМС в проводящих минералах магнетита. Для проводящей среды поглощение энергии ЭМС можно записать через коэффициент α как

$$\alpha \approx \sqrt{\pi \mu f / \rho} \quad , \tag{4.24}$$

где μ – магнитная проницаемость магнетита, ρ – удельное электрическое сопротивление, f – частота. Анализ коэффициентов поглощения ЭМС на частотах 1 кГц и 10 кГц показал, что при средних значениях $\rho = 10^3$ Ом·м и $\mu = 10^4$ амплитуда гармоник более 10 кГц будет 10^2 раз интенсивнее уменьшаться по сравнению с гармониками, не превышающими 1 кГц.

Таким образом, на образцах горных пород кварцсодержащего диабаза, сиенитов, скарнов и магнетитовой руды Таштагольского месторождения экспериментально установлено, что при деформации путем одноосного сжатия происходит эмиссия электромагнитных сигналов в широком диапазоне частот. При этом изменение характеристик эмиссии обусловлено размерами и количеством образующихся дефектов. Регистрируемые на каждом этапе подготовки разрушения электромагнитные сигналы обладают характерными амплитудночастотными параметрами, по которым возможно объективно выявлять возникновение деструктивных зон, а также их развитие в различных сложных гетерогенных системах и горных породах.

Анализ электромагнитной эмиссии при одноосном сжатии образцов горных пород позволил определить закономерные изменения амплитудно-частотных параметров сигналов. Эти изменения характеризуют этапы уплотнения, формирования очага разрушения, предшествующие разрушению и непосредственное разрушение. В спектре ЭМС всегда имеются частотные полосы характерные для разных этапов подготовки и развития разрушения образцов, связанных с размерами образующихся трещин. Кроме того, на всех этапах из-за близости возникающих трещин или из-за структурно-текстурных особенностей горной породы возможно появление сигналов, обусловленных биением. При приближении к разрушению образца всегда происходит смещение спектральных составляющих в область низких частот и возрастание амплитуды спектральных полос ЭМС.

Полученные закономерности изменения амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород могут быть успешно использованы для мониторинга и краткосрочного прогноза развития деструктивных зон и геодинамических событий в породных массивах.

4.7.3. Связь токов поляризации и электромагнитной эмиссии горных пород с их электрическими и магнитными свойствами

В предыдущем разделе показана связь параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии с этапами образования деструктивных зон и их развития до разрушающей нагрузки при одноосном сжатии образцов вмещающих пород, обладающих диэлектрическими свойствами, и магнетитовой руды, преимущественно характеризующейся магнитными свойствами. Магнетит в руде всегда составляет только часть общего объема от его полного отсутствия до 85%. В руде Таштагольского месторождения всегда присутствуют диэлектрические включения в виде кальцита, сиенита, скарна, пиритов, слюд или других минералов и горных пород, в том числе с пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими свойствами. При нагружении горных пород любым типом механического воздействия одноосным и многоосным сжатием, растяжением, сдвигом или изгибом, а также всесторонним сжатием всегда возникают токи поляризации, вызванных поляризацией минералов или перемещениям заряженных частиц по разным механизмам в область разгрузки [9, 43]. В связи с этим представляет интерес экспериментально исследовать токи поляризации и их влияние на формирование параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород. Эксперименты проводились на расширенном стенде для одноосного нагружения исследуемых образцов (рисунок 3.10). В качестве измерителя электромагнитных сигналов и спользовался электромагнитный датчик с запоминающим осциллографом TDS 2024B. Для измерения тока сначала использовался электрометр B7Э-42. Другим блоком для измерений токов поляризации являлся электрометр Keitley 6517B. Модель 6517B является 6 $\frac{1}{2}$ – разрядным электрометром, обеспечивающим измерение постоянного тока в интервале от 10⁻¹⁷ до 21· 10⁻³ A, а заряда в диапазоне от 10⁻¹⁴ до 2,1·10⁻⁶ Kл. Электрод для измерения токов поляризации приклеивался проводящим клеем на основе серебра на середину цилиндрической части образца, с большой вероятностью являющейся зоной разгрузки, а сам электрометр заземлялся. В экспериментах использовались образцы скарнов и магнетитовой руды, изготовленных из цилиндрических кернов диаметром 4.2·10⁻² м и высотой 8.0·10⁻² м. Образцы нагружали вдоль оси цилиндра со скоростью 0.32±0.03 кH/с.

Следует учитывать, что соотношение энергий акустического и электромагнитного излучений можно записать как

$$m_0 = \delta_0^2 / \sigma_{\kappa\rho} \varepsilon , \qquad (4.25)$$

где δ_0 – поверхностная плотность электрических зарядов, $\sigma_{\kappa p}$ – критическое напряжение развития трещин, ε – диэлектрическая проницаемость исследуемой горной породы или минерала [146]. Критичность развития напряжений зависит от множества факторов: от модуля упругости исследуемого материала; поверхностной энергии, необходимой для развития трещины; от начальной и конечных величин трещины при ее старте и скачке; от коэффициента Пуассона для конкретного материала или горной породы. При проведении эксперимента синхронно измерялись изменения нагрузки *P*, продольной деформации, характеристик ЭМЭ, а также изменения токов поляризации *i_p*.

Вмещающая руду порода. На рисунке 4.67а представлены изменения тока поляризации i_p в образце эпидот-гранатового скарна на всем этапе относительной нагрузки до его разрушения. Этот образец разрушился при P_{npeo} равным 202 кН или при давлении 146·10³ кН/м². На рисунке 4.676 показаны изменения электромагнитной эмиссии, измеренной одновременно с током поляризации i_p . Сравнивая рисунки 4.67а и 4.676 можно уверенно говорить о связи процессов изменения тока поляризации и интенсивности ЭМЭ на всем протяжении относительной нагрузки до разрушающих значений. Видно, что процесс увеличения тока поляризации о бразования очага

разрушения. Переход в зону, предшествующей разрушению, сопровождается уменьшением тока поляризации. Причем вид изменений тока в этой зоне совершенно иной.



Рисунок 4.67 – Синхронные измерения тока поляризации (а) и электромагнитной эмиссии (б) образца эпидот-гранатового скарна на всем диапазоне механического нагружения одноосным сжатием до разрушения

Еще более выразительные синхронные изменения тока поляризации и усредненной за одну секунду амплитуды ЭМЭ в широком интервале частот (1-100) кГц в более прочном образце вмещающей породы скарна приведены рисунке 4.68. Предельная нагрузка одноосным сжатием составляла 295 кH, что соответствовало давлению 213·10³ кH/м².

При создании в образце одноосного сжатия ток поляризации определяется смещением разноименных зарядов при уплотнении за счет трещин и пор, имеющихся в нем. В результате образуются электрические диполи, образование и релаксация которых приводит к появлению токов поляризации. К такому же эффекту приводит и перемещение в зоны разгрузки дислокаций и захваченных ими заряженных точечных дефектов внутри минералов, составляющих горную породу.



Рисунок 4.68 – Изменение электромагнитной эмиссии образца вмещающей породы скарна с предельной нагрузкой разрушения 295 кН

С другой стороны, возникают процессы, вызывающие колебания этих электрических диполей. В качестве внешних возбудителей колебаний выступают акустические импульсы, возникающие при сжатии и схлопывании или при прорастании и развитии трещин, пустот и слабых деструктурированных минералов. Все это приводит к появлению и возрастанию амплитуды ЭМЭ и интенсивности поступления ЭМС. Повышение нагружения в диапазоне от 0.3P_{пред} до 0.6P_{пред} сопровождается несколько повышенным, но устойчивым процессом изменением тока поляризации. Относительно небольшое уменьшение тока и наличие всплесков его нарастания, по-видимому связаны с появлением микротрещин в начале развития зоны деструкции, создающими препятствие для движения дислокаций и точечных дефектов, а также для развития других трещин в зону разгрузки образца. Такие изменения тока сопровождаются до 0.5P_{пред} малыми значениями амплитуд ЭМЭ и снижением интенсивности ЭМС. При развитии деструктивной зоны величина тока поляризации возрастает. Это обусловлено дальнейшим ростом трещин и образованием новых зарядов при разделении трещинами целостности горной породы. При нагружении образца одноосным сжатием на этапе деструкции (0.5-0.7) P_{пред} и на этапе предшествующим разрушению (0.7-0.98) P_{пред} дислокации, точечные дефекты и некоторые возникающие и развивающиеся микротрещины замыкаются на уже имеющихся трещинах и дефектах, контактах зерен и кристаллитов, на слоистых системах и появляющихся блоках. В результате происходит образование дополнительных двойных

электрических слоев, а также подзарядка уже имеющихся. При прорастании больших размеров трещин возникают акустические импульсы с большей энергией. В результате интенсивность ЭМС и усредненная амплитуда ЭМЭ возрастает, в том числе и в широком диапазоне частот (1-100) кГц. Подобные изменения токов поляризации и характеристик ЭМЭ наблюдалось в опытах на всех образцах вмещающих пород.

Руда. Другой группой горных пород для определения связей токов поляризации и электромагнитной эмиссии служили образцы магнетитовой руды. Образец № 13 состоял из 85% магнетитовой руды и 15% кальцита. Видимой трещиноватости не наблюдалось. На рисунке 4.69 представлены закономерности изменения токов поляризации (а) при линейном нагружении на прессе ИП-500 и почти линейной деформации (б), измеряемой тензорезисторами. На рисунке 4.69б используемый тип нагружения отмечен 1, а изменение деформации обозначено цифрой 2. Разрушение образца произошло при 283 кН. На этом же рисунке показаны изменения ЭМЭ (в), измеряемой РЭМС1 в интервале с центральной частотой 100 кГц и добротностью около 5. Видно, что изменения токов поляризации хорошо коррелируют с изменениями ЭМЭ. Такая же закономерность изменения ЭМЭ наблюдается в интервале с центральной частотой 15 кГц. На 2 кГц ЭМЭ проявляется очень слабо, что вызвано малыми размерами образца диаметром 42·10⁻³ метра и длиной 80.10⁻³ метра. На этом рисунке видно, что повышение токов поляризации приводит к уменьшению амплитуды ЭМЭ, а его уменьшение приводит к нарастанию ЭМЭ в интервале относительных напряжений от 0.55 до 0.9 *P*/*P*_{nped}. Этот интервал соответствует образованию зоны деструкции и ее развития. Для этого и десятков других образцов магнетитовой руды характерны такие изменения токов поляризации и ЭМЭ при их линейном одноосном нагружении. Такое соотношение токов поляризации и амплитуды ЭМЭ характерно и для вмещающих руду пород, хотя их удельное электрическое сопротивление существенно отличается (таблица 2.1).

На некоторых образцах магнетитовой руды наблюдались другие закономерности изменения токов поляризации и ЭМЭ. Для исследования были выбраны образцы магнетитовой руды №1рм и №2рм. В образце №1рм присутствовали трещины с раскрытием не более 10⁻³ м и залеченные кальцитом, а также диагональная трещина через всю его длину с изменяющейся мощностью (2-4)·10⁻³ м. Эта трещина была залечена эпидотом. Образец магнетитовой руды №2рм имел не пересекающиеся вкрапления кальцита и трещину мощностью до 2 мм, залеченной таким же кальцитом. На рисунках 4.68а,б приведены зависимости изменения электромагнитной эмиссии и токов поляризации при нагружении одноосным сжатием до разрушающих значений для образца магнетитовой руды №1рм, а на рисунках 4.68в,г для образца №2рм.



Рисунок 4.69 – Синхронные изменения в образце магнетитовой руды тока поляризации (а), нагружения одноосным сжатием 1 и деформации образца 2 (б), а также электромагнитной эмиссии (в). Содержание магнетита в образце 85%, кальцита – 15%

Предельная прочность этих образцов приблизительно одинаковая, так P_{nped} для образца №1рм составила 224 кН (162·10³ кН/м²), а для образца №2рм P_{nped} находилась на уровне 212 кН (153·10³ кН/м²). Следует заметить, что образец №1рм разрушился по диагональной трещине, а образец №2рм – по классическому механизму с образованием пирамидок. Фотография такого разрушения приведена на рисунке 4.65б. Поскольку образцы магнетитовой руды отличаются по магнитным свойствам от вмещающих пород, то электромагнитные сигналы из них принимались индукционными датчиками, в то время как из диэлектрических вмещающих пород в качестве приемников использовались емкостные датчики.

В процессе экспериментов было выявлены особенности ЭМЭ (рисунок 70а,в) и тока поляризации (рисунок 70б,г) при развитии процесса разрушения для обоих образцов. Так для образца магнетитовой руды №1рм, который разрушился по диагональной трещине, значение тока i_p изменялось в интервале $(10-4)\cdot10^{-7}$ А, а для образца №2рм с вкраплениями кальцита значения тока изменялись в пределах $(2.0-1.4)\cdot10^{-5}$ А (рисунок 4.68г). На рисунках видно, что при нагружении одноосным сжатием знак тока поляризации скачкообразно изменялся на противоположный для обоих образцов. При этом последовательность изменений знака поляризации существенно отличалась для каждого образцов и соотносилась с изменениями характеристик ЭМЭ.

Следует отметить, что для образца №1рм, разрушившегося по диагональной трещине, ток поляризации уменьшался, а для образца №2рм с вкраплениями кальцита ток слабо изменялся. При развитии зоны деструкции в образце №1рм на нагрузках (0.55-0.75) P_{пред} наблюдалось максимальное количество переполяризаций *i*_{*p*}. Для образца №2рм вид переполяризация *i_p* существенно отличалась на всех этапах подготовки разрушения. Наибольшие значения *i_p* наблюдались на начальном и конечном этапах нагружения при 0,3*P_{nped}* и (0.55–1.0) P_{пред}, соответственно. В этом образце и интенсивность ЭМЭ носит колебательный характер. Существенных изменений ее величины не наблюдалось (рисунок 4.70в), кроме как при фактическом разрушении образца. На рисунке 4.70 видно, что в образцах магнетитовой руды характер изменения тока поляризации при нагружении одноосным сжатием существенно отличался от і_р в образцах вмещающих пород. Такое поведение тока может происходить, с одной стороны, из-за электрической поляризации входящих в руду диэлектрических минералов, а, с другой стороны, изменением намагниченности минерала магнетита при изменении величины нагрузки. При прорастании большого количества трещин с зарядами на их берегах в объеме образца может возникать электрическое поле, способствующее также спонтанному изменению полярности i_n [305]. В работе Грабовского [306] показано, что в изменяющемся поле механических напряжений, например, при одноосном сжатии, между доменами магнитного минерала, ориентированного в одном направлении, начинают действовать определенные

граничные условия, способствующие непрерывному изменению направлений магнитных моментов. В этой же публикации отмечается, что направления магнитных моментов магнитного минерала в пограничных слоях не параллельны, что приводит к отклонению от осей «легкого» намагничивания.



Рисунок 4.70 – Синхронные измерения тока поляризации и электромагнитной эмиссии при нагружении одноосным сжатием до разрушающих значений образцов магнетитовой руды: а, б – образец с диагональной трещиной, залеченной эпидотом и кальцитом; в, г – образец с вкраплениями кальцита

Эти отклонения приводят к возрастанию кристаллографической и обменной энергии, что, вероятно, и обуславливает условия изменения направления тока совместно с перемагничиванием магнитных доменов. Совокупное влияние возникающего электрического поля за счет роста трещин, движения дислокаций и точечных дефектов и изменение направлений ориентации магнитных диполей с большой вероятностью и обуславливают спонтанные изменения тока поляризации в образцах магнетитовой руды.

Таким образом, результатом экспериментальных исследований явилось установление связей токов поляризации и характеристик электромагнитной эмиссии. Показано, что характеристики ЭМЭ существенно зависят от проводимости горной породы. Присутствие в образцах горной породы минералов с низким удельным сопротивлением оказывает

существенное влияние на эффективность МЭП и, соответственно, приводит к снижению амплитуды ЭМЭ.

Показано, что амплитуда и интенсивность ЭМЭ диэлектрических вмещающих горных пород и магнетитовой руды при нагружении одноосным сжатием коррелируют с токами поляризации на всех этапах возникновения деструктивных зон и их развития, включая и этап уплотнения. Процессы изменения знака поляризационных токов в магнетитовой руде, вероятно, обусловлены совокупным влиянием возникающего электрического поля за счет роста трещин, движения дислокаций и точечных дефектов и изменением направлений ориентации магнитных диполей.

4.7.4. Отслоение микрочастиц при развитии разрушения образцов горных пород

Одним из механизмов генерации электромагнитных сигналов может являться эмиссия субмикронных и микронных частиц при деформировании горных пород при существенном повышении их напряженно-деформированного состояния. Такие частицы могут участвовать и в создании условия для нагрева воздуха, в том числе в пробуренных в горном массиве скважинах и в просверленных в образцах отверстиях. Так в работах [307-309] рассматривались вопросы возникновения нано – и микрочастиц при техногенных процессах, в том числе в недрах Земли. В работе Викторова С.Д. с соавторами непосредственно исследовалась эмиссия субмикронных частиц при деформировании горных пород. При этом была показана связь количества эмитированных частиц с изменениями НДС при одноосном сжатии исследуемых образов [212]. Кроме того, в этой работе установлено, что перед разрушением образца наблюдается резкий рост эмитируемых частиц. А в работах [310, 311] рассмотрены проблемы прогноза горных ударов по эмиссии частиц в специализированных скважинах, пробуренных в горном массиве.

Известно, что при разрушении диэлектрических материалов наряду с разрядными явлениями в устьях трещин происходит вынос отделившимися нано – и микрочастицами заряженных атомов и молекул [312].

В связи с возможной генерацией электромагнитных сигналов заряженными частицами, отслаивающимися от горных пород при нарастании НДС, и выяснения вклада этих частиц в изменение характеристик ЭМЭ горных пород были проведены экспериментальные исследования эмиссии частиц при нагружении образцов горных пород одноосным сжатием.

Эксперименты проводились на стенде, приведенном на рисунке 3.11 в главе 3. Одноосные сжимающие усилия создавались прессом ИП-500. В качестве анализатора аэродинамического диаметра частиц использовался спектрометр APS 3321. Спектрометр обеспечивал измерения в диапазоне размеров частиц (0.5-20)·10⁻⁶ м в режиме реального времени. Для измерения ЭМС использовался 8-канальный измерительный модуль NI BNC 2120 с электромагнитным датчиком. Образцы изготавливали из кернов вмещающих и рудных пород Таштагольского месторождения по методике, описанной в разделе 4.6 настоящей работы. Диаметр образцов составлял $(42\pm1)\cdot10^{-3}$ м, а их длина вдоль оси цилиндра имела размеры $(80\pm2)\cdot10^{-3}$ м. В зависимости от поставленных задач посередине оси цилиндра образцов просверливались одно или два отверстия диаметром $8\cdot10^{-3}$ м. С одной стороны отверстия во вклеенный в образец мундштук вставлялась гибкая пластмассовая трубка. Эта трубка подсоединялась к спектрометру APS 3321. С другой стороны отверстия, посредством такого же мундштука, подводилась трубка с фильтром, обеспечивающим фильтрацию частиц больше $20\cdot10^{-6}$ м.

На рисунке 4.71 приведены типичные изменения количества имитированных частиц размером $5.048 \cdot 10^{-6}$ м в отверстии образца вмещающей горной породы при изменении величины одноосного сжатия до разрушающих значений (рисунок 4.71а) и одновременно измеряемые изменения амплитуды ЭМС (рис.4.716). На следующем рисунке 4.72а,6,в показана эволюция изменения количества микрочастиц размером от $0.5 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-6}$ м на разных этапах нагружения одноосным сжатием 0.45, 0.87 и 1.0 *P*/*P*_{пред}. На рисунке видно, что количество более крупных микрочастиц увеличивается от 0.45 до $1.0 P/P_{nped}$.



Рисунок 4.71 – Изменения количества имитируемых микрочастиц (a) и параллельно измеряемые изменения амплитуды электромагнитных сигналов (б) в процессе нагружения одноосным сжатием до разрушения образца вмещающей породы

На рисунке видно, что основная масса частиц появляется накануне и в момент разрушения образца. Если скорость отслоившихся частиц V_{MY} может меняться от единиц метров до нескольких сотен метров в секунду, то можно рассчитать частоту ЭМС, создаваемой
микрочастицами в отверстии с диаметром $d = 7 \cdot 10^{-3}$ м. При своем отслоении микрочастицы переносят заряд, так как этот процесс подобен развитию трещины и расслоению зарядов на ее берегах. Примем, что частицы отлетают от поверхности отверстия строго перпендикулярно. Тогда для скорости отслоения микрочастиц 10 м/с будет соответствовать частота $f_{M'} = V_{M'}/d$ и будет приблизительно равной 1,4 кГц, а для скорости отлета частицы 700 м/с частота будет около 100 кГц.



Рисунок 4.72 – Эволюция изменения количества микрочастиц на разных этапах нагружения одноосным сжатием: а – 0.45 P/P_{nped} ; б – 0.87 P/P_{nped} ; в – 1.0 P/P_{nped}

На этих стадиях относительного нагрузки и электромагнитная эмиссия ведет себя подобным же образом. Амплитуда электромагнитной эмиссии резко возрастает, частотный спектр ЭМС смещается в область низких частот. Кроме того, как будет показано в следующем разделе, и инфракрасное свечение в отверстиях вмещающих и рудных образцов многократно усиливается также накануне и в момент разрушения образца.

Таким образом, эмиссия микрочастиц может участвовать в генерации электромагнитных сигналов только на стадиях предшествующих и в момент разрушения образцов горных пород, а, следовательно, при таких же процессах и в породном массиве.

4.7.5. Инфракрасное свечение при разрушении образцов горных пород

Использование метода инфракрасной (ИК) термографии в качестве неразрушающего и бесконтактного метода для изучения процессов прогрессирующего повреждения и механизмов разрушения образцов различных материалов и горных пород, подвергаемых статическому сжатию и наложению вибрационного возбуждения, началось с конца 80-х начало 90-х годов 20 века. Этот метод позволяет видеть возникновение нестабильного распространения трещин и дефектов, когда увеличение необратимого микротрещинга активируется вибрационной нагрузкой [313, 314]. В работе [315] описаны результаты одноосного сжатия образцов каменной соли при монотонном нагружении с синхронной регистрацией изменений терморадиационных и механических параметров. Показана связь между стадиями нелинейного деформирования и особенностями термомеханических процессов. Установлена связь скорости изменения напряженного состояния образцов и информативности записей вариаций интенсивности сопутствующего ИК-излучения. В работе [316] исследовалось разрушение горных пород по импульсному электромагнитному излучению в световом- и радио- диапазонах. Здесь наблюдали импульсное ИК-свечение и связывали его с ростом трещин. Исследователями в работе [317] решалась задача визуализации распределения величины напряженности электрического поля вблизи излучающего источника с помощью ИК термографии. Было установлено, что температура контрольной поверхности находится в линейной зависимости от напряженности воздействующего электромагнитного поля.

В работах [159,318] метод ИК - термографии использован для улучшения надежности диагностики изменений НДС горных пород путем контроля температуры тела при его деформировании. Контролируемые температурные градиенты возникают при механических нагрузках сжатием, сдвигом, а также при разрушении твердых тел. В результате таких нагрузок происходит преобразование механической энергии в тепловую. С ростом величины механических нагрузок напряжения усиливаются на микродефектах материала. Увеличение напряжений приводит к появлению и росту микротрещин, с дальнейшим их объединением в трещины отрыва, прорастание которых сопровождается разрушением материала [318, 319].

Предварительные исследования [161, 162] показали эффективность использования этого метода для поиска мест с повышенным напряженно-деформированным состоянием участков породного массива. Это выражается в увеличении температуры в окрестностях контрольных или разгрузочных скважин. Для выяснения механизмов и параметров инфракрасного свечения в скважинах шахты Таштагольского рудника в настоящем разделе приведены результаты лабораторных исследований образцов горных пород этого месторождения. При проведении исследований исходили из того, что за ИК-свечение скважин ответственны физические процессы, протекающие в горных породах при изменении их напряженно-деформированного состояния.

Образцы горных пород с размерами в диаметре $42 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $80 \cdot 10^{-3}$ м подготавливались из кернов, взятых произвольно из породного массива Таштагольского месторождения: рудный образец содержал до 75% магнетита и 25% кальцита; вмещающая руду порода содержала сиенит с прожилками кальцита (15%). В исследуемых образцах создавался искусственный дефект в виде отверстия диаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м. Ось отверстия располагалась посередине продольной части образца и имела протяженность $25 \cdot 10^{-3}$ м. Образцы подвергались одноосному нагружению на сжатие или сдвиг до разрушения на

стенде, блок-схема которого приведена на рисунке 3.11. Одноосное сжатие образцов осуществлялось на прессе ИП-500. Создание сдвиговых напряжений производилось путем силового одноосного нагружения с помощью специальных пуансонов, прилегающих к плоским граням образца. Нижний пуансон имел выступ высотой 3 мм и диаметром 25 мм, а верхний – отверстие диаметром 28 мм. Для обеспечения строгой ориентации относительно оси выступа и отверстия в нижнем и верхнем пуансонах создавалось дополнительная не сквозная полость размером равным диаметру образца. Использование таких пуансонов позволило создавать в образцах осевые сдвиговые напряжения.

Для записи термограмм в лабораторных условиях использовался тепловизор NEC TH9100. В процессе экспериментов осуществлялась непрерывная запись развития разрушения образца и его ИК-излучение в диапазоне 8–14 мкм. Съемка осуществлялась в течение 200 секунд или до разрушения образца и фиксировалась на 2000 кадров. Чувствительность тепловизора NEC TH9100 составляла не менее 0,04° С. В начале лабораторных экспериментов устанавливалось ИК свечение однородного образца из стали с таким же отверстием, как и в исследуемых горных породах при внешнем интенсивном акустическом воздействии на частоте 27 кГц. Инфракрасное свечение дна отверстия относительно равномерно нарастало во времени (рисунок 4.73). Такой же нагрев горной породы, содержащей минералы с разными значениями температуропроводности (Таблица 4.3), привел к нелинейному нарастанию ИК – свечения. Это обстоятельство указало на влияние минерального состава и теплофизических свойств на ИК-свечение, которое необходимо учитывать при разогреве образцов горных пород одноосным силовым нагружением.

Результаты лабораторных модельных исследований на образцах горных пород представлены на рисунках 4.74а,б. На рисунке 4.72а показано изменение свечения отверстии в относительных единицах в течение 200 секунд при изменении относительной нагрузки P/P_{npeo} . В указанный период времени образец магнетитовой руды на автоматизированном прессе ИП-500 с помощью описанных выше пуансонов подвергался линейному силовому нагружению сдвигом до разрушения. Управление прессом осуществлялось с персонального компьютера. Площадь нагружения составляла $1.38 \cdot 10^{-3}$ м². При скорости нагружения 0.3 кH/с разрушающее значение напряжения зарегистрировано на уровне 125.3 кH, что соответствует давлению 90.8 · 10⁶ Па. В процессе развития разрушения наблюдали четыре диапазона изменяющегося ИК свечения в отверстии образца породы. Первый диапазон изменения температур ИК свечения ΔT наблюдался от 0 до 12.7 · 10⁶ Па с максимумом при 11.2 · 10⁶ Па. После незначительного затишья выделился второй диапазон нарастания и спада ΔT от 16.4 · 10⁶ Па до 39.9 · 10⁶ Па с максимумами при 26.9 · 10⁶ и 34.1 · 10⁶ Па.



Рисунок 4.73 – Изменения инфракрасного свечения образца стали марки Ст3сп при акустическом разогреве на частоте 27 кГц

Затем ИК свечение стабилизировалось на новом уровне, после которого наблюдался третий диапазон изменения температур с $50.9 \cdot 10^6$ по $72.8 \cdot 10^6$ Па и максимумами при $54.5 \cdot 10^6$ и $59.3 \cdot 10^6$ Па. Четвертый диапазон ИК свечения характеризовался относительно равномерным нарастанием и резким ростом интенсивности свечения отверстия в конце нагружения перед разрушением.

На рисунок 746 показан один из кадров ИК свечения отверстия образца магнетитовой руды. На рисунок 726 обозначен круг отверстия. Изменения температуры также наблюдаются и вокруг отверстия в образце породы, которые показаны на рисунок 72а. Исследование ИК свечения в образце сиенита показало, что отверстие в нем тоже светится в ИК диапазоне в процессе нагружения одноосным сдвигом. Надо заметить, что при исследованиях других образцов горных пород ИК свечение отверстий и их окрестностей изменялось в зависимости от их структурно-текстурного строения и этапов развития разрушения. Полученные в лабораторных модельных экспериментах результаты измерений показывают зависимость ИК свечения отверстия от этапов подготовки и развития разрушения. Первый диапазон ИК свечения соответствует зоне уплотнения образца, а два последующих диапазона изменяющихся температур характеризуют этапы образование зон деструкции в образце. Причем первый из них обусловлен образованием трещин в кальците, который характеризуется модулем Юнга Е равным 20·10⁶ Па, а второй обусловлен образованием трещин в магнетите, у которого *E* находится в интервале (120–140)·10⁶ Па [320]. Четвертый же диапазон характеризует этап образование и развитие трещин отрыва. Подобные закономерности наблюдаются и при измерении электромагнитной эмиссии в диапазоне частот от 1.0 до 100.0 кГц в процессе

нагружения до разрушающих значений образцов магнетитовой руды и вмещающих пород [244, 262–294, 321].



Рисунок 74 – Изменения ИК-свечения в образце магнетитовой руды с включениями кальцита: а – изменение ИК свечения края и центра отверстия; б – свечение отверстия при одноосном нагружении сдвигом

Такие изменения в интенсивности и спектре ИК свечения могут быть обусловлены: движением заряженных дислокаций и точечных дефектов в область образца с наименьшим механическим напряжением (область разгрузки) [322]; заряжением пограничных слоев контактирующих минералов или полостей, какими являются и отверстия в образцах горных пород или скважины в массиве горных пород; прорастанием микротрещин и эмиссией электронов в воздушное пространство с твердотельных краев отверстий и скважин.

Определим необходимое количество энергии, поступающей из окружающей магнетитовой руды для разогрева краев отверстий и скважин, а также прилегающего к ним воздуха на $\Delta T = 3^{\circ}$ С. При этом будем определять энергию для разогрева прилегающего воздуха, так как это наиболее упрощенный расчет. В расчете будем учитывать, что диаметр отверстия в магнетитовой руде составляет $3 \cdot 10^{-3}$ м, а его длина – $25 \cdot 10^{-3}$ м. Энергия можно определить из выражения

$$U = \frac{fmR\Delta T}{2},\tag{4-26}$$

где U – внутренняя энергия воздуха при разогреве на ΔT , m – масса воздуха в отверстии, f = 5 – число степеней свободы молекул воздуха, R = 287 Дж/кг·К – газовая постоянная воздуха при нормальных условиях [323]. Расчеты показали, что при таких исходных данных внутренняя энергия воздуха изменится на величину равную $0.45 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Рассмотрим возможные механизмы подведения энергии в массиве для разогрева стенок скважин и контактов горных пород. Такими источниками энергии могут быть:

- термоупругий эффект, связанный с упругими деформациями [324-326];

 – энергия, высвободившаяся при раскрытии трещин и не расходуемая на дальнейшее их развитие [327, 328];

 свечение наночастиц вещества образца, которые отшелушиваются при его силовом нагружении [212, 310, 311].

Термоупругий эффект приводит к изменениям температуры твердого тела при упругом нагружении. При этом нагружение должно быть адиабатическим. Условие адиабатичности в нашем случае может быть применено, так как механическое нагружение в массиве горных пород во времени происходит значительно медленнее периода колебания осцилляторов в них. Известно, что при положительном коэффициенте термического расширения у твердых тел, в том числе и горных пород, при растяжении температура понижается, а при сжатии – поднимается [325, 326]. Связь воздействующих механических напряжений и изменения температуры описал еще Томпсон. Термоупругий эффект он записал в виде формулы как

$$\Delta T / T = -\alpha \sigma / C, \qquad (4-27)$$

где T- начальная температура нагружаемого тела, ΔT – изменения температуры тела при внешнем нагружении, σ – действующие внешние напряжения, α – коэффициент термического расширения, C – удельная объемная теплоемкость [329]. В работе [324] показано, что присутствие коэффициента термического расширения в формуле (1) связано с ангармонизмом межатомного взаимодействия, который и обуславливает термоупругий эффект.

Энергия, высвободившаяся при раскрытии трещин, также может рассматриваться как итог термоупругого эффекта на конечной его стадии действия. В соответствие с энергетическими моделями Гриффитса [330] и Ирвина [327], увеличение длины трещины l на Δl приводит к высвобождению упругой энергии ΔU_v и идет на приращение внутренней энергии тела. Потенциальная энергия ΔW в балансе энергий отрицательна, так как расходуется на деформацию. Внутренняя энергия уменьшается вследствие релаксации напряжений из-за появления свободных от нагрузок поверхностей трещин. Балансе энергий записывается в следующем виде:

$$\Delta U_v + \Delta W = 0. \tag{4.28}$$

Зная интенсивность поверхностной энергии *γ*, затрачиваемой на раскрытие трещины, можно вычислить минимальную энергию, запасаемую твердым телом при нагружении, по формуле

$$\Delta U_{\nu} = 2\gamma \Delta S. \tag{4.29}$$

Известно, что для магнетитовой руды средняя удельная поверхностная энергия, выделяемая при разрушении, составляет 200,7 Дж/м² [331] Тогда при росте трещины на

величину 10⁻⁶ м² высвобождается энергия $0,4\cdot10^{-3}$ Дж, которая концентрируется в ее устье и может расходоваться на дальнейший рост трещины или переходить в тепло при ее остановке из-за недостатка энергии для дальнейшего раскрытия или блокировке внутренними дефектами [44]. Поскольку при нагружении создается множество микротрещин, то суммарной энергии может быть достаточно для подогрева воздуха длительное время. Из таблицы 4.3 видно, что коэффициент теплопроводности руды λ_p и ее теплоемкость C_p существенно выше такого же коэффициента для воздуха λ_6 и его теплоемкости C_6 . Это обстоятельство обеспечивает накопление тепла в магнетитовой руде и быструю ее передачу воздуху вблизи стенок отверстия. Высокий коэффициент температуропроводности воздуха a_6 обеспечивает быстрое выравнивание температуры воздуха в отверстии.

Вещество	Плот-	Удельная	Теплоемкость	Коэффициент	Коэффициент
	ность,	теплоемкость,	С, кДж/(м ³ ·К)	теплопровод-	температуро-
	кг/м ³	с _р , кДж/(кг·К)		ности	проводности
		-		λ, Вт/(м·К)	a, 10 ⁻⁷ м ² /с
Магнетитовая	5125	0.68	3312	$2.0 \div 2.7$	22.0
руда					
Мрамор,	2880	$0.75 \div 0.86$	2375	$1.6 \div 4.0$	7.8 ÷ 12.2
кальцит					
Сиенит	2720	$0.74 \div 0.83$	2160	$1.8 \div 3.0$	5.4 ÷ 7.9
Воздух (20 С ^о)	1.175	1.005	1.18	0.0262	221.7

Таблица 4.3 – Теплофизические характеристики веществ, используемых в эксперименте [333]

Как показали экспериментальные исследования, механизм обеспечение свечения отверстия или скважин отслоившимися наночастицами горной породы размером 0.3–10.0 мкм работает при напряжениях, близких к разрушающим. Количество отслоившихся наноразмерных частиц повышается при возрастании величины действующих напряжений [332]. Причем для каждого минерала, входящего в состав горной породы, количество наночастиц изменяется в соответствие с модулем Юнга и действующим напряжением.

В последующих исследованиях следует обратить внимание и на возможность проявления механизм свечения воздуха вдоль границ цилиндрических отверстий или скважин, а также контакта разных пород при ионизации атомов кислорода и азота эмитируемыми электронами с поверхности горных пород [334, 335].

По результатам экспериментальных исследований и анализа рассматриваемых механизмов можно сделать вывод о том, что все перечисленные выше механизмы разогрева ответственны за свечение в ИК диапазоне искусственно созданных отверстий в образцах

горных пород, скважин и контактов горных пород в их естественном залегании на разных этапах нагружения.

Таким образом, инфракрасное свечение отверстий отображает процесс подготовки разрушения горных пород и его свершение. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию для определения для определения этапов разрушения образцов горных пород и других твердотельных материалов, в том числе со сложной структурой. В слоистых и перемешанных двух и более компонентных твердотельных материалах появляется возможность выявления пороговых значений деструкции составляющих компонент при наложении различных типов силовой нагрузки. Кроме того, ИК термографию можно успешно использовать для выявления напряженных участков массива горных пород.

4.8. Выводы по главе 4

Таким образом, в главе 4 проведено теоретическое и экспериментальное физическое обоснование для разработки и применения методов мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород в естественном их залегании по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии. По результатам теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие обобщающие выводы:

1. Измерения распределения зарядов на поверхности образцов горных пород сиенитового скарна, известняка, магнетитовой руды из Таштагольского месторождения и на поверхности кальцитового сталактита, взятого в качестве сравнительного образца, показали, что максимальная величина заряда находится в местах с наибольшим удельным сопротивлением. Причем такие максимальные значения заряда возникают как в горных породах с высоким удельным сопротивлением, имеющим низкоомные включения, так и на высокоомных включениях, имеющих низкоомное окружение основной породы, содержащейся в образце. Измерения поверхностного распределения заряда на сталактите с залеченной трещиной подтвердили этот вывод, так как сопротивление залеченной трещины на четыре порядка ниже, чем основной материал, из которого состоит сталактит.

2. Проведенное математическое моделирование изменений параметров ЭМС при разных амплитудах акустического воздействия на дефектную структуру с постоянным зарядом показало, что в результате акустоэлектрических преобразований на двойных электрических слоях происходит переизлучение энергии воздействующих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. Показано также, что амплитудно-частотные параметры

излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной связи с характеристиками детерминированных акустических воздействий и зарядовым состоянием дефектов структур. Изменение амплитуды ЭМС линейно зависит от величины заряда на обкладках дефекта и от величины возбуждающего акустического импульса при постоянном зарядовом состоянии дефекта.

3. На примере образцов кальцита экспериментально установлено, что электризация отличающихся по размеру структурных элементов приводит к их поляризации и к увеличению поверхностной плотности заряда с уменьшением размеров структурных элементов. Подобную зависимость имеет и время релаксации поверхностного заряда. При этом амплитуда электромагнитного отклика на внешнее акустическое возбуждение из крупнокристаллического образца выше, чем у мелкокристаллического. Такие закономерности изменения амплитуды ЭМС зависят от величины дипольного момента структурных элементов. Этим же обстоятельством обусловлены и отличия амплитудно-частотных спектров ЭМС образцов мрамора.

4. Математическое моделирование акустоэлектрических преобразований в слоистых твердотельных материалах, а также математическое моделирование изменений параметров электромагнитных откликов при импульсном детерминированном акустическом воздействии выявило закономерности преобразования на двойных электрических слоях энергии возбуждающих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. Кроме того, показана связь амплитудно-частотных параметров генерируемых электромагнитных сигналов с зарядовым состоянием слоистых структур и характеристиками детерминированных акустических воздействий.

5. Полученные закономерности влияния электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов показали, что в естественных условиях при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород, по каким-либо причинам, вариации напряженности электромагнитного поля будут определяться и поляризационными токами, отражающими динамические процессы в очаге готовящегося разрушения.

6. Электрические и магнитные свойства горных пород и минеральных включений в них оказывают существенное влияние на амплитудно-частотные параметры ЭМС при акустических воздействиях. При этом амплитуды ЭМС нарастают при увеличении приложенных постоянных электрических или магнитных полей. При электризации вмещающих магнетитовую руду высокоомных образцов горных пород, например сиенита, в амплитудно-частотных спектрах проявляются его низкочастотные составляющие. Показано также, что изменения амплитуды ЭМС зависят от содержания магнетита в образцах руды и подчиняется явлению гистерезиса. Ориентация магнитных диполей магнетита без внешнего акустического воздействия

сохраняется длительное время. Воздействие акустическими импульсами приводит ориентацию магнитных диполей в первоначальное не намагниченное состояние. Выявленные в ходе экспериментов закономерности позволяют оперативно и объективно с помощью аппаратурного контроля максимальной амплитуды ЭМС и акустического воздействия с равными параметрами определять содержания магнетитовой руды в кернах горных пород при разведочном бурении.

7. На контактах кристаллов и горных пород при акустическом возбуждении генерируются ЭМС с повышенной амплитудой и сложным частотным спектром. На примере кристаллов кварца, природного кварцита и других горных пород показано, что в спектре ЭМС всегда присутствуют резонансные частоты, связанные с размерами образца. Этот вывод важен для выбора частотного диапазона измерительной аппаратуры, используемой в лабораторных и натурных исследованиях ЭМС.

8. Параметры ЭМС исследуемых материалов и характеристики воздействующего акустического импульса находятся в непосредственной связи. Это обстоятельство указывает на то, что генерируемые при росте трещин акустические импульсы участвуют в формировании частотного спектра ЭМС как при развитии разрушения образцов, так и при формировании деструктивных зон в массивах горных пород. Изменения параметров возбуждающего акустического импульса и расстояния от излучающей поверхности приводят к изменениям регистрируемых параметров ЭМС.

9. Амплитуда электромагнитных сигналов, генерируемых в двух-, трех- и многослойных образцах при механоэлектрических преобразований, находится в прямой связи с параметрами амплитудно-частотными акустического воздействия. Наличие слоистых включений во вмещающих материалах резко меняет параметры распространяющегося акустического сигнала. При этом надо учитывать, что слой с меньшим акустическим импедансом отсекает высокочастотную часть спектра колебаний, но пропускает его низкочастотную часть. В соответствие с этим изменяются и амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов слоистых сред, в том числе и горных пород. Наличие слоев и прожилков с акустическим импедансом равным волновому сопротивлению вмещающего материала или горной породы не будет вызывать значительных изменений амплитуды ЭМС вблизи включения. В области металлического слоя или, например, прожилка горной породы с повышенной проводимостью в слоистой системе происходит уменьшение амплитуды ЭМС.

10. На примере переменно-слоистой горной породы серпентинит и минералов из которых состоит слоистая структура (серпентин и хризотил – асбест) показано влияние количества слоев на амплитуду ЭМС, которая превышает амплитуду ЭМС из каждого отдельного образца серпентина и хризотил – асбеста в десятки раз при тех же условиях эксперимента и размеров образцов. Возрастание амплитуды, несомненно, вызвано

присутствием большого количества двойных электрических слоев на границах полосчатых чередований минералов серпентина и хризотил – асбеста. Этот факт подтверждают и измерения зарядового состояния поверхности серпентинита, и уменьшение амплитуды ЭМС при равном акустическом воздействии после удаления части слоев. Изменения распространения фронта акустического импульса относительно простирания слоев приводит к преобразованиям параметров спектра ЭМС. Кроме того, полученные результаты исследований и их анализ подтверждают резонансный колебательный механизм возбуждения ЭМС при акустическом возбуждении горных пород, имеющих сложное структурно–текстурное строение.

11. Экспериментальные исследования и математические расчеты обосновали положение о том, что в спектре ЭМС сложных по текстуре образцов всегда будут присутствовать частоты разной амплитуды, обусловленные биением из-за сложения близких частот акустических импульсов, возникающих при отражении от структурно включений. При набор размерами структурно-текстурных ЭТОМ частот может определяться как неоднородностей, так и разностью скоростей акустических импульсов в них.

12. Экспериментальными исследованиями показано, что при акустическом возбуждении контакта высокоомной горной породы на примере системы «микродиорит – минерализованная вода» генерируемые ЭМС имеют параметры, изменяющиеся с увеличением концентрации NaCl в дистиллированной воде. Эти изменения носят двойственный характер. Так, с одной стороны, амплитудно-частотные параметры ЭМС определяются удельным электрическим сопротивлением водного раствора NaCl, что приводит к уменьшению амплитуды с увеличением концентрации соли. С другой стороны, увеличение концентрации NaCl в солевом растворе приводит к расширению частотного спектра ЭМС. С повышением концентрации контактирующего раствора NaCl появляются высокочастотные полосы с линейно возрастающими амплитудами. Показано также влияние величины приложенного электрического поля на параметры ЭМС из системы «микродиорит – минерализованная вода». При возрастании напряженности электрического поля от 10² В/м до 2.5·10² В/м пропорционально увеличивается амплитуды ЭМС и его основных спектральных полос. Выявленные закономерности изменения амплитудно-частотных параметров ЭМС при контакте минерализованных водных растворов с горными породами необходимо учитывать при разработке информационной системы мониторинга и прогноза геодинамических событий в шахтном поле рудников.

13. Для электрической составляющей электромагнитной эмиссии горных пород было показано, что амплитуда спектральных составляющих ЭМС уменьшается при увеличении предельной прочности образца. Такой эффект с большой вероятностью обусловлен возбуждением ЭМС при прохождении акустического импульса через сетку микротрещин или

дефектов с двойными электрическими слоями. Показано, что увеличение удельного электрического сопротивления на 10% приводит к снижению амплитуды спектральных составляющих ЭМС почти в 4 раза.

14. Для образцов магнетитовой руды прямой зависимости амплитуды спектральных составляющих ЭМС от предельной прочности не выявлено. Малое удельное электрическое сопротивление магнетитовой руды существенно понижает накопление зарядов на двойных электрических слоях, что и приводит к снижению амплитуды ЭМС в руде. При этом в образце магнетитовой руды с незначительным содержанием кварца почти в 10 раз повышается амплитуда ЭМС. Кроме того, анализ параметров ЭМС показал, что присутствие в образцах высокопроводящего минерала магнетита приводит к снижению амплитуды в 1,5-2 раза. Была обнаружена прямая связь между удельным электрическим сопротивлением породы и количеством содержащихся в ней минералов с высокой проводимостью. Эта связь обусловлено главным образом структурно-текстурным строением породы. Если между высокопроводящими минералами, такими как магнетит, в породе с высоким удельным электрическим сопротивлением нет непосредственных контактов, и они находятся в ней в виде изолированных друг от друга включений, то проводящие включения не оказывают заметного влияния на сопротивление породы и параметры ЭМС даже при очень высокой их концентрации. Проведенные исследования показали, что существует зависимость амплитуды возбуждаемых ЭМС и амплитуд его спектральных составляющих от количественного содержания в образцах горных пород высокопроводящих минералов, таких как магнетит. Полученные результаты необходимо учитывать при разработке методов мониторинга И краткосрочного напряженно-деформированного прогнозирования изменений состояния массивов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массивов горных пород.

15. Анализ электромагнитной эмиссии при одноосном сжатии образцов горных пород позволил определить закономерные изменения амплитудно-частотных параметров сигналов. Эти изменения характеризуют этапы уплотнения, формирования очага разрушения, предшествующие разрушению и непосредственное разрушение. В спектре ЭМС всегда имеются частотные полосы характерные для разных этапов подготовки и развития разрушения образцов, связанных с размерами образующихся трещин. Кроме того, на всех этапах из-за близости возникающих трещин или из-за структурно-текстурных особенностей горной породы возможно появление сигналов, обусловленных биением. При приближении к разрушению образца всегда происходит смещение спектральных составляющих в область низких частот и возрастание амплитуды спектральных полос ЭМС. Полученные закономерности изменения амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов И характеристик электромагнитной эмиссии горных пород могут быть успешно использованы для мониторинга

и краткосрочного прогноза развития деструктивных зон и геодинамических событий в породных массивах.

16. Параметры амплитуды, частотного спектра, интенсивности импульсного потока электромагнитных сигналов, несут информацию о характеристиках воздействующих на гетерогенные материалы акустических импульсах и, как следствие, несут информацию о процессах подготовки и развития разрушения этих материалов. Диапазон амплитуд ЭМС, излучаемых горными породами Таштагольского рудника при импульсном акустическом воздействии, лежит в интервале от первых десятков микровольт до единиц вольт, частотный спектр – в интервале от единиц герц до единиц мегагерц, но наиболее значимыми являются частоты 1÷80 кГц, которые определяются блочностью породного массива. Изменение интенсивности импульсного потока ЭМС должно характеризовать развитие процессов подготовки разрушения горных пород или других гетерогенных материалов.

17. Установлена связь токов поляризации и характеристик электромагнитной эмиссии. Показано, что характеристики ЭМЭ существенно зависят от проводимости горной породы. Присутствие в образцах горной породы минералов с низким удельным сопротивлением оказывает существенное влияние на эффективность МЭП и, соответственно, приводит к снижению амплитуды ЭМЭ. Показано, что амплитуда и интенсивность ЭМЭ диэлектрических вмещающих горных пород и магнетитовой руды при нагружении одноосным сжатием коррелируют с токами поляризации на всех этапах возникновения деструктивных зон и их развития, включая и этап уплотнения. Процессы изменения знака поляризационных токов в магнетитовой руде, вероятно, обусловлены совокупным влиянием возникающего электрического поля за счет роста трещин, движения дислокаций и точечных дефектов и изменением направлений ориентации магнитных диполей.

18. Экспериментально показано, что при развитии деструктивных зон происходит эмиссия микрочастиц, которые могут участвовать в генерации электромагнитных сигналов на стадиях предшествующих прорастанию трещин и в момент разрушения образцов горных пород, а, следовательно, при таких же процессах и в породном массиве.

19. Установлено, что инфракрасное свечение отверстий отображает процесс подготовки разрушения горных пород и его свершение. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию для определения этапов разрушения образцов горных пород и других твердотельных материалов, в том числе со сложной структурой. В слоистых и перемешанных двух и более компонентных твердотельных материалах появляется возможность выявления пороговых значений деструкции составляющих компонент при наложении различных типов силовой нагрузки. Кроме того, ИК термографию можно успешно применять для выявления напряженных участков массива горных пород.

20. Полученные результаты исследования являются основой для построения феноменологической схемы генерации и определения параметров электромагнитных сигналов при возникновении деструктивных зон и развитии разрушения горных пород в процессе изменения их напряженно-деформированного состояния.

Глава 5. Экспериментальные исследования электромагнитной эмиссии массивов горных пород

В предыдущих главах настоящей работы приведены описание и параметры регистраторов электромагнитных и акустических сигналов, а также изменения характеристик последовательностей их усредненных амплитудных значений на разных частотах в определенный промежуток времени. Эти приборы были разработаны и изготовлены при непосредственном руководстве, проектировании и изготовлении автора настоящей работы. Эти регистраторы были протестированы в лабораторных условиях при разрушении образцов горных пород. Результаты тестирования приведены в разделе 4.7. В ходе исследований установлена связь амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии с этапами возникновения и развития деструктивных зон до разрушающих значений при одноосном сжатии образцов горных пород.

Для создания метода мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженнодеформированного состояния горных пород в натурных условиях, в том числе и геодинамических проявлений, необходимо было смоделировать такие изменения и исследовать параметры и характеристики электромагнитной эмиссии породного массива. Использовать в качестве модельных явлений естественные геодинамические события не целесообразно, так как они до свершения события не определены ни во времени, ни в пространстве и могут иметь разброс в десятки и сотни километров, а по времени период проявления событий может достигать годичных значений. Моделирование возникновения и развития деструктивных зон до проявления геодинамических явлений в массиве горных пород возможно в условиях шахт при воздействиях взрывчатых веществ. В этом случае развитие деструктивных процессов сжато во времени и определено пространством шахты. Кроме того, в шахтных условиях на больших глубинах исключается влияние атмосферного электричества. Технологические взрывы от десятков килограмм до 300 тонн проводились при добыче руды на Таштагольском железорудном месторождении (г. Таштагол, Кемеровская обл.) на глубинах (520-800) м. При этом возникают геодинамические события с энергией до 10⁹ Дж, в том числе и горные удары. Причем проявления геодинамических событий могут происходить сразу после технологических взрывов, а также через определенный промежуток времени, что особенно опасно при ведении работ в шахте. Динамика массива может проявляться при малых технологических взрывах, являющихся спусковым элементом при определенных условиях накопления энергии в массиве, и при ведении очистных работ при добыче руды. В связи с этим все ниже приведенные тестовые исследования электромагнитной эмиссии проводились в шахте Таштагольского месторождения, за исключением исследований в меднорудной шахте ХУН ТОУ ШАНЬ (Китай)

в 2004 году и в районе Байкальской астрофизической обсерватории в 2005 году. Исследования в шахтном поле Таштагольского месторождения проводились 3-5 раз в год с 2002 по 2018 год при технологических взрывах с энергией до 10⁸ Дж.

5.1. Методы определения мест установки регистраторов электромагнитной и акустической эмиссии

На Таштагольском месторождении в разное время с конца 90-х и в начале 2000-х годов Р.М. Гольдом, А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Г.Е Яковицкой и другими проводились исследования параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии массива горных пород для оценки его напряженно-деформированного состояния (НДС) [223, 302, 337]. Измерения электромагнитной эмиссии массива горных пород в шахтных условиях всегда требует правильного определения места установки регистраторов электромагнитных и акустических сигналов. С одной стороны, для надежной записи характеристик электромагнитной эмиссии требуется наиболее близкое расположение приборов к месту намеченного взрыва и предполагаемым местам геодинамических событий. С другой стороны, чрезмерно близкое расположение регистраторов к взрыву может привести к выбросу распространяющейся взрывной волной акустического датчика из места крепления в массиве горных пород и к смещению электромагнитных датчиков, а также к завалу осыпающимися горными породами самих приборов и к повреждению соединительных кабелей. Поэтому при проведении исследований в шахте очень важно выбрать оптимальные места установки приборов, соответствующих уверенному приему электромагнитной и акустической эмиссий и условиям безопасности.

5.1.1. Метод импульсного электромагнитного профилирования

Как уже было отмечено в главе 2 настоящей работы, шахтное поле Таштагольского месторождения имеет блочные нарушения, размеры которых варьируется от десятков до сотен метров. При многовековом геологическом развитии образовывались новые тектонические нарушения. Появление этих нарушений сопровождалось возникновением зон дробления, зеркал скольжения и тектонических глин. Кроме крупных тектонических нарушений рудная зона пронизана системой трещин. Трещины и тектонические нарушения залечены осадочными породами, скарнами и сиенитами. С конца 90-х годов на месторождении отмечается рост числа динамических проявлений [338, 339]. Поэтому важным является разработка новых надежных методов мониторинга и прогноза геодинамических явлений.

Мониторинг целесообразно проводить в местах с наибольшей электромагнитной активностью горного массива. Как было показано в главе 4 настоящей работы наибольшие амплитуды электромагнитных сигналов возникают в местах контактов материалов с различными электрическими и механическими свойствами. Поэтому было перспективно вести измерения электромагнитной активности на контактах горных пород залеченных тектонических нарушений (даек) и трещин.

Первоначально выбора оптимального места установки регистраторов для электромагнитной и акустической эмиссий типа РЭМС1 и РЭМАС1 был использован метод электромагнитного профилирования, примененный Сальниковым В.Н. и автором этой работы еще в 1973 году на Сорском молибденовом руднике [222]. Используемый метод близок к известным геофизическим методам, использующим естественное электрическое поле Земли, основанный на измерении локальных постоянных электрических полей в горных породах. Известно, что практически везде такие поля существуют при прохождении диффузионноадсорбционных и фильтрационных процессов в горных породах [340]. Отличие заключается в том, что при профилировании на Сорском молибденовом месторождении регистрировались изменения характеристик естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ).

Наблюдения изменений интенсивности ЭМЭ в режиме электромагнитного профилирования проводилось на протяжении шести лет по одному разу в год в орте 2 горизонта минус 210 на глубине 660 метров от дневной поверхности (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – План горизонта минус 210: 1 — рудное тело; 2 — скарны; 3 — тектонические трещины; 4 – дайка

Место профилирования было выбрано исходя из того, что с этого горизонта в шахте Таштагольского рудника начали проявляться горные удары большой интенсивности. Целью профилирования было выявления условий наибольшей электромагнитной активности на дайках в шахтном поле Таштагольского месторождения, распространяющихся в зону технологических взрывов и добычи руды [341, 342].

В качестве регистраторов характеристик ЭМЭ использовался исследовательский комплекс на базе двух РЕМС1 с одинаковыми входными и выходными параметрами. На одном из приборов в качестве приемников ЭМС использовались два емкостных (ДЕП), а на другом приборе применялись два индукционных (ДИП) датчика. Принимающие ЭМС датчики были согласованы по входу с регистраторами РЭМС1 и подключались к прибору по дифференциальной схеме. Методически регистрация ЭМЭ осуществлялась при разносе датчиков, подключенных к регистратору по дифференциальной схеме, на 3 метра и при их расположении рядом друг с другом. Измерялась интенсивность импульсного потока в широком частотном диапазоне регистратора (1 – 100) кГц. Интенсивность импульсного потока в общем случае пропорциональна среднему значению потока напряженности электромагнитного поля *Е_{in}* в единицу времени. Измерение на каждом участке профиля производилось в течение 4 минут. Усреднение данных измерений за каждую секунду проводилось автоматически и записывалось в память регистратора. Данные измерений интенсивности с использованием специализированной программы переносились на персональный компьютер и анализировались. Пикеты устанавливались друг от друга на расстоянии 1,5 м. Измерение интенсивности ЭМЭ на пикетах проводилось от участка контакта магнетитовой руды с дайкой, заполненной порфиритами, в сторону контакта дайки с другой ее стороны с целиком, сложенным скарнами. На рисунке 5.2 приведены значения интенсивности импульсного потока ЭМЭ по магнитной составляющей импульсного электромагнитного поля по пикетам.



Рисунок 5.2 – Изменения средних значений интенсивности импульсного потока ЭМЭ по магнитной составляющей импульсного электромагнитного поля по пикетам

Измерения в орте 2 на горизонте минус 210 проводились регистратором РЭМС1 с использованием индукционных датчиков, расположенных рядом на каждом пикете. На рисунке 5.3 приведена интенсивность импульсного потока ЭМЭ при разносе этих же датчиков ДИП по пикетам на 3 м через каждые 1.5 м. При разметке профиля на пикеты контакт руды с дайкой соответствовал пикету Б6, а контакт дайки со скарновым целиком пикету Б8.



Рисунок 5.3 – Изменения средних значений интенсивности импульсного потока ЭМЭ по магнитной составляющей импульсного электромагнитного поля с датчиками ДИП, разнесенными на 3 м. Интервал перемещения датчиков по пикетам 1.5 м

Учитывая разметку по пикетам на рисунках 5.2 и 5.3, показаны изменения средних значений интенсивности импульсного потока ЭМЭ по магнитной составляющей импульсного электромагнитного поля в местах выхода дайки в орт. Надо заметить, что в теле дайки во всех экспериментах наблюдалась значительная нестабильность интенсивности ЭМЭ. Такая же нестабильность значений интенсивности ЭМЭ просматривается и при расположении датчиков ДИП рядом друг с другом (рисунок 5.2). На рисунке 5.3 в районе пикетов Б8-Б10 наблюдается такая же нестабильность интенсивности ЭМЭ, которая вызвана, как оказалось при изучении геологической карты района работ, тектоническим нарушением в виде трещины.

На рисунке 5.4 приведены результаты измерения по такой же методики профилирования в орте 2 горизонта минус 210 интенсивности ЭМЭ по электрической составляющей импульсного электромагнитного поля. На рисунке видно, что интенсивность ЭМЭ сильно возросла в районе дайки, в то время как до пикетов Б6 и после пикета Б8 ее значения очень низкие.



Рисунок 5.4 – Изменения средних значений интенсивности импульсного потока ЭМЭ по электрической составляющей импульсного электромагнитного поля с датчиками ДЕП, разнесенными на 3 м. Интервал перемещения датчиков по пикетам 1.5 м

Надо отметить, что при измерениях в районе профилей Б5-Б7 и Б6-Б8 также наблюдалась нестабильность интенсивности ЭМЭ, как и в случае измерений с помощью индукционных датчиков. Закономерности изменения интенсивности ЭМЭ при проведении последующих шести профилирований дайки в орте 2 горизонта минус 210 всегда имели подобную тенденцию.

Таким образом, проведенные измерения интенсивности ЭМЭ в полосе частот (1-100) кГц методом профилирования по пикетам позволили определить наиболее эффективные места установки электромагнитных регистраторов в шахтном поле Таштагольского рудника. Исследования показали, что преимущественной эмиссионной электромагнитной способностью обладают контакты горных пород в шахте на залеченных дайках и трещинах меньшего размера, что согласуется с результатами лабораторных исследований двойных, тройных и множественных слоистых систем, приведенных в главе 4 настоящей работы. Нестабильность интенсивности ЭМЭ и повышенная эмиссионная активность горных пород на протяженных контактах в виде залеченных даек и трещин, вероятно, обусловлена также и ориентированным вдоль контакта распространением ЭМС. В этом случае протяженные контакты горных пород выполняют роль природного волновода ЭМС, который находится в непосредственном примыкании к тектонические напряжения и служат источниками геодинамические проявления. Тогда, проводя измерения параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ на контактах горных пород,

можно мониторировать развитие деструктивных зон и изменение НДС во времени, а также отслеживать геодинамические проявления в шахтном поле рудника.

В результате исследований установлено, что, используя выходы залеченных даек, трещин и других тектонических нарушений, можно эффективно измерять параметры и характеристики электромагнитной эмиссии горных пород и, соответственно, эффективно проводить мониторинг изменений НДС породного массива во времени. Распространение нарушений в зону проведения взрывных и очистных работ позволит эффективно изучать развитие геодинамических событий. Таким образом, мониторинг изменения напряженнодеформированного состояния массивов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии наиболее предпочтительно вести на дайках и контактах пород, имеющих выход на разломы, зоны смещения и смятия, а также в места проведения технологических взрывов.

5.1.2. Инфракрасная радиометрия скважин и их окрестностей

В разделе 4.7.5 настоящей работы приведены изменения инфракрасного свечения отверстий и их окрестностей при развитии разрушения образцов горных пород. Это явление может быть также, как и электромагнитное профилирование, использовано при выборе мест установки электромагнитных регистраторов типа РЭМС1 и РЭМАС1 для мониторинга изменений НДС массива горных пород по параметрам и характеристикам ЭМЭ. Предварительные исследования [166, 167] показали эффективность использования этого метода для поиска мест с повышенным напряженно-деформированным состоянием участков породного массива. Это выражается в увеличении температуры в окрестностях контрольных или разгрузочных скважин.

Для выявления возможности использовать инфракрасное (ИК) свечение пространства в скважинах и отверстиях, контактов горных пород проведены натурные исследования на породном массиве Таштагольского рудника. При проведении исследований предполагалось, что за ИК свечение скважин и контактов ответственны физические процессы, протекающие в горных породах при изменении их напряженно-деформированного состояния. Кроме того, инфракрасное свечение отображает видимые изменения температуры воздуха внутри скважин или вблизи контактов горных пород с разными механическими и электрическими свойствами, измеряемые с помощью тепловизионной камеры.

Объектом исследований были скважины в забоях горных выработок и контакты руды с вмещающими горными породами Таштагольского железорудного месторождения, а также контакты разных вмещающих пород. Замеры температуры ИК свечения поверхности и контактов горных пород в горных выработках, а также в скважинах разного назначения проводили с использованием тепловизора IRISYS IRI 4010В в диапазоне $(8-14)\cdot10^{-6}$ м, имеющего порог температурной чувствительности не менее 0.15° С. В камере тепловизора используется неохлаждаемая матрица фото-детекторов, на которую через оптическую систему передается ИК излучение. В последующем тепловое излучение в электронном блоке математически преобразовывается и отображается на экране тепловизора. Матрица тепловизора состоит из 160·120 элементов. Тепловизор обеспечивает измерение температурного диапазона от минус 10°С до плюс 250°С.

Первоначально была поставлена задача оценки изменения температуры методом инфракрасной термографии в различных участках шахты Таштагольского месторождения, как по горизонтали выработок, так и по вертикали горизонтов. Для выполнения этой задачи с помощью тепловизора IRISYS IRI 4010В были измерены поверхностные температуры горных пород в проходках четырех горизонтов шахты ±0, минус 210, 280 и 350. Результаты измерений представлены в таблице 5.1. В таблице в скобках указано количество замеров.

Анализируя данные, представленные в таблице 5.1, можно оценить изменение температуры поверхности подземных выработок и бетонных сооружений в них. Из таблицы видно, что температура с понижением горизонта возрастает, а в действующих забоях несколько повышена относительно средней температуры на горизонте. Горные породы в забоях, в которых определенное время после отпалки (разрушения взрывом) не ведутся работы, имеют меньшую температуру. Поверхности бетона около работающей ВДПУ (вибрационная доставочно-погрузочная установка) более нагреты, чем в выработке, в которой работы не ведутся. Как показано в работах [159, 160] повышение температуры и ее понижение, сопровождает изменения НДС объекта.

В дальнейшем проведены исследования ИК свечения забоя ортов (проходки поперек залегания рудного тела) №11 и №8 на горизонте минус 350 (глубина 800 м). На рисунке 5.5 в ИК диапазоне показано изображение свечения забоя выработки горных пород с выделяющимися разгрузочными скважинами в орте №11 горизонта минус 350 [166].

Бурение разгрузочных скважин было произведено за 7 суток до проведения измерений ИК свечения скважин. За этот период температура бортов скважин выравнивается с окружающими горными породами при отсутствии развития деструктивных зон. Известно также, что разгрузочные скважины пробуриваются в местах, в которых существует опасность развития геодинамических явлений (слышимые щелчки разной интенсивности и частоты следования). По данным геологической разведки перед забоем в 8-10 метрах простирался горизонтальный разлом, который и оказал такое влияние на температурное поле в скважинах и в забое орта №11.

№ п/п		Места прове	дения замер	Содержание и	Температура ⁰С		
	Горизонт	Глубина от поверх- ности.	Выра- ботка	Поверх- ность горных	поверхностей, ограничивающих подземную полость,	t _{мин}	t _{max}
		M		пород	выработку (количество		
1	±0	620	Штрек №3		Замеров) Анкерное крепление, нарушен борт в 1,5 м нал почвой (5)	12.6	13.6
2	±0	457	Руд. двор	Южный борт	Анкерное крепление и торкрет бетон (3)	13.8	14.0
3	-210	680	Орт 04	Северный борт	Руда богатая, борт частично закреплён (6)	14.7	16.8
4	-210	680	Орт 04	Южный борт	Руда богатая, борт частично закреплён (2)	12.5	14.0
5	-210	680	Орт 04	Забой	Руда богатая, забой отпален за 15 часов до замера (4)	15.3	17.3
6	-210	680	Орт 02	Забой	Руда богатая, забой отпален за 48 часов до замера (3)	16.2	16.5
7	-210	680	Орт 03	Забой	Руда богатая, работы в выработке не ведутся (3)	13.9	14.5
8	-210	680	Орт 03	Южный борт	Руда богатая, работы в выработке не ведутся (2)	13.5	13.9
9	-210	680	Орт 03	Северный борт	Руда богатая, работы в выработке не ведутся (3)	13.6	15.7
10	-280	780	Орт 7	Сопряжение с кроссингом	Бетонное крепление разрушено, обводнено (3)	19.5	20.0
11	-280	780	Орт 7	Сопряжение с кроссингом	Бетонное крепление сухое, ненарушенная часть (4)	18.5	19.6
12	-280	780	Орт 7	ВДПУ 5	Борт бетонного крепления под ВДПУ (2)	18.0	19.8
13	-280	780	Орт 7	ВДПУ 5	Кровля бетонного крепления над ВДПУ (1)	21.8	21.8
14	-280	780	Орт 7	ВДПУ 5	Бетонное крепление; ВДПУ после её работы 40 мин (2)	19.8	20.8
15	-350	830	Орт 11	Забой	Пять разгрузочных скважин, пробуренных за семь суток до замера (9)	17.0	20.5
16	-350	830	Орт 11	Южный борт	Метасоматит, закреплены кровля, борт на 1,5 м (2)	18.3	19.5
17	-350	830	Орт 8	Забой	Руда, отпален за 8 часов до замеров, треск, заколы после орошения (4)	21.8	23.5

Таблица 5.1 – Результаты измерения температуры методом ИК радиометрии в руднике Таштагольского месторождения



Рисунок 5.5 – Инфракрасное свечение поверхности забоя с разгрузочными скважинами орта 11 горизонта минус 350 (глубина 800 м) Таштагольского рудника после выдержки в течение 7 суток после бурения. Светлые округлые пятна – скважины диаметром 105 мм

На термограмме из забоя №11 четко обозначаются блок горных пород с пониженной температурой, разгруженный от напряжений, и блок с повышенными значениями температуры и, соответственно, сжимающих нагрузок. В разгруженном блоке горного массива температура варьируется от 15.7° С до 17.5° С. На фоне этого блока выделяются 5 круглых пятен с температурой около 18.8° С, которые соответствуют расположению 5 скважин диаметром $105 \cdot 10^{-6}$ м и глубиной до 10 м. Надо заметить, что разность минимальных температур массива и максимальной температуры в скважине достигала 3.4° С. Через 8 дней после фиксации приведенного на рисунке 5.5 изображения левая часть горных пород забоя, имеющего более высокую температуру свечения, была выдавлена внутрь выработки.

Для сравнения с термограммой, приведенной на рисунке 5.5, регистрировалось температурное поле забоя орта №8 на этом же горизонте минус 350 после отделения определенной массы горных пород от массива с помощью технологического взрыва (отпалка) и частичной его очистки (рисунок 5.6).

Перед проведением очистных работ забой орошался водой. В результате водного орошения температура поверхности забоя горных пород выровнялась, но при этом такое выравнивание температуры сопровождалось слышимым треском и падением кусков горной породы, слабо закрепленных в массиве горных пород на бортах и потолочине проходки (заломы). При этом контроль температуры забоя проводился через час после орошения водой. На рисунке 5.6 видно, что, несмотря на взрывное воздействие, температурное поле забоя достаточно ровное.



Рисунок 5.6 – Изображение распределения температуры на поверхности забоя орта №8 горизонта минус 350 через 8 часов после технологического взрыва по отделению части горных пород от массива и через час после орошения водой

Последующие измерения температурных полей с помощью тепловизора показали, что изменения цветности ИК свечения соответствующей повышению температуры происходит и на контактах горных пород. Так на рисунке 5.7 приведены изображения свечения, полученные в мае (рисунке 5.7а) и октябре (рисунке 5.7б) 2017 года. На рисунке 5.7а приведен снимков ИК свечения в скважине на глубине около 12 м, пробуренной более 30 дней перед съемкой. По данным анализа состава кернов, исследованных ранее при бурении, на этой глубине находится контакт горных пород. На рисунке 5.76 представлено ИК свечение контакта сланцев и глинистых отложений в составе тектонического нарушения. Причем светящаяся поверхность имела почти плоскую конфигурацию, и свечение наблюдалось только из глинистых отложений контакта. Для сравнения с предыдущими светящимися в ИК диапазоне скважинами и контактами горных пород на рисунке 5.7с показана холодная скважина. Таких скважин достаточно много. На рисунках 5.7а,б,с справа цветом обозначен градиент температур. Слева и внизу инфракрасного снимка приведены изменения температуры вдоль контрольных линий, выбранных произвольно. На рисунках 5.7а,с контрольные линии проходят через скважину, а на рисунках 5.76 – через плоский контакт горных пород.

Как уже было отмечено, повышенная температура свечение скважин всегда наблюдалось в местах массива горных пород, находящихся под нагрузкой, вызванной технологическими взрывами, особенностями отработки рудного тела, при проходке ортов и штреков, вблизи зон обрушения, сдвижения и т.д.



Рисунок 5.7 – Примеры ИК-свечения контактов горных пород и скважин: а – свечение в скважине на глубине около 12 м; b – свечение контакта сланцев и глинистых отложений в тектоническом нарушении на плоской поверхности; с – холодная скважина в устоявшейся зоне массива горных пород. Справа цветом обозначен градиент температур

Например, при подготовке взрыва блока 12 Северо-Западного участка (СЗУ) в 6 подэтаже горизонта минус 210 (глубина 660 м) были обследованы методом ИК термографии предназначенные для веерные скважины, для загрузки аммонита, используемого технологического взрыва (рисунок 5.8). Скважины диаметром 105 мм в апреле 2016 года были пробурены под наклоном - от бортов подэтажа на восток, запад и юг, а вертикально - в сторону горизонта минус 280. У северного борта подэтажа находилась вертикальная очистная камера №1 диаметром около 3.5 м. В западном направлении от нее находится камера 1 блока 11, заполненная 27 ноября 2015 года закладной смесью из щебня и цемента низкого качества, близкая к марке 50.



Рисунок 5.8 – Схема расположения камер и веерных скважин 6 подэтажа горизонта минус 210 (глубина 660 м). Каждый ряд веерных скважин обозначен цифрами от 1 до 16

На востоке от очистной камеры, на уровне нижнего среза блока 11, находится камера 2 блока 13, также заполненная закладной смесью 21 мая 2015 года. Измерения ИК свечения скважин проводились 28 мая 2016 года. Сопоставляя даты закладки смеси щебня и цемента с датой проведения измерений, а также расстояние до закладных камер, можно уверенно говорить о невозможности влияния на результаты ИК радиографии тепла, выделяющегося при прохождении химических реакций в закладочном растворе. Измерения ИК свечения скважин и бортов подэтажа показали, что борт, находящийся вблизи очистной камеры, западный борт и первый ряд скважин вблизи нее не выделяются от окружающих пород по цветности свечения.

Инфракрасное свечение наблюдалось в горизонтальных и вертикальных скважинах, отдаленных от очистной камеры на расстояние от 4 до 10 м в южном и восточном направлениях. Причем температура свечения в них превышала температуру окружающих горных пород от 0.6 до 3.2° С. На рисунке 5.9а приведено изображение свечения скважины диаметром $105 \cdot 10^{-3}$ м, пробуренной в восточном направлении. Максимум этого свечения превысил температуру горных пород в ее окрестностях на 3.1° С. На рисунке 5.9б показано свечение вертикальной скважины с превышением температуры окружающих горных пород на 1.5° С.



Рисунок 5.9 – Инфракрасное свечение скважин: а – в восточном направлении от борта блока 12 СЗУ в 6 подэтаже горизонта минус 210 Таштагольского рудника; б – вертикальная скважина того же блока

Таким образом, инфракрасное свечение скважин отображает процесс подготовки разрушения и его свершение в определенном напряженно-деформированном объеме породного массива. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию, наряду с электромагнитным профилированием (раздел 5.1.1), для определения мест с существенно высоким значением напряженно-деформированного состояния массива горных пород, а также выявлять места установки регистраторов электромагнитных сигналов типа РЭМС1 и РЭМАС1. Затем по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии определять зону и направленность развития геодинамических событий и делать краткосрочный прогноз их проявления. Выявление участков породного массива, находящихся в повышенном напряженно-деформированном состоянии, позволит существенно снизить количество используемых регистраторов электромагнитных сигналов. Это повысит прогноза развития и проявления геодинамических событий эффективность после технологических взрывов в массиве горных пород и при проведении очистных работ во время вывоза руды и вмещающих пород на поверхность.

5.2. Исследования характеристик электромагнитной эмиссии до взрыва, во время его проведения и в период релаксации возбужденного состояния массива горных пород

Представленные в разделе 5.1 метод, в котором используются естественные электромагнитные импульсные сигналы массива горных пород, и метод ИК радиографии скважин и их окрестностей являются очень полезным средством для определения мест установки регистраторов электромагнитной и акустической эмиссий в шахтном поле любых рудников и, возможно, угольных шахт. Кроме того, ИК радиографический метод указывает на места в массиве с повышенным НДС. Эти методы эффективно использовались в исследованиях при измерении электромагнитной эмиссии горных пород после массовых технологических взрывов и при ведении очистных работ в шахте.

Массовые технологические взрывы в массиве горных пород являлись важным и полезным средством моделирования развития геодинамических процессов и их свершения в шахтном поле Таштагольского месторождения. Таштагольский рудник относится к месторождению с глубокозалегающих рудными телами, и ведение горных работ проводится в сложных геодинамических условиях, вследствие наличия высоконапряженных тектонических зон. Отработка блоков, с использованием взрывного воздействия, в таких тектонических зонах приводит к дополнительному накоплению напряжений и возникновению горных ударов. Поэтому проблема выявления зон повышенных напряжений и контроля динамики напряженного состояния в горных выработках имеет большое практическое значение, в частности для Таштагольского рудника. Склонные к горным ударам массивы горных пород Таштагольского железорудного месторождения относятся еще и потому, что породам и руде этого месторождения свойственна высокая упругость, способность их к хрупкому разрушению при достижении критических нагрузок. Породы и руды, склонные к хрупкому разрушению: сиениты, скарны, туфовые сланцы, железная руда.

Для отработки метода мониторинга и прогноза геодинамических проявлений в руднике необходимо знать, как изменяются характеристики ЭМЭ до проведения массовых или технологических взрывов, в момент взрыва и в период релаксации породного массива после взрывного воздействия. Как показали лабораторные и натурные исследования физической электромагнитного основой использования метода для мониторинга образования деструктивных зон и развития геодинамических событий являются закономерности изменения энергетических, амплитудно-частотных, временных и других параметров электромагнитных сигналов в зависимости от напряженно-деформированного состояния горных пород. При этом скорость распространения акустических импульсов и их затухание зависит от физикомеханических свойств горных пород. Особое влияние на реакцию массива и, соответственно, на

параметры и характеристики ЭМЭ горных пород оказывает мощность взрывного воздействия. Мониторинг изменения напряженно-деформированного состояния горного массива состоит в изменении одного или нескольких параметров электромагнитных сигналов по методикам, учитывающим особенности каждого конкретного измерения, такие как: петрофизические и тектонические особенности массива горных пород в месте установки регистратора, удаленность места расположения регистратора от взрываемого блока, мощность взрыва, направленность электромагнитных датчиков.

Как уже отмечалось выше, исследования электромагнитной эмиссии в шахтном поле Таштагольского месторождения при технологических взрывах с энергией до 10⁸ Дж проводились около 50 раз с 2001 года по 2017 год. В рамках настоящей работы невозможно привести весь объем исследований, но основные типичные изменения электромагнитной и акустической эмиссии до технологических взрывов, во время их проведения и в период релаксации возбужденного состояния массива горных пород после взрывного воздействия будут приведены и проанализированы. При исследовании параметров и характеристик электромагнитной эмиссии акустические измерения являлись не основной, а дополнительной информацией наряду с сейсмическими данными для сопоставления с фактами произошедших геодинамических событий в шахте.

После технологических взрывов в шахтном поле Таштагольского месторождения развивалось и проявлялось большое количество геодинамических событий различного энергетического класса до 10⁹ Дж, которые отмечались при регистрации акустическими и сейсмическими датчиками. Регистрировались и события в виде горных ударов. Это позволяло набирать статистику соответствия вариаций амплитудно-временных характеристик ЭМЭ, которые предшествовали или совпадали с геодинамическими проявлениями. Накопленные данные по проявлениям геодинамических событий и по характеристикам ЭМЭ необходимы для разработки метода мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических событий по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии. Разработанные и приведенные в главе 3 аналого-цифровые регистраторы РЭМС1 и РЭМАС1 обеспечивали измерения ЭМЭ и АЭ до взрывов, во время их проведения и, что особенно важно, в период релаксации напряженного состояния горного массива после взрыва. Измерения характеристик ЭМЭ до взрывов были необходимы для регистрации общего фона в период отсутствия в шахте очистных, подготовительных и строительных работ, а также при выключенном электрическом оборудовании вблизи мест размещения регистраторов. Такое состояние в шахте соблюдалось от 2 до 3.5 суток. Регистрация амплитуды ЭМЭ при проведении взрыва важна для калибровки регистраторов по энергии взрыва. Измерения ЭМЭ после взрывных воздействий давали необходимый материал для сопоставления изменений напряженного состояния массива по

акустическим и сейсмическим данным с характеристиками ЭМЭ. Характерные примеры изменений интенсивности ЭМЭ при проведении взрывов ВВ в разное время и на разных горизонтах приведены в работах [183, 218, 292]. В этих работах приведены изменения характеристик ЭМЭ в отсутствии горного удара, при формировании геодинамического события и при прохождении горного удара после взрыва.

Типичные изменения характеристик ЭМЭ и АЭ приведены на рисунке 5.10.



Рисунок 5.10 – Типичный пример записи в относительных единицах изменений параметров электромагнитной эмиссии и акустической эмиссии во времени на различных каналах регистратора РЭМС1 в шахтном поле Таштагольского рудника

Измерения ЭМЭ и АЭ в реальном режиме времени обеспечивалось регистратором РЭМС1. На этом рисунке последовательно приведены данные измерений по 6 каналам регистратора. В относительных единицах показаны временные изменения характеристик электромагнитной эмиссии в полосах с центральными частотами 2, 15, 100 кГц и в широкой полосе частот (1-100) кГц, а также интенсивность (счет) импульсного потока ЭМЭ массива горных пород и изменения характеристик акустической эмиссии. Время усреднения данных мониторинга ЭМЭ и АЭ в регистраторе устанавливалось 5 с. В верхней части рисунка 5.10 имеются отметки времени взрыва (МВ) и горного удара (ГУ). На всех 5 каналах наблюдаются отличия характеристик ЭМЭ. Такая разница во временном ходе ЭМЭ обусловлена изменением спектра и амплитуды электромагнитных сигналов из массива пород. Подобные же отличия характеристик ЭМЭ наблюдались и при развитии разрушения образцов горных пород на прессе (см. главу 4).

На рисунке 5.11 приведены записанные регистратором РЭМС1 изменения интенсивности импульсного потока ЭМЭ в течение 48 часов до проведения технологического взрыва блока №11 между горизонтами минус 210 и минус 280, во время его осуществления (МВ) и в период релаксации напряженного состояния массива с прохождением горного удара (ГУ) через пятьдесят секунд после взрыва [292].



Рисунок 5.11 – Изменения интенсивности импульсного потока электромагнитной эмиссии в течение 48 часов до проведения технологического взрыва блока №11 между горизонтами минус 210 и минус 280, во время его осуществления (МВ) и в период релаксации напряженного состояния массива с прохождением горного удара (ГУ) через пятьдесят секунд после взрыва

Количество загруженного для проведения взрыва ВВ составляло 285 тоннам. По данным Таштагольской сейсмостанции энергия взрыва соответствовала величине 3.51·10⁸ Дж. Для записи изменений во времени характеристик электромагнитной и акустической эмиссий по всем 6 каналам были установлены два регистратора PEMC1 в орте 8 горизонта минус 280 на

расстоянии около 80 м до взрываемого блока. В месте установки регистраторов массив сложен магнетитовой рудой. В качестве принимающих датчиков на регистраторе №1 использовались емкостные датчики ДЕП, а на регистраторе №2 применялись индукционные датчики ДИП. Расстояние между датчиками при установке составляло 5 м. Датчики располагались по южному борту орта в направлении взрываемого участка массива.

После технологического взрыва, который на рисунке 5.11 отмечен как момент взрыва (MB), произошел горный удар (ГУ). Время между взрывом и «горным ударом» составило около 50 секунд, а энергия этого события соответствовала восьмому классу или $1.1 \cdot 10^8$ Дж. По данным Таштагольской сейсмической станции «горный удар» был определен по глубине минус 690 метров от дневной поверхности и по горизонтали в юго-западном направлении в 50 метрах от взрыва. На рисунке 5.12 показаны развернутые во времени изменения интенсивности потока электромагнитных сигналов по индукционной составляющей, которая отмечена на рисунке 5.11 как фрагмент. На рисунке стрелкой отмечено время «горного удара» и последующее изменение возбужденного состояния массива в течение 4 минут после его прохождения. При этом после «горного удара» наблюдалось повышение интенсивности ЭМЭ, а затем ее снижение до значений перед взрывом.



Рисунок 5.12 – Развернутый ход во времени интенсивности потока электромагнитных сигналов по индукционной составляющей в момент взрыва, «горного удар» и последующей релаксации

После такой частичной релаксации механических напряжений в массиве стало проявляться новое нарастание возбуждения НДС, которое сопровождалось полуторачасовым повышением среднего уровня интенсивности ЭМЭ. Анализ хода интенсивности ЭМЭ показал, что время нахождения массива в таком состоянии продолжалось около 17 часов, с возвратом в

течение часа на новый уровень состояния НДС. При этом заметны отрезки времени, в которых интенсивность ЭМЭ уменьшалась и возрастала. Возбуждения механических напряжений такого вида характерны при сдвижении больших масс породы по активным разломам в массиве Таштагольского рудника (рисунок 5.13). Схема, приведенная на рисунке 87, любезно предоставлена Рудоуправлением Таштагольского рудника в 2002 году. В последующем моделировании процесса генерации ЭМС при множественных акустических возбуждениях, характерных для смещения горных пород по разломам, будет показан дополнительно.

Кроме фиксирования характеристик ЭМЭ и АЭ при анализе результатов наблюдений в октябре 2003 г. оценивались информационные возможности двух типов датчиков для регистрации емкостной и индукционной составляющих электромагнитного поля в период динамического изменения НДС массива горных пород. При анализе использовались данные, полученные по каналам, регистрирующим амплитуды поступивших на вход двух приборов РЭМС1 электромагнитных сигналов по полосам с центральными частотами 2 и 100 кГц, а также интенсивность ЭМЭ. Время усреднения данных наблюдения 5 с.

Фрагменты изменения во времени усредненной за 5 секунд амплитуды ЭМЭ на частоте 2 кГц и 100 кГц, а также интенсивности ЭМЭ приведены на рисунке 5.14. На рисунках также показаны результаты измерения импульсного электромагнитного поля двумя типами датчиков ДЕП (измерение емкостной составляющей поля) и ДИП (измерение индукционной составляющей поля). Время прохождения «горного удара» на рисунке отмечено стрелкой. Видно, что момент взрыва сопровождается увеличением интенсивности ЭМЭ.

Также возрастают и усредненные амплитуды частотных составляющих ЭМЭ в полосе частот 1–100 кГц, в полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц. В дальнейшем будем условно называть показания по каналу 2 кГц — низкочастотными, а по каналу 100 кГц — высокочастотными. Анализируя полученные результаты можно отметить, что уровень низкочастотных составляющих ЭМЭ в момент взрыва при использовании емкостных датчиков в 10 раз превышает уровень высокочастотных и в 2 раза выше значений, полученных при использовании индукционных датчиков. На рисунке 5.14а видна почти стопроцентная корреляция низкочастотной составляющей ЭМЭ, зарегистрированной в период взрыва и последующего «горного удара» по двум типам электромагнитных датчиков.

После «горного удара» прослеживается кратковременный рост низкочастотной составляющей. Высокочастотная область ЭМЭ (рисунок 5.14б) перед горным ударом при использовании принимающих датчиков ДЕП и ДИП имеет существенные различия. Отмечено увеличение регистрируемых значений по индуктивной составляющей электромагнитного поля перед ГУ и спад по емкостной.



1. – Контуры магнетитовых рудных тел и их номера. 2. – Зоны катаклаза, брекчирования и милонитизации. 3. – Зоны дробления. 4. – Тектонические нарушения и их номера. 5. – Дайки микросиенитов. 6. – Дайки полевошпатовых порфиритов. 7. – Дайки диоритовых порфиритов. 8. – Вмещающие породы. 9. – Номера проектных технологических блоков. 10. – Линии эксплуатационной разведки. 11. – Участки ожидаемых динамических проявлений горного давления и места возможного пережима буро-взрывных скважин по тектоническим нарушениям. 12 – Потенциальные участки удароопасности.

Рисунок 5.13 – Положение Диагонального и Пологого нарушения в зоне обнаженного пространства на Восточном участке Таштагольского рудника в этажах от минус 70 до минус 350



Рисунок 5.14 – Средние значения амплитуды ЭМЭ на частоте 2 кГц (а), 100 кГц (б) и интенсивности ЭМЭ (в), зарегистрированные в период проведения технологического взрыва 12 октября 2003 года приборами РЭМС1 с емкостными датчиками ДЕП (РЭМС1 №1) и индукционными датчиками ДИП (РЭМС1 №2), установленными в одном месте в шахте в орте 8 на горизонте минус 280
Изменения интенсивности ЭМЭ при измерении емкостной и индукционной составляющих электромагнитного поля также имеют противоположные направления. Перед горным ударом при использовании индукционных датчиков наблюдается кратковременный рост интенсивности ЭМЭ. Такое же увеличение наблюдалось и по высокочастотному каналу (см. рисунок 5.14в). В данном случае кратковременность изменений ЭМЭ объясняется тем, что промежуток между технологическим взрывом и горным ударом всего 50 с.

Таким образом, сравнивая данные по характеристикам ЭМЭ, полученным при помощи емкостных и индукционных датчиков, можно сделать вывод о целесообразности применения индукционных датчиков для установки их в массиве, сложенном горными породами с высокой проводимостью. Из результатов наблюдений следует, что при их использовании увеличение амплитуды в полосе с центральной частотой 100 кГц и интенсивности ЭМЭ может служить прогнозным признаком геодинамических явлений.

Кроме того, в процессе исследований характеристик ЭМЭ было выявлено 3 основных временных процессов изменения НДС после взрыва, которые проходят в течение секунд, минут и часов. Первое из них это взрывное изменение НДС горного массива в течение первых двух десятков секунд и прохождение «горного удара» после 50 секундной задержки. Затем после завершения горного удара в течение 4 минут происходила релаксация возбужденного состояния горного массива. После релаксации последовало длительное 17 часовое возбуждение массива с полуторачасовым возрастанием и часовыми колебаниями с возвратом в течение часа в относительно устойчивое состояние на новом стабилизированном уровне.

5.15 Ha рисунке представлена закономерность изменения интенсивности электромагнитной и акустической эмиссий в течение полутора суток в отсутствие «горного удара». Представленные изменения характеристик ЭМЭ и АЭ были получены при измерении в шахте Таштагольского рудника после технологического взрыва в шестом блоке между горизонтами минус 140 и минус 210. Регистраторы РЭМС1 с индукционными и пьезоэлектрическим акустическим датчиками располагались на горизонте минус 210 в орте 7 близи его северного борта, который сложен скарнами и сланцами. Приемники электромагнитных сигналов ДИП, устанавливались в скважины, пробуренные в борту орта на высоте 2 метра от пола. При этом расстояние между датчиками, включенными по дифференциальной схеме, составляло около 5 м.

В качестве приемника акустических импульсов был использован широкополосный пьезоэлектрический преобразователь, который забивался рядом с индукционными датчиками в расщелину борта орта. После технологического взрыва прохождение «горного удара» не наблюдалось. Ход изменений характеристик ЭМЭ, возникающих после мощных взрывных возмущений, указывает на этапы релаксации горного массива.



Рисунок 5.15 – Изменения во времени интенсивности электромагнитных сигналов и усредненной амплитуды акустической эмиссии в диапазоне (1–100) кГц горных пород Таштагольского рудника в блоке № 6 между горизонтами минус 140 и минус 210 до технологического взрыва, во время его проведения и в период релаксации породного массива

Надо заметить, что по данным акустической эмиссии на наибольшее возбуждение массива приходится максимум геодинамических событий (рисунок 5.15). Это же отмечается и по данным Таштагольской сейсмостанции. Полученные закономерности при изменении структура ЭМЭ, важны для разработки метода мониторинга и прогноза геодинамических проявлений в шахтных условиях, как при проведении взрывов, так и при выполнении очистных работ.

На рисунке 5.16 приведена еще одна характерная запись изменений характеристик ЭМЭ до взрыва, во время его проведения, а также в период разгрузки массива горных пород. Масса заложенного для взрыва ВВ составляла 200 тонн. Приборы РЭМС1 с индукционными датчиками устанавливались на горизонта минус 210 в орте 2. Расстояние в южном направлении от взрываемого блока (4–5) составляло около 57 метров. Датчики для измерений характеристик ЭМЭ и АЭ были установлены в месте контакта дайки с породным массивом, описанной в разделе 5.1.1. настоящей работы, так как дайка простиралась в область взрыва. Регистрировались данные по всем 6 каналам с усреднением данных за 5 секунд: интенсивность потока ЭМС; акустическая эмиссия; амплитуда ЭМЭ на широкой полосе частот (1-100) кГц; амплитуды ЭМЭ в полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц.

На рисунке 5.16 видно, что количество и амплитуды высокочастотных сигналов за время усреднения после технологического взрыва апериодически уменьшаются. Это обстоятельство говорит о снижении количества вновь образованных трещин в массиве размером не более $(5-7)\cdot10^{-2}$ м или площадью до $5\cdot10^{-4}$ м². Нарастание амплитуд ЭМЭ заметно возрастает только в полосах с центральными частотами 15 и 2 кГц, что указывает на рост

трещин длиной до одного метра или имеющих площадь отрыва около одного квадратного метра. Детально изменения регистрируемых данных проанализированы по интенсивности ЭМЭ (рисунок 5.17).



Рисунок 5.16 — Фрагмент записи за 13 часов электромагнитной и акустической эмиссий в блоках 4-5 между горизонтами минус 140 и минус 210 в шахтном поле Таштагольского рудника с усреднением данных измерений за 5 с

Интенсивность ЭМЭ до взрыва находилась на уровне 450 усредненных за 5 секунд отсчетов. По данным измерения интенсивности ЭМЭ, которая снизилась в два раза за время 2.3 часа, проведения массового технологического взрыва привело к разгрузке горного массива. При этом разгрузка массива происходила неравномерно с резкими спадами и подъемами. Разгрузка массива в последующем сопровождалась толчками с разной энергией, после которых НДС массива вернулось в состояние до взрывного воздействия. Энергия геодинамических

проявлений в шахте определялась по данным Таштагольской сейсмостанции, а по изменениям амплитуды АЭ дублировался сам факт прошедших события.



Рисунок 5.17 – Изменение интенсивности электромагнитной эмиссии в период релаксации горного массива после проведения технологического взрыва между горизонтами минус 140 и минус 210 в блоке (4-5)

На рисунке 5.17 выделен пример нарастающей в течении одного часа интенсивности ЭМЭ, резкий спад которой произошел после тектонического толчка четвертого энергетического класса. Толчок произошел в породном массиве Таштагольского рудника в 151 метре от регистраторов в 22 часа 22.42 минуты. На ходе акустической эмиссии также выделен момент толчка. Видно, что перед толчком интенсивность ЭМЭ постепенно возрастала до значений перед взрывом, а затем последовал резкий ее спад, вызванный разгрузкой массива толчком четвертого энергетического класса. Следует заметить, что образование при нарастании ЭМЭ больших трещин замедлилось. Такое замедление видно на этом рисунке при снижении в этот отрезок времени амплитуд ЭМЭ в полосах с центральными частотами 15 и 2 кГц. Это указывает на то, что мониторинг подготовки и развития геодинамических событий при правильной установке регистрирующей аппаратуры типа РЭМС1 возможно уже в настоящее время.

Следует заметить, что не всегда сразу вслед за взрывом происходят геодинамические проявления в виде «горного удара» с энергией сопоставимой с энергией самого взрыва. Наблюдаются случаи, когда после технологического взрыва НДС массива в районе обрушения «мягко» релаксирует в виде толчков. Это зависит от многих факторов, как технологических, так и горно-геологических. Для выявления закономерностей механоэлектрических преобразований

были проанализированы результаты наблюдений ЭМЭ и АЭ в период проведения технологического взрыва 25 ноября 2007 года. Технологический взрыв был направлен на обрушение 27 блока между горизонтами минус 210 м и минус 280. Масса взорванного ВВ составляла 166 тонн. При взрыве выделилась энергия 2.3.107 Дж. Два регистратора были установлены на горизонте минус 280. При наблюдениях использовались емкостные датчики, соединенных по дифференциальной схеме. Расстояние между датчиками составляло 5 м. Регистратор РЕМС1 №1 был установлен в 27 орту около южного борта на расстоянии 70 м от обрушаемого блока. Массив горных пород в этом месте сложен сиенитами. Регистратор РЭМС1 №2 был установлен в 30 орту около восточного борта на расстоянии 120 метров от взрыва в месте массива, сложенного магнетитовой рудой с кварцевыми отдельными включениями. В местах установки приборов горные породы существенно отличаются по электрическим свойствам. Так, например электрическое сопротивление сиенитов составляет 10³-10⁶ Ом·м, а магнетитовой руды порядка 10-10² Ом·м. После технологического взрыва по данным Таштагольской сейсмостанции через 97 минут произошло геодинамическое явление с общей энергией 8.14.10⁸ Дж. Это проявление было классифицировано как «горный удар» [342, 344]. Сейсмическая активность шахтного Таштагольского поля месторождения всегда контролируется сейсмостанцией «Таштагольская». Геодинамическая активность также записывалась с пьезоэлектрических акустических датчиков в память обоих приборов РЭМС1. При этом акустические датчики устанавливались в местах расположения регистраторов.

На рисунке 5.18 приведены экспериментальные измерения характеристик ЭМЭ двумя регистраторами типа РЭМС1. На рисунке показаны изменения средних значений амплитуды электромагнитной эмиссии на частоте 100 кГц (рисунок 5.18а) и акустической эмиссии (рисунок 5.18б), зарегистрированные по показаниям прибора РЕМС1 № 1. Интервал усреднения данных контроля составлял 5 с. На рисунке видно, что в момент технологического взрыва резко возросли как ЭМЭ, так и АЭ. В течение последующих 15 мин ЭМЭ медленно увеличивалась. В этот же период времени наблюдали активные сейсмические проявления (рис. 5.18б), которые затем уменьшились, но резко увеличилась амплитуда ЭМЭ. Повышенные значения ЭМЭ регистрировались в течение 45 мин. Такое возрастания амплитуды ЭМЭ свидетельствует о накоплении энергии в массиве горных пород при развитии деструктивной зоны с формированием очага разрушения с последующим «горным ударом». Как уже отмечалось такое утверждение основано, в том числе, на модельных лабораторных экспериментальных исследованиях процесса разрушения образцов горных пород Таштагольского месторождения. В главе 4 настоящей работы показаны изменения характеристик ЭМЭ при формировании деструктивной зоны и очага разрушения при величине от 0.4 до 0.7 от напряжения разрушения исследуемого образца.



Рисунок 5.18 – Изменение усредненной амплитуды ЭМЭ на частоте 100 кГц (а) и акустической эмиссии (б) в период технологического взрыва 25 ноября 2007 г

Накануне горного удара усредненная за 5 секунд амплитуда ЭМЭ снизилась, и наблюдался так называемый эффект «затишья». После спада амплитуды ЭМЭ произошел «горный удар». В момент «горного удара», так же как и во время технологического взрыва, отмечен резкий рост ЭМЭ. Причем уровень амплитуды ЭМЭ во время горного удара превышал амплитуду ЭМЭ, зафиксированную при проведении массового технологического взрыва. Такое превышение указывает на выделении энергии большее, чем при взрыве, что дает возможность без сейсмических наблюдений оценить энергию геодинамического события по данным измерения характеристик ЭМЭ. Геодинамическое проявление в шахтном поле рудника подтверждено информацией с Таштагольской сейсмостанции.

Временные изменения интенсивности ЭМЭ, зарегистрированные первым и вторым регистраторами РЭМС1, показаны на рисунке 5.19. На рисунке отчетливо виден период подготовки горного удара. Следует отметить некоторые различия значений интенсивности и других характеристик ЭМЭ, измеренных однотипными приборами, но установленных с противоположных сторон от взрываемого блока горных пород. Результаты измерений регистратором РЭМС1 №1 показали, что после массового технологического взрыва интенсивность ЭМЭ снизилась в течение нескольких минут с последующим резким увеличением. Повышенные величины интенсивности ЭМЭ, так же как и уровень средних значений амплитуд на частоте 100 кГц (рисунок 5.19), регистрировались около 50 мин. Перед

горным ударом наблюдали "затишье" не менее 40 мин. По данным второго регистратора (№ 2) после технологического взрыва наблюдался ступенчатый нарастающий рост интенсивности электромагнитной эмиссии.



Рисунок 5.19 – Интенсивности ЭМЭ в период проведения массового технологического взрыва (МВ) и последующего «горного удара» (ГУ), зарегистрированных разнесенными в пространстве двумя приборами типа РЭМС1: а – РЭМС1 №1; б – РЭМС1 №2

Причем в это же время происходили геодинамические события в виде толчков. Затем НДС массива стабилизировалось, что отразилось и на амплитуде интенсивности ЭМЭ, и произошел «горный удар». После этого геодинамического проявления интенсивности ЭМЭ в разных местах установки приборов повели себя прямо противоположно. Несмотря на высокое удельное сопротивление массива и его большие возможности по генерации ЭМС в месте расположения РЭМС1 №1 значения интенсивности ЭМЭ снизились практически до ноля. В это же время на приборе РЭМС1 №2, установленным в рудном массиве, уровень интенсивности ЭМЭ возрос.

На рисунках 5.18 и 5.19 видно, что внешнее динамическое возбуждение массива горных пород вызывает генерацию большое количество электромагнитных сигналов в результате трещинообразования, разрушения и колебания двойных электрических слоев в окружении взрываемого блока породы. После взрыва идут достаточно быстрые релаксационные процессы и изменения НДС массива, сопровождающиеся геодинамическими событиями. В результате механоэлектрических преобразований, происходящих в разной степени нагруженных горных породах, электромагнитная эмиссия претерпевает соответствующие изменения.

Различия в ходе изменений интенсивности ЭМЭ для приборов РЭМС1 №1 и №2 после завершения «горного удара» вызваны изменением НДС в прилегающих блоках массива.

Используя связь изменений параметров и характеристик ЭМЭ с изменяющимся напряженным состоянием горных пород, можно уверенно говорить о разгрузке массива в районе установки РЭМС1 №1 с соответствующим падением интенсивности ЭМЭ до значений, близких к нулевым. В районе установки РЭМС1 №2 произошла пригрузка массива и, соответственно, возрастание интенсивности ЭМЭ. Сейсмические данные Таштагольской сейсмостанции и большие вывалы горной породы возле РЭМС1 №2 служат подтверждением описанного перераспределения нагрузки в массиве.

Таким образом, изменения характеристик электромагнитной эмиссии, возникающие вследствие механоэлектрических преобразований в горных породах, отображают изменения напряженно - деформированного состояния породного массива. Измерения интенсивности и амплитуды ЭМЭ горных пород в условиях шахт и рудников позволят определять реальные времена подготовки геодинамических событий и их проявления, а также выявлять особенности перераспределения НДС массива. Знание этих особенностей позволит правильно и эффективно осуществлять управлением разгрузкой массива горных пород с целью профилактики безопасного ведения разведочных, проходческих, очистных и строительных работ.

5.3. Сезонные исследования электромагнитной эмиссии горного массива при проведении технологических взрывов

В главе 2 настоящей работы показаны изменения водного режима в шахте Таштагольского месторождения. Поэтому для определения применимости метода мониторинга развития геодинамических проявлений по характеристикам ЭМЭ в шахтных условиях рудника необходимо было провести сезонные исследования электромагнитной эмиссии горных пород. При проведении исследований использовались регистраторы электромагнитной и акустической эмиссии (PEMC1) и спектральный регистратор электромагнитной и акустической эмиссии (PEMAC1). Прибор PEMC1 позволял за определенный временной интервал по четырём частотным полосам с добротностью ниже 10 с центральными частотами 2 кГц, 15 кГц и 100 кГц, а также в широкой полосе частот от 1 до 100 кГц исследовать изменение средней амплитуды ЭМС в указанных выше частотных полосах. Дополнительно PEMC1 регистрировал изменений акустической эмиссии и интенсивности поступления электромагнитных сигналов за установленный промежуток времени. Временной интервал усреднения по всем каналам РЭМС1 устанавливался 5 с. Регистратор спектров РЕМАС1 позволял исследовать спектральные составляющие ЭМС в полосе частот от 1 до 100 кГц. Весь период исследований был разбит на четыре сезона (весна, лето, осень, зима). Работы проводились: с 23.04.2014 по 29.04.2014; с 16.06.2015 по 25.06.2015; с 26.08.2015 по 03.09.2015 и с 08.12.2015 по 16.12.2015.

5.3.1. Весенний сезон с 23.04. по 29.04.2015 года

Весенний сезон в шахте Таштагольского месторождения всегда характеризуется повышенной влажностью. Исследования проводились с использованием приборов PEMC1 №1 и PEMC1 №2, которые были установлены на горизонте минус 280 (730 м от дневной поверхности) в районе северо-западного разведочного штрека на сопряжении ортов 12 и 13. Породы в районе исследований представлены перемятой вмещающей породой. Расстояние от места установки регистраторов до взрываемого блока около 150 м. Массовый технологический взрыв был произведен 26 апреля 2014 года в 12 часов 5 минут местного времени с закладкой 136 тонн BB и технологический взрыв по 14 орту между горизонтами минус 280 и минус 210 при закладке 3.76 тонн BB. При измерении к прибору PEMC1 №1 были подключены два дифференциальных емкостных датчика (ДЕП). Расстояние между датчиками составило 4 м. К прибору PEMC1 №2 был подключен индукционный датчик (ДИП), который был помещен в скважину, расположенную на высоте 2 метра от поверхности. Приборы были установлены 25 апреля 2015 года за сутки до взрывов.

На рисунке 5.20 приведена изменяющаяся во времени интенсивность следования ЭМС и интенсивность АЭ в интервале от 12 часов по местному времени до 22 часа 26 апреля 2015 года. На рисунке отмечен момент взрыва, при котором выделилась энергия 7.10⁷ Дж. Сейсмическая активность по данным сейсмостанции Таштагол в этот период времени отмечена на рисунке стрелками с цифрой.

Энергия зарегистрированных толчков составила от 300 Дж до 1.105 Дж. Анализируя данные приведенные на рисунок 94 можно с уверенностью сказать, что факт прохождения геодинамического события отмечается увеличением интенсивности ЭМЭ И AЭ, зарегистрированные прибором PEMC1. На рисунке 5.20 имеются также 0 отметка и события по АЭ без отметок. На изменениях интенсивности ЭМЭ соответствующих им отметок нет. Возможно, такие события на ходе АЭ соответствуют падению камней горной породы вблизи установленного датчика. Но в любом случае эти события ниже уровня реагирования датчиков сейсмостанции, чувствительность которых специально занижена до определенных значений. такого занижения чувствительности является отсечение малозначительных Целью механических проявлений в виде падения отдельных камней, ходьбы рабочих, бурения, работа поездов и т.д.



Рисунок 5.20 – Изменения во времени в весенний период интенсивности электромагнитной и акустической эмиссии при проведении массового взрыва 26 апреля 2015 года. Стрелками помечены сейсмические события по данным Таштагольской сейсмостанции: $1 - 1.1 \cdot 10^4$ Дж; $2 - 5.17 \cdot 10^2$ Дж; $3 - 5.27 \cdot 10^5$ Дж; $4 - 5.27 \cdot 10^3$ Дж; $5 - 5.5 \cdot 10^3$ Дж; $6 - 2.2 \cdot 10^3$ Дж; $7 - 1.7 \cdot 10^3$ Дж; $8 - 3.44 \cdot 10^1$ Дж

5.3.2. Летний сезон с 16.06. по 25.06.2015 года

В летний сезон количество осадков увеличивается, и влажность в шахте также возрастает. Исследования проводились в орте 2 на горизонте минус 210 (660м от дневной поверхности). К прибору РЕМС1 №1 подключен индуктивный датчик (ДИП), расположенный на границе участка массива сложенного рудой и дайки. Технологический взрыв был произведен 21.06.2015 в 8 часов по местному времени. Взорван 4 блок Восточного участка между горизонтами минус 210 и минус 140. При этом взрыве произведен разворот блока. Энергия взрыва составила 3·10⁶ Дж. На рисунке 95 приведены временные изменения электромагнитной активности по каналам 2 кГц, 15 кГц, 100 кГц, широкой полосе (1-100 кГц), интенсивности электромагнитной и акустической эмиссии в интервале от 8 до 13 часов.

При анализе представленных данных на рисунке 5.21 выявлено, что механоэлектрические преобразования, протекающие в массиве горных пород, имеют свои особенности в зависимости от частотного диапазона. Так, видим, что сразу после взрыва наблюдается некоторое снижение на полосе 15 кГц, тогда как на частоте 100 кГц наоборот

наблюдается увеличение амплитуды ЭМС. Это указывает на то, что сразу после взрыва выросла доля высокочастотных составляющих ЭМЭ, что соответствует повышенному трещинообразованию до десятых долей метра. По данным акустической эмиссии большая часть энергии возбуждения расходуется на геодинамические проявления в первый час после взрыва. Это подтверждают и данные сейсмостанции Таштагол, которой зафиксировано 35 событий энергетического класса от 1 до 4. В дальнейшем число событий снижается.



Рисунок 5.21 – Изменения во времени электромагнитной и акустической активности в период массового и технологического взрывов 21.06.2015 г

На этом рисунке обращает на себя внимание резкое увеличение электромагнитной активности в интервале времени от 11 до 12 часов. Сопоставляя данные сейсмостанции и данные акустической эмиссии, зарегистрированные прибором PEMC1, видим, что накануне увеличения электромагнитной активности выделяется пик, который соответствует

геодинамическому событию в виде толчка с энергией 1.24·10⁴ Дж. Эпицентр толчка находился в 150 м от места установки PEMC1. Здесь же на рисунке приведены геодинамические события, зарегистрированные в этот интервал времени. Полученный результат можно объяснить, тем, что поскольку датчик PEMC1 был установлен на границе дайки, которая в данном случае служила волноводом, то механоэлектрические преобразования, вызванные произошедшим событием явились результатом смещение частей породы по дайке. Это и привело к увеличению электромагнитной активности, продолжавшееся около 30 минут.

5.3.3. Осенний сезон с 26.08. по 03.09.2015 года

В осенний сезон количество осадков в виде дождя над шахтой и в регионе уменьшается, соответственно влажность в шахте снижается по сравнению с летом (см. главу 2 настоящей работы). При исследовании электромагнитной и акустической эмиссий прибор PEMC1 №2 устанавливался на горизонте минус 210 (660 м от дневной поверхности) во 2 орте на границе руды и дайки. Датчик ДИП помещен в скважине. Надо отметить, что в районе установки PEMC1 №2 наблюдалась повышенная влажность бортов выработки по отношению к другим частям массива на этом горизонте. Регистратор устанавливался в этом месте для того, чтобы проверить влияние увлажненности горных пород на общий прием ЭМС. Массовый технологический взрыв произведен 31.08.2015 г. в 4 блоке между горизонтами минус 140 и минус 210, который привел к обрушению блока. Масса взрывчатого вещества составила 169.7 тонн, причем при взрыве выделилась энергия 2·10⁸ Дж.

На рисунке 5.22 приведены изменения во времени электромагнитной активности по каналам 2 кГц, 100 кГц, широкой полосе (1-100 кГц), интенсивности электромагнитной и акустической эмиссий, зарегистрированные в период времени от 8 до 23 часов. Из рисунка видно, что в отличие от летнего периода амплитуда ЭМС на частоте 100 кГц и в широкой полосе снизилась после взрыва. В это же время наблюдается большое количество событий, зарегистрированных каналом АЭ. По данным сейсмостанции Таштагол за первый час зафиксировано 44 события. Снижение амплитуды ЭМС после взрыва на высоких частотах ЭМЭ указывает на снижение образования малых трещин размером до десятка сантиметров. А большое количество геодиномических проявлений объясняется значительной величиной выделившейся энергии, по сравнению с летним периодом. Разница составила 2 порядка, что и привело к большему количеству сейсмических событий. Увеличение выделившейся энергии амплитуды ЭМС наблюдались в течение 7 часов, а затем произошло некоторое ее повышение.



Рисунок 5.22 – Изменение электромагнитной и акустической активности в период массового взрыва 31.08.2015 г

В 17 часов 30 минут происходит толчок с энергией 55.0 Дж, зафиксированный сейсмостанцией и зарегистрированный по каналу АЭ. В этот же момент времени по всем каналам PEMC1 наблюдается резкое увеличение амплитуды ЭМЭ. При этом надо заметить, что энергия толчков такая же как и в летний период.

5.3.4. Зимний сезон с 08.12. по 16.12.2015 года

В зимний период влажность в шахте Таштагольского рудника минимальная. При исследовании изменений ЭМЭ прибор PEMC1 №2 был установлен в орте 2 горизонта минус

210 около борта выработки, сложенной вмещающей породе и в 8 метрах от границы массива, сложенного породой и дайки. Подключены дифференциальные датчики ДЕП. Расстояние между датчиками составило 3 метра. Прибор PEMC1 №1 установлен около борта выработки, сложенного рудой. К прибору подключен датчик ДИП. В период установки приборов работал бурильный станок. Массового взрыва в этом временном интервале не производили.

Наряду с проверкой влияния влажности, наблюдения в этот период проводились еще и для сравнительных исследований в натурных условиях шахтного поля подземного рудника параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ в горных породах с разной проводимостью. Исследования проводились в горных выработках 11-13 декабря 2015 года на глубине 660 м с использованием 2-х приборов РЕМС1. Место проведения исследований характеризуется переходом массива сложенного рудой к скарновому целику. Между этими массивами проходит диоритовая дайка. Один из приборов PEMC1, оснащенный дифференциальными емкостными датчиками был установлен около борта выработки, сложенного рудой на границе с дайкой. Второй прибор РЕМС1 был оснащен дифференциальными индукционными датчиками и установлен около борта выработки массива скарнового целика. Приборы PEMC1 в режиме реального времени фиксировали изменение ЭМЭ на частотах 2 кГц, 15 кГц, 100 кГц, 1-100 кГц (ШП), интенсивность ЭМЭ (счет) и акустическую эмиссию. Скарновый целик имеет проводимость на 3-4 порядка больше, чем массив, сложенный рудой. На рисунке 5.23 приведены регистрируемые индукционными датчиками изменения параметров ЭМЭ руды, а на рисунке 5.24 приведена запись ЭМЭ с помощью емкостных датчиков. Следует отметить, что измерения проводились в условиях работающего рудника. Время начала измерений 9 часов Томского времени. Приборы РЕМС1 вели измерение в течение 40 часов.

Анализируя результаты, представленные на рисунках 5.23 и 5.24, видим, что в начале измерений (с 9 до 12 часов) наблюдались повышенные значения электромагнитной и акустической активности по обоим приборам. В 11.54 в руднике было произведено 8, а затем еще 6 местных взрывов (отпалов) на глубине 550 м. Расстояние до места установки 2-х приборов PEMC1 составило порядка 150 м. Отпалы сопровождались динамическими эффектами, и, следовательно, были зарегистрированы акустическим каналом приборов PEMC1. Это видно на рисунках 5.23 и 5.24 в районе 12 часов. Следующие динамические проявления наблюдались в районе 18 часов. Начиная с 16 часов, на обоих приборах, наблюдалось увеличение электромагнитной активности. Событие происходит в районе 18 часов, но электромагнитная активность не снижалась и продолжалась еще в течение 2 часов, что свидетельствует о релаксации массива. В результате все динамические события, произошедшие в руднике в период проведения наблюдений и связанные с механоэлектрическими преобразованиями, зарегистрированы приборами РЕМС1 не зависимо от места установки.



Рисунок 5.23 – Изменения во времени электромагнитной и акустической активности в зимний период измерения 12.12.2015 г., зарегистрированные с использованием датчиков ДИП

Главное отличие полученных результатов заключается в том, что прибор PEMC1, установленный в скарновом целике показал более высокие значения спектральных и эмиссионных характеристик, по сравнению с показаниями прибора PEMC1, установленного в руде. На рисунках 5.23 и 5.24 видно, что значения показаний интенсивности ЭМЭ в скарновом целике (рисунок 5.24) на порядок превышают значения характеристик ЭМЭ в руде (рисунок 5.23). Значения по спектральному каналу 15 кГц и широкой полосе на рисунке 5.23 также превышают значения, полученные на рисунке 5.24.

Полученный результат можно объяснить затуханием высокочастотных составляющих в руде, являющейся высокопроводящей породой. Значения амплитуды ЭМС на низкой частоте (2 кГц) наоборот, в руде немного выше, чем в скарне, что также находит свое логическое объяснение, которое заключается в проводящих свойствах руды и скарна.



Рисунок 5.24 – Изменения во времени электромагнитной и акустической активности в зимний период измерения 12.12.2015 г., зарегистрированные с использованием датчиков ДЕП

Таким образом, подводя итог сезонным измерениям с целью изучения влияния влажности на показатели электромагнитной активности в шахтном поле Таштагольского

месторождения в период релаксации породного массива, можно отметить следующие особенности.

На характеристики регистрируемой электромагнитной эмиссии влажностный режим в шахтном поле рудника оказывает влияние в большей степени по электрической составляющей электромагнитного поля и в меньшей степени на показания по индукционной составляющей.

Результаты исследований в разные периоды времени года электромагнитной и акустической эмиссий горных пород, спектральных параметров ЭМС, данных сейсмических наблюдений до проведения технологических взрывов, в период их проведения и при релаксации породного массива показали связь изменений напряженно-деформированного состояния породного массива, характеристик и параметров ЭМЭ горных пород. Показано совпадение отметки фактов прохождения геодинамических событий по данным акустических и сейсмических наблюдений в период перераспределения напряженно-деформированного состояния массива.

5.4. Связь параметров и характеристик электромагнитной эмиссии с сейсмическими наблюдениями

В разделе 5.2 настоящей работы на рисунках 5.20-5.22 приведены, наряду с характеристиками ЭМЭ, данные мониторинга акустической эмиссии, а стрелками отмечены геодинамические события, зафиксированные Таштагольской сейсмостанцией. Кроме того в разделе 5.1 на рисунках 5.10, 5.15, 5.16, 5.18 5.19 показано соответствие пиков ЭМЭ и АЭ. Надо отметить, что на перечисленных рисунках не всем пиковым значениям акустической эмиссии соответствует достаточное увеличение характеристик электромагнитной эмиссии.

В период проведения технологических или массовых взрывов наряду с измерением характеристик ЭМЭ проводились комплексные измерения сейсмической и акустической активности массива горных пород Таштагольского рудника. Расположение магнетитовой руды в шахте на глубине 500-800 метров характеризуется сложной блочной структурой и высоким уровнем природного поля тектонических напряжений. Такое превалирующее влияние неблагоприятных факторов вызывает техногенные и тектонические землетрясения, горнотектонические и горные удары. Для мониторинга изменения НДС массива горных пород и сейсмических событий использовался разрабатываемый метод, основанный на регистрации электромагнитной параметров И характеристик эмиссии при механоэлектрических преобразованиях в горных породах. Исследования параметров и характеристик ЭМЭ проводились регистраторами электромагнитных и акустических сигналов РЕМС1 и РЭМАС1, представленных в главе 3. Для сравнительной оценки геодинамики массива горных пород в

шахтном поле Таштагольского месторождения с измерениями параметров и характеристик электромагнитной эмиссии, использовались сейсмические данные сейсмостанции «Таштагол».

5.4.1. Распределение геодинамических событий в шахтном поле рудника после массового технологического взрыва

Для выявления связей изменения характеристик ЭМЭ с изменением напряженнодеформированного состояния породного массива в период массовых взрывов, необходимо понять, как происходит распределение энергии взрыва в массиве и что при этом происходит с массивом горных пород в окрестности взрыва. В зависимости от геолого-тектонических и петрофизических особенностей массива пород, а также распределения энергии от взрыва BB будет зависеть процесс механоэлектрических преобразований и сейсмическая активность. Процесс воздействия взрыва на горную породу многофазен. Объяснение механизма действия взрыва в различных условиях разрабатывалось и описывалось в трудах многих ученых [183, 345, 346]. В зависимости от того, какие породы складывают массив, какие у него геологогеофизические и тектонические особенности, какая у него нарушенность и многое другое, по такому механизму и происходит распределение энергии.

Известно, что в начальный момент энергия взрыва ВВ, передаётся в массив и затрачивается на измельчение породы в ближней зоне и на формирование волны напряжений. Работа взрыва выполняется за счет потенциальной энергии ВВ, выделяющейся при взрыве и не полностью превращается в механическую энергию и проявляется в различных формах, таких как смятие (перетирание) породы, инициирование в породе упругих (ударных) волн; сжатие, пластической деформации [345, 346]. В этих работах подробно описаны зоны разрушения при взрыве. В центре взрыва порода становится бесструктурной, раздавленной и уплотненной пересеченная множественными трещинами разрыва и скольжений. Затем следует слой породы, сохранившей в отдельных блоках свою структуру. При этом эти блоки также содержат сеть сферических и радиальных трещин. В более удаленной части массива количество и длина трещин сокращаются. В этом слое волна напряжений сильно затухает и не вызывает разрушений породы. Здесь она создает лишь ее сотрясение.

При достижении свободной поверхности ударная волна вызывает отрыв ее верхних слоев. Известно, что сопротивление породы разрыву в 10—50 раз меньше сопротивления сжатию [346]. Кроме того, на свободной поверхности при отражении возникает волна растяжения, направленная к центру взрыва. При своем распространении волна растяжений теряет свою энергию, но вблизи поверхности отраженная волна создает трещины отрыва. Возможен выброс породы в свободное пространство, что и наблюдается в шахте

Таштагольского рудника. В результате при взрыве горная порода устремляется в зоны наименьшего сопротивления туда, где наименее прочные породы или имеются свободные поверхности. В начальной стадии генерируемая взрывом волна распространяется во все стороны симметрично. Но при своем распространении и взаимодействии со свободной поверхностью волна отражается и приводит в движение примыкающую к свободной поверхности среду. При этом вектор направления движения горных пород перпендикулярен свободной поверхности. Волна разрежения при движении к центру взаимодействует с расширяющейся газовой полостью, образовавшейся при взрыве. При этом волна нарушает симметричность этой полости, и газ начинает преимущественно расширяться к свободной поверхности. Это обстоятельство обеспечивает увеличение скорости перемещения выброса породы до прорыва газа в свободное пространство [345, 346].

Учитывая перечисленные представления о разрушении массива горных пород взрывом рассмотрим, например, что происходило при выделение энергии ВВ в период массового взрыва 15.09.2013 года на Таштагольском руднике. Взрывались блоки 12 и 13-14 между горизонтами минус 280 и минус 350. На рисунке 5.25 приведена последовательность геодинамических проявлений с энергетическими параметрами, зарегистрированных сейсмостанцией «Таштагол» после взрыва на протяжении 18 часов. По оси ординат на рисунке приведен класс событий, отражающий сейсмическую энергию. По оси абсцисс время.



Рисунок 5.25 – Энергетическая последовательность во времени геодинамических событий, по данным сейсмостанции «Таштагол» в период проведения массового технологического взрыва

На рисунке видно, что основная часть энергии ВВ выделилась в виде толчков различной интенсивности в течение первых 3 часов (остальные виды энергии: химическая и тепловая не рассматриваются). Затем наблюдалось увеличение временного интервала между толчками. Рассмотрим места локализации очагов геодинамических проявлений в трехмерных координатах. На рисунке 5.26а,6 в трехмерных координатах приведены последовательности геодинамических проявлений в течение первой минуты (а) и с 3 по 5 минуты (б) после взрыва. На рисунках цифрами от 1 до 9 показана последовательность проявления динамики массива. Серым цветом схематично показана взрываемая область. Видно, что толчки разной интенсивности происходят последовательно, как бы по «сферической» поверхности, что подтверждает сказанное ранее о том, что фронт взрывной волны при своем прохождении создает нарушения или напряжения в массиве относительно симметрично во все стороны.



Рисунок 5.26 – Последовательность геодинамических событий после массового технологического взрыва: а - 1 минута после взрыва, б – с 3 по 5 минуты после взрыва

При взрыве заряда ВВ происходит «закачка» волновой энергии в массив, а происходящие при этом разрушения вызывают разгрузку части массива от сжимающих напряжений. Происходит смещение пород в сторону вновь образованных поверхностей.

Таким образом, первоначально при прохождении прямой ударной волны происходит сжатие и деформация породы, а при прохождении через эти же участки отраженной волны происходит разрушение породы и большинство геодинамических проявлений, что мы и наблюдаем по сейсмическим и акустическим сигналам. При этом надо учитывать, что количество геодинамических событий и выделившееся при этом энергия будут определяться геолого-тектоническими и петрофизическими особенностями массива горных пород. На рисунке 5.27а также в трехмерном представлении приведены последовательности геодинамических событий, в виде толчков, во временном интервале с 3-его по 4-й час после взрыва, а на рисунке 27б количество и последовательность толчков в интервале с 4-ого по 5-й час после взрыва.



Рисунок 5.27 – Последовательность геодинамических событий после массового взрыва: a – c 3 по 4 час после взрыва, б – с 4 по 5 часы после взрыва

На рисунке 5.27а,б видно, что в течение времени от 3 до 4 часов произошло 13 толчков, а за интервал времени от 4 до 5 часов всего 8. На рисунке 5.28 представлена иллюстрация того, как геодинамические проявления в массиве происходят по сфере. Здесь представлены расстояния от нулевой координаты до эпицентров произошедших событий и их зенитный угол.



Рисунок 5.28 – Зависимость расстояния от места установки PEMC1 до эпицентра событий и зенитного угла

Нулевой точкой отсчета были взяты координаты места расположения регистратора PEMC1. От этой нулевой координаты были рассчитаны расстояния до очага геодинамического события по данным Таштагольской сейсмостанции. Уменьшение количества толчков в массиве с течением времени не означает, что массив полностью разгружен от напряжений. При геодинамических проявлениях происходит только перераспределение НДС массива, которое при последующих технологических взрывах и проведении очистных работ может усиливаться и сопровождаться новой динамикой горных пород.

Таким образом, для объективного представления об изменении напряженнодеформированного состояния массива, образования деструктивных зон и их развития, проявления геодинамических событий по характеристикам электромагнитной эмиссии важным является положение зон и центров событий по отношению к точке нахождения регистраторов ЭМЭ.

5.4.2. Амплитудно-частотные спектры электромагнитных сигналов горных пород в шахтном поле рудника после массового технологического взрыва

В подразделе 5.3.2 приведены данные изменения характеристик ЭМЭ И геодинамических событий, зарегистрированных как по акустическому каналу РЭМС1, так и Таштагольской сейсмостанцией. На рисунке 5.29 приведены более детальные изменения во времени характеристик ЭМЭ в полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц, в широкой полосе (1-100) кГц и интенсивности потока ЭМС, а также акустической эмиссии горных пород в шахте Таштагольского месторождения. При записи данных мониторинга регистратором РЭМС1 использовалось усреднение 5 секунд. В это же время проводились исследования спектральных составляющих ЭМЭ с использованием прибора РЕМАС1, время усреднения на котором составляло 32 микросекунды, а амплитуды спектральных составляющих записываются через 1 кГц в интервале (1-100) кГц. При этом оба регистратора работали непрерывно в реальном масштабе времени. Для анализа были выбраны временные интервалы с 10:48 по 11:50 часов 21.06.2015 года. В момент времени 10:52 произошло геодинамическое событие, зафиксированное сейсмостанцией, с энергией 1.24·10⁴ Дж.

Геодинамическое событие привело к увеличению уровня спектральной амплитуды в различные этапы времени, отмеченные на рисунке 5.30 как М1, М2, М3, М4. Время 10:52 часа соответствует метке М1, время 11:02 часа соответствует метке М2, время 11:11 часа соответствует метке М3 и время 11:20 часа соответствует метке М4. Изменения амплитуды спектральной составляющей ЭМЭ на частоте 5 кГц изображены на рисунке 5.31.





На рисунке 5.31 видно, что геодинамическое событие вызвало временное изменение напряженного состояния массива, сопровождающееся низкоэнергетическими динамическими проявлениями, наибольшее из которых имеет энергию 33 Дж.

Впоследствии наблюдался спад электромагнитной эмиссии до прежнего уровня. Увеличение уровня ЭМЭ горных пород наблюдается в период релаксации напряженного состояния массива. Такие изменения во времени характеристик ЭМЭ очевидно связаны с процессами трения и скола при скольжении по тектоническим трещинам участков массива горных пород. Моделирование такого процесса генерации ЭМЭ будет приведено ниже в следующем разделе. Изменение полного спектра в этот интервал времени приведено на рисунке 5.32.



Рисунок 5.30 – Амплитудные спектры в моменты времени 10:52 часов (М1), в 11:02 часов (М2), в 11:11 часов (М3), в 11:20 часов (М4)



Рисунок 5.31 – Распределение амплитуды ЭМЭ во времени на частоте 5 кГц в интервале с 10:50 по 11:50 часов 21.06.2015 года

Результаты мониторинга 12.12.2015 с 15:45 по 22:55 приведены на рисунке 5.33, где изображена зависимость спектральной амплитуды от времени на частоте 35 кГц. Вся

совокупность соответствует возникшему геодинамическому событию, зарегистрированному сейсмостанцией и по акустическому каналу регистратора (рисунки 5.23 и 5.24).



Рисунок 5.32 – Зависимость спектральной амплитуды от времени на частоте 35 кГц в шахте Таштагольского месторождения 12 декабря 2015 года

В этом же интервале рассматривалось изменение спектральной амплитуды от времени на частоте 5 кГц (рисунок 5.34).



Рисунок 5.34 – Изменения во времени амплитуды ЭМС на частоте 5 кГц от 12 декабря 2015 года. М1 и М2 отметки проб построения спектров



Рисунок 5.35 – Амплитудные спектры на отметках в моменты времени 16:38 (M1) и 17:36 (M2)

Здесь во время геодинамических событий (толчок был зафиксирован в 18:18, что характеризуется соответствующим импульсом) наблюдается изменение интенсивности спектральной амплитуды, как до сейсмического события так, и после него в течение 10 минут.На рисунке 5.34 отмечены моменты времени 16:38 (М1) и 17:36 (М2), в которые взяты спектральные пробы, изображенные на рисунке 5.35.

На рисунке 5.35 видно, что спектр меняется и в низкочастотной области в районе 5 кГц, и особенно сильно в высокочастотной области спектра, начиная с 30 до 100 кГц. Это возможно связано с множественным образованием в массиве горных пород трещин длиной до десятка сантиметра с последующим их слиянием в трещины отрыва метровой и более длины. Другой причиной таких изменений электромагнитной эмиссии, как указывается выше по тексту, может являться скольжение части массива горных пород по близлежащему от взрыва разлому или дайке.

5.4.3. Исследование связей амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов с сейсмическими наблюдениями разной интенсивности

Практически во всех натурных исследованиях в шахтных условиях Таштагольского рудника проводился амплитудно-частотный и временной анализ параметров электромагнитных, акустических сигналов и сейсмики на различных глубинах до 800 м при подготовке, проявлении и развитии геодинамических событий разной интенсивности во время технологических взрывов и в период релаксации горного массива. С 2012 года для исследования спектрально-временных характеристик электромагнитных сигналов при подготовке и развитии геодинамических событий наряду с регистратором РЭМС1 стал использоваться автономный переносной регистратор электромагнитных и акустических сигналов РЕМАС1, разработанный и изготовленный в ТПУ совместно с ТУСУР.

Основные технические характеристики прибора приведены в главе 3 настоящей работы. Период времени, когда наиболее активно происходят геодинамические изменения, является время проведения технологических работ и массовых взрывов при разработке рудных блоков. При таких воздействиях происходит разрушение блоков, смещение по тектоническим нарушениям и образование зон повышенного напряженно-деформированного состояния. Анализ сейсмических данных и акустических измерений с 2002 года показал, что наибольшая электромагнитная активность наблюдается в окрестности эпицентра массового взрыва. Поэтому размещение приборов выбиралось в ближайших от воздействия выработках, но не ближе 50 метров. Проведённый анализ изменений спектральных амплитуд ЭМС при подготовке и развитии геодинамических событий разной интенсивности в результате массовых взрывов показал, что хорошую информативность при регистрации ЭМЭ с помощью РЭМАС1 спектральные составляющие на частотах 3-5, 13 и 20 кГц.

Для доказательства связей электромагнитной активности, акустической эмиссии и сейсмических данных проанализированы наблюдения в период с 23.04. по 29.04.2015 года, которые приведены на рисунке 5.20. При измерениях использовались два прибора РЕМС1, установленных на горизонте минус 280 (730 м от дневной поверхности) в районе северозападного разведочного штрека (СЗУ) на сопряжении 12 и 13 ортов. Породы в районе установки представлены перемятой вмещающей породой. Расстояние от места установки регистраторов до взрываемого блока составило около 150 м. На рисунке 5.36 приведен план участка, на котором показано место установки регистраторов РЕМС1. Было произведено два взрыва, первый из которых при закладке имел массу ВВ 136 тонн, а второй технологический взрыв по 14 орту между горизонтами минус 280 и минус 210 при закладке имел массу ВВ 3760 кг. Время проведения взрывов 12 часов 5 минут (по местному времени) 26 апреля 2015 года. При измерении к прибору РЕМС1№1 были подключены два дифференциальных емкостных датчика (ДЕП). Расстояние между датчиками составило 4 м. К прибору PEMC1 №2 был подключен индукционный датчик (ДИП), который был помещен в скважину, расположенную на высоте 2 метра от поверхности. На рисунке 5.20 приведена временная диаграмма интенсивности электромагнитной эмиссии и интенсивности акустической эмиссии во временном интервале от 12 часов по Кемеровскому времени до 22 часа 26.04.2015 года. На рисунке отмечен момент взрыва, при котором выделилась энергия 7·10⁷ Дж.



Рисунок 5.36 – План северо-западного участка на горизонте минус 280

Сейсмическая активность по данным сейсмостанции «Таштагол» в этот период времени на цифрой, обозначающей последовательность отмечена рисунке стрелками с геодинамического события. Энергия зарегистрированных толчков составила от 3·10¹ Дж до 10⁵ Дж. Анализируя данные приведенные на рисунке 94 можно с уверенностью сказать, что факт прохождения геодинамического события отмечается увеличением интенсивности ЭМЭ и АЭ, зарегистрированные прибором РЕМС1. В таблице 5.2 приведены зарегистрированные сейсмические данные (в виде толчков) в этом временном интервале. В ней указаны: дата и время (по Кемеровскому времени или минус 7 часов по Гринвичу) прихода сейсмического события; X, Y и Z координаты сейсмического события; привязка к месту шахтного поля и выделившаяся энергия во время события.

Коэффициент корреляции *r_{xy}* рассчитывался по методу Пирсона [347]

$$r_{xy} = \frac{n \cdot \sum (x_i \cdot y_i) - (\sum x_i \cdot \sum y_i)}{\sqrt{[n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} ,$$
(5.1)

где *n* – число значений переменной X или Y.

Проведенный расчет коэффициента корреляции выделившейся сейсмической энергии, амплитудно-частотных параметров ЭМЭ и амплитуды акустической эмиссии показал:

- корреляция сейсмической энергии и амплитуды акустической эмиссии составила 0.6;

- корреляция амплитуды акустической эмиссии и интенсивности ЭМЭ составила 0.96;
- корреляция сейсмической энергии и параметров ЭМЭ составила 0.42.

Время местное	Х	Y	Ζ	Привязка к месту	Энергия
26.04.2015 12:06:08	12578	10873	-242	М.В.,ЮВУ бл.1, панель№3, гор -70:0м, Т.В.,СЗУ, бл.14, кам№1,гор-210	7,12E+07
26.04.2015 12:08:33	12561	10878	-221	СЗУ, орт 13-14, юг	5,07E+01
26.04.2015 12:09:08	12533	10877	-266	СЗУ, юг, ств.11-12 орт	2,18E+03
26.04.2015 12:09:21	12575	10875	-271	СЗУ, юг, ств.12-13 орт	1,10E+04
26.04.2015 12:17:54	12561	10898	-232	СЗУ, юг, ств.14 орт	5,32E+02
26.04.2015 12:27:58	12584	10824	-284	СЗУ, орт 13-14, юг	1,18E+03
26.04.2015 12:27:58	12617	10854	-297	СЗУ, орт 13-14, юг	1,00E+05
26.04.2015 12:28:10	12580	10885	-294	СЗУ, юг, ств.13 орт	4,03E+01
26.04.2015 12:45:24	12585	10844	-243	СЗУ, орт 13, юг	4,69E+03
26.04.2015 15:00:35	12532	10874	-302	СЗУ, юг, ств.11-12 орт	1,30E+01
26.04.2015 15:00:38	12591	10796	-302	СЗУ, орт 11, юг	5,52E+03
26.04.2015 15:44:40	12613	10799	-270	СЗУ, орт 11-12, юг	2,18E+03

Таблица 5.2 – Сейсмическая активность в шахте Таштагольского месторождения 26 апреля 2015 года в интервале времени с 12:06:08 по период с по 15:44:40

Анализируя полученные данные по корреляции выделившейся сейсмической энергии, амплитудно-частотных параметров ЭМЭ и амплитуды акустической эмиссии можно сказать, что невысокая корреляция сейсмической энергии и параметров ЭМЭ, соответствующая значению 0.4, обусловлена пространственными особенностями происходящих геодинамических событий, условиями приема и возможностями регистратора. Во-первых, электромагнитные датчики имеют определенную диаграмму направленности. Уверенно регистрируется прибором РЕМС1 электромагнитная эмиссия только от тех спровоцированных взрывом геодинамических проявления в массиве, которые попадают в диаграмму направленности приема электромагнитных датчиков. Во-вторых, массив горных пород, разделяющий место установки регистраторов РЕМС1 и взрываемого блока неоднороден и сложен породами с разной проводимостью, имеются тектонические трещины, контакты пород, а значит происходит ослабление электромагнитного сигнала. В-третьих, нарастание электромагнитной эмиссии горных пород массива, как правило, происходит до прохождения толчков, землетрясений и вывалов большой массы. Все эти три особенности проявления геодинамических событий и являются причиной низкого коэффициента корреляции. Двумя первыми причинами объясняется и не высокая корреляция сейсмической энергии и амплитуды акустической эмиссии. При этом корреляция амплитуды акустической эмиссии и интенсивности ЭМЭ достаточно высокая и составила 0.96. Это объясняется тем, что акустический датчик находился рядом с электромагнитным, а значит регистрировались все динамические проявления в

окрестности регистраторов PEMC1 и в направлении диаграммы направленности приема датчиков.

В период с 26 августа по 03 сентября 2015 года при исследовании в Таштагольском руднике регистратор РЕМС1 №2 был установлен на горизонте минус 210 (660 м от дневной поверхности) в орте 2 на границе руды и дайки. Датчик ДИП помещен в скважине, т.к. в районе установки регистратора наблюдалась повышенная влажность бортов выработки. При скважину его помещении индукционного датчика В преимущественный прием электромагнитных сигналов направлен вдоль бортов выработки, в которой устанавливался регистратор, а также в узкой полосе диаграммы направленности с торца датчика вглубь массива горных пород. Массовый взрыв произведен 31 августа 2016 года в 4 блоке между горизонтами минус 140 и минус 210. Масса взрывчатого вещества составила 169.7 тонн. При взрыве выделилась энергия 2·10⁸ Дж. На рисунке 5.22 приведены временные изменения электромагнитной активности по каналам 2 кГц, 100 кГц, широкой полосе (1-100) кГц, интенсивности электромагнитной и акустической эмиссий, зарегистрированные в период времени от 8 до 23 часов по Кемеровскому времени. Из рисунка видно, что в отличие от измерений, проведенных в апреле, амплитуда ЭМС на частоте 100 кГц и в широкой полосе (1-100 кГц) после взрыва снизилась. В это же время наблюдается большое количество событий, зарегистрированных каналом АЭ. По данным сейсмостанции Таштагол за первый час зафиксировано 44 события. Минимальные значения амплитуды ЭМС наблюдались в течение 7 часов, а затем наблюдается некоторое повышение. В 18 часов 30 минут происходит толчок энергией 5,5·10¹ Дж, зафиксированный сейсмостанцией и зарегистрированный по каналу АЭ. В этот же момент времени по всем каналам PEMC1 наблюдается резкое увеличение амплитуды ЭМЭ. Проведенный расчет корреляции по Пирсону показал, что:

- корреляция между классом произошедшего после взрыва события и интенсивностью ЭМЭ составила - 0.96;

- корреляция между классом произошедшего после взрыва события и интенсивностью акустической эмиссии – 0.89;

- корреляция между классом произошедшего после взрыва события и усредненной за 5 сек амплитудой ЭМЭ в широкой полосе частот – 0.94;

- корреляция между классом произошедшего после взрыва события и усредненной за 5 сек амплитудой ЭМЭ на частоте 100 кГц – 0.93;

- корреляция между классом произошедшего после взрыва события и усредненной за 5 сек амплитудой ЭМЭ на частоте 2 кГц – 0.93;

- корреляция между интенсивностью ЭМЭ и интенсивностью акустической эмиссии – 0.74.

На рисунке 5.37 приведены зависимости, подтверждающие высокую корреляцию между классом сейсмического события, интенсивностью электромагнитной эмиссии и интенсивностью акустической эмиссии после массового взрыва. Приведенные выше значения коэффициентов корреляции возможны при близком расстоянии, в пределах 100 метров, произошедших геодинамических событий от расположения принимающего датчика ДИП и нахождении этих источников в поле диаграммы направленности датчика. Именно такое местоположение сейсмических событий зафиксировано Таштагольской сейсмостанцией.



Рисунок 5.37 – Зависимости энергии сейсмических событий и амплитуды электромагнитной и акустической эмиссий после массового взрыва в шахте Таштагольского месторождения 31 августа 2016 года

Еще один пример развития сейсмичности в шахте Таштагольского месторождения приведен на рисунках 5.38 и 5.39. На рисунке в виде горизонтальной и вертикальной проекций приведены сейсмические события 05 февраля 2017 года после массового технологического взрыва 82.87 тонн ВВ для подрыва блока 12 в восточном участке горизонта минус 350. На рисунке 5.40 представлен план расположения взрываемого слоя блока 12 по отношению к установленным регистраторам. Эквивалент динамики массива горных пород составил 192 тонны ВВ. Сейсмические события имели разный класс от 6.5 до 1.0. Сам взрыв имел класс 7.33. Проекция предоставлена по данным сейсмической службы Таштагольской сейсмостанции начальником участка №16 (ППГУ) Таштагольской шахты В.А. Штирцем.



Сейсмические события 05-06 февраля 2017 года Взрыв 82.87 тонн, блок 12, восточный участок горизонта минус 350

Рисунок 5.38 – Горизонтальная проекция места технологического взрыва и последующих геодинамических событий 05 февраля 2017 года



Рисунок 5.39 – Вертикальная проекция места технологического взрыва и последующих геодинамических событий 05 февраля 2017 года



Рисунок 5.40 – План горизонта минус 350 с взрываемым 05 февраля 2017 года блоком 12 (слой 2) и местом расположения регистраторов ЭМЭ и АЭ. Масштаб 1:500

На рисунке 5.41 приведена вертикальная проекция этого же массового технологического взрыва, взрываемого блока 12 между горизонтами минус 280 и минус 350.

На рисунках 5.38 и 5.39 показано, что события класса 6.5–2.0 находятся вблизи места взрыва и под горизонтом минус 350. После взрыва блока геодинамические события во времени распределились в соответствие с данными, приведенными на рисунке 5.41. На нем видно, что после взрыва в первые 5-6 минут происходит большое количество событий. Затем их количество уменьшается, а в 16 часов 17 минут 42 секунды между горизонтами минус 280 и минус 350 на расстоянии около 100 метров от взрыва происходит сейсмическое событие с энергией 3.98·10⁶ Дж. Этот толчок снизил напряженно-деформированное состояние массива и, соответственно, уменьшил количество сейсмических проявлений.



Рисунок 5.41 – Распределение во времени геодинамических событий и их класса после массового технологического взрыва 05 февраля 2017 года

На рисунке 5.42 отображена спектрограмма электромагнитной эмиссии в частотном диапазоне (1-100) кГц после технологического взрыва 05 февраля 2017 года в период с 12 часов до 21 часа по Кемеровскому времени.



Рисунок 5.42 – Спектрограмма электромагнитной эмиссии в частотном диапазоне (1-100) кГц

Данные сейсмостанции «Таштагольская» с 12 часов 05 февраля 2017 года приведены в Приложении 1. На рисунке 5.43 представлен общий вид распределения амплитуд электромагнитной эмиссии во времени с 12 до 21 часа на частотах 3 кГц и 13 кГц



Рисунок 5.43 – Общий вид распределения амплитуд электромагнитной эмиссии во времени с 12 до 21 часа на частотах 3 кГц и 13 кГц

На рисунке 5.44 масштаб по амплитуде ЭМЭ увеличен в 11 раз. Здесь показано распределение амплитуд ЭМЭ в этот же промежуток времени на выбранных частотах 3 кГц и 13 кГц.



Рисунок 5.44 – Распределение амплитуд электромагнитной эмиссии во времени с 12 до 21 часа на частотах 3 кГц и 13 кГц. Увеличенный в 11 раз масштаб по амплитуде

На рисунке видно, что после взрыва наблюдается высокая активность ЭМЭ на низкой частоте, что соответствует образованию трещин протяженностью около метра. Перед геодинамическим событием наблюдалась повышенная активность ЭМЭ на частотах и 3 кГц и 13 кГц, что говорит об усиленном трещинообразовании разной длины.

Момент события с энергией 3.98·10⁶ Дж отметился высокой амплитудой ЭМЭ по всем частотам (рисунок 5.41). Как показано на рисунках 5.43 и 5.44 большая амплитуда ЭМЭ наблюдалась с 16 часов 42 минуту по 16 часов 59 минут. По данным сейсмической станции «Таштагол» эти амплитуды могут быть привязаны к толчкам со значительно меньшей энергией 1.25·10² Дж и 6.52·10¹ Дж. Повышенная амплитуда ЭМЭ может быть обусловлена более близким расстоянием геодинамических событий до регистраторов и диаграммой направленности принимающих датчиков.

Таким образом, проведенные натурные исследования показали, что объективно существует связь между сейсмическими событиями в шахтном поле рудника, электромагнитной и акустической эмиссией горных пород как накануне события, так и в момент времени его прохождения. Более того, сейсмические наблюдения не отслеживают процессы, которые могут происходить с небольшой энергией в процессе релаксации породного массива.

При проведении мониторинга выявлено, что все сейсмические события зарегистрированы прибором PEMAC по интенсивности электромагнитной и акустической эмиссий. В районе шахтного поля, где проводился мониторинг, зарегистрированы изменения ЭMC, которые связаны с формированием деструктивных зон в исследованных участках. Проведенные натурные исследования показали, что выбранный при проектировании автономных регистраторов диапазон частот от 1.0 до 100 кГц для мониторинга образования деструктивных зон и развития геодинамических событий в шахтном поле рудника с прочными и упругими горными породами является наиболее информативным и достаточным.

5.5. Моделирование медленно изменяющихся амплитудных параметров электромагнитной эмиссии

В разделе 5.2.1 показаны медленно изменяющиеся амплитудные характеристики ЭМЭ длящиеся десятки часов, а в разделе 5.4. на рисунках показаны частичные в течение единиц часов увеличение амплитуды ЭМЭ с резким подъемом и спадом. На рисунке 5.16 приведены наблюдения медленного возрастания амплитуды с резким ее уменьшением до фонового значения с последующим значительно меньшим подъемом и понижением. Все эти данные получены в результате мониторинга параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии массивов горных пород после технологических взрывов большой

288
мощности с массой от десятков до сотен тонн взрывчатого вещества в шахте Таштагольского рудника [218, 292]. Такие взрывы отдельных блоков горных пород используются в технологии добычи полезных ископаемых [345]. Прочные породы рудника накапливают большую потенциальную энергию, которая способствует развитию геодинамических событий разного класса, в том числе и событий с энергией до 10⁹ Дж. После технологических взрывов формирование и развитие геодинамических событий сжато во времени и пространстве, что отражается в большом количестве геодинамических проявлений, фиксируемых сейсмическими наблюдениями [183, 348]. В предыдущем разделе показано, что геодинамические события на Таштагольском месторождении концентрируются в окрестностях взрыва, как по горизонтали, так и по вертикали. При этом основное количество геодинамических проявлений наблюдается в течение 24–48 часов после взрывов. В период проведения очистных работ также наблюдаются геодинамические события, но их последовательность значительно реже по времени [33, 183, 349].

Натурные измерения ЭМЭ и акустических откликов на геодинамические события на Таштагольском месторождении, а также сейсмические наблюдения на различных глубинах после технологических взрывов показали связь параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ с изменениями напряженно-деформированного состояния породного массива. На такую же связь параметров электромагнитных сигналов и геодинамических явлений указано в работах [218, 292, 350, 351]. Проведенные модельные эксперименты в лабораторных условиях на образцах горных пород при нагружении одноосным сжатием подтвердили связь параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ с процессами развития разрушения, что отражено в главе 4 настоящей работы.

По характеристикам ЭМЭ и параметрам ЭМС выявлены три основных типа проявлений геодинамических событий. Первый тип подготовки и проявления геодинамических событий имеет длительность в течение секунд и минут. В этот период происходит быстрое нарастание и спад электромагнитной активности горных пород, фиксируемой по амплитуде ЭМЭ. Второй тип имеет продолжительность десятки минут с быстрым или более медленным нарастанием и резким спадом амплитуды ЭМЭ в регистрируемом частотном диапазоне. В этом случае спад амплитуды ЭМЭ может быть и медленным при отсутствии геодинамических проявлений, фиксируемых на сейсмограммах или пьезоэлектрическими приемниками. Третий тип проявления геодинамических событий длится в течение единиц и десятков часов с медленным нарастанием амплитуды ЭМЭ и ее медленным спадом [218, 292]. Многочисленные измерения характеристик ЭМЭ, проведенные в разные годы показали, что возможны и комплексные по длительности этапы подготовки и проявления геодинамических событий. Причем, после всех типов подготовки и прохождения геодинамических явлений, регистрируемые значения

характеристик ЭМЭ могут переходить на разные более низкие уровни в зависимости от степени разгрузки массива и наличия остаточных напряжений в нем.

На рисунке 89 приведен один из примеров медленных изменений в течение 24 часов интенсивности электромагнитного потока и акустической эмиссии, зарегистрированных во время и после проведения технологического взрыва на Таштагольском руднике в блоке №6 между горизонтами минус 140 и минус 210. Глубина залегания горизонтов 590 и 660 метров, соответственно. Здесь измерения проводились непрерывно в течение 2,7 суток с помощью регистратора РЭМС1 [199]. Для уменьшения количества информационных данных регистрируемые интенсивность электромагнитного потока в диапазоне (1–100) кГц и амплитудные характеристики ЭМЭ в интервалах с добротностью не более 5 с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц, а также в широкой полосе (1–100) кГц усреднялись автоматически каждые 5 секунд. Параллельно с помощью пьезоэлектрического датчика измерялась интенсивность акустической эмиссии горных пород. При этом конусный наконечник пьезоэлектрического датчика забивали в горную породу не далее чем в 2 метрах от места расположения принимающего емкостного электромагнитного датчика.

На рисунке 89 видно, что интенсивность ЭМЭ после взрыва нарастает до определенных значений с медленным спадом через 3 часа. В дальнейшем идет медленное понижение уровня ЭМЭ. Через 15 часов после взрыва наблюдается снижение интенсивности ЭМЭ, продолжавшееся около часа, ниже уровня, зарегистрированного до момента взрыва. На ход этой зависимости оказывают влияния и импульсные изменения ЭМЭ, соответствующие измеренной интенсивности акустической эмиссии. Для уверенного выявления связей характеристик ЭМЭ и изменений НДС породного массива использовали пьезоэлектрические приемники с более высокой чувствительностью, чем у сейсмических датчиков.

Как показал комплексный анализ электромагнитной и акустической эмиссий, а также сейсмических данных наблюдений Таштагольской сейсмической станции, медленные изменения ЭМЭ не имели объективных физических объяснений, так как сейсмическая станция не фиксировала существенных геодинамических проявлений в этот период времени.

Для выявления причин таких изменений характеристик ЭМЭ было проведено физическое моделирование возбуждения электромагнитных сигналов в массиве горных пород Таштагольского рудника с использованием ударника специального пневматического устройства, разработанного в Институте горного дела СО РАН [352]. Исследования проводились на горизонте минус 350 (глубина 800 м) в орте 8. На этом последнем по глубине горизонте и на выше простирающемся горизонте минус 280 (глубина 730 м) в период проведения экспериментальных измерений буровые, очистные и строительные работы не велись. Используемое в эксперименте пневматическое ударное устройство развивало усилие около 90 Дж с частотой 1 Гц. Удары производили серийно. Количество ударов увеличивали от серии к серии. Измерения параметров ЭМС проводилось с помощью регистраторов РЭМС1 с усреднением амплитуды ЭМС равным 1 секунде и РЭМАС1 с усреднением амплитуды ЭМС равным 32 миллисекунд. Для приема сигналов использовались индукционные датчики ДИП. Регистраторы показали практически идентичные результаты. На рисунках 5.45 и 5.46 приведены отклики ЭМЭ на разную последовательность ударов пневматическим устройством. Поскольку время усреднения в регистраторах РЭМС1 не может быть меньше 1 секунды, а период ударов был не менее 1 секунды, то и результаты измерения амплитуд ЭМЭ и АЭ выглядят непрерывной кривой.



Рисунок 5.45 – Изменения во времени усредненных за одну секунду амплитуд ЭМЭ и АЭ при сериях ударов пневматическим ударником

На рисунке 5.45 показаны изменения усредненных за 1 секунду амплитуд ЭМЭ и АЭ при сериях ударов пневматическим ударником. Первые три пика получены при ударах в очищенную от мелкого щебня породу, а два последующих с сантиметровым слоем мелкого щебня (фракции до 10 мм). На рисунке 5.46 приведены измеренные тем же регистратором РЭМС1 электромагнитные отклики на более продолжительную серию ударов по горным породам.

Но наиболее точные измерения проведены с помощью регистратора РЭМАС1, так как усреднение амплитуд ЭМС велось за значительно более короткий промежуток в реальном режиме времени. На рисунке 5.47 приведены результаты измерения амплитуд электромагнитных откликов на частотах 1 и 13 кГц за 60 секунд ударов пневматическим ударником, а на рисунке 122 – за 430 ударов ударником того же устройства.



Рисунок 5.46 – Изменения амплитуды параметров ЭМЭ и АЭ при последующих сериях ударов пневматическим ударником



Рисунок 5.47 – Изменения амплитуды спектральных составляющих ЭМЭ горных пород на выбранных частотах при воздействии первой серии ударов в течение 60 с: 1 – 1 кГц; 2 – 13 кГц

Всего было произведено 8 серий ударов, продолжительность которых с четвертой серии дискретно увеличивалась. На рисунке 5.48 приведена последняя более длительная по времени последовательность серий ударов пневматическим ударником. Продолжительность этой серии ударов составляла 430 секунд.



Рисунок 5.48 — Фрагмент изменения амплитуды спектральных составляющих ЭМЭ горных пород на выбранных частотах при воздействии серии ударов пневматическим ударником в течение 430 с: 1 – 1 кГц; 2 – 13 кГц

При проведении экспериментов исследуемый массив горных пород находился в положении равновесия, то есть не происходило никаких других специальных технических и природных внешних механических воздействий. Совместный анализ результатов измерений амплитуд электромагнитной и акустической эмиссий, записанных регистраторами РЭМС1, и данных измерений амплитуд выбранных спектральных составляющих ЭМС горных пород, зарегистрированных РЭМАС1, при воздействии серий ударов показал их идентичность и очень важную закономерность.

Как видно из рисунков 5.46-5.48 в начале серии ударов амплитуда возбуждаемых электромагнитных сигналов возрастает по закону близкому к линейному. Затем происходит уменьшение усредненной амплитуды ЭМС до определенного значения и держится на всем временном диапазоне последующих ударов в серии. С большой вероятностью это связано с тем, что последующие периодические удары возбуждают акустические импульсы, которые вызывают вынужденные колебания двойных электрических слоев в горных породах. Рассмотрим этот случай детально.

В массив горных пород подавали детерминированные акустические сигналы в виде импульсного воздействия колоколообразной формы. Распространение акустических сигналов в твердотельных материалах, в том числе в горных породах, в одномерном приближении описывается следующими уравнениями акустики [251]:

$$\frac{du(x,t)}{dt} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = 0,$$
$$\frac{dp(x,t)}{dt} + \rho_0 a_0^2 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = 0.$$

Здесь u(x,t) — скорость смещения точек среды; p(x,t) — давление; ρ_0 — плотность; a_0 — скорость распространения ультразвука в среде.

Распределение давления P в упрощенном виде в точке на границах контактирующих минералов, слоев или на берегах трещин будет зависеть только от времени $f(t) = P(x_0, t)$. Результат воздействия этого возмущения на границу раздела можно описать уравнением

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = \lambda f(t),$$

где x – отклик динамической системы на возмущение, который является величиной, пропорциональной пространственной координате двойного электрического слоя, и соответствует отклонению слоя от положения равновесия; ω – резонансная частота колебаний динамической системы, находящаяся в диапазоне акустических частот; β – коэффициент демпфирования, отражающий затухание процесса; f(t) – импульсное акустическое воздействие в фиксированной точке, т. е. давление на границе раздела сред, где сосредоточены двойные слои; λ – коэффициент, влияющий только на амплитуду колебаний, который можно приравнять к единице. За счет волн отражения и преломления на границах блоков [353] массива горных пород, на контактах минералов и берегах трещин, возникает *n* импульсных функций $f_n(t)$ с разной амплитудой.

Резонансные частоты ω_n определяется размерами блоков, трещин, шириной границ раздела, углом наклона электрического или магнитного диполей по отношению к направлению падающей акустической волны. Поскольку динамическая система может входить в состояние резонанса при внешнем возмущении, каким является акустический сигнал, то при резонансной частоте ω_i относительный вклад в спектре регистрируемого ЭМС будет максимальным.

Коэффициент затухания в массиве горных пород β определяется "вязкостью" и упругостью системы. В спектре регистрируемого ЭМС величина β обусловлена шириной спектра. Чем уже спектр, тем меньше значение β и тем медленнее происходит затухание колебаний динамической системы. В месте проведения эксперимента значения коэффициента β достаточно велики и находятся в интервале $10^1 - 10^4$ с⁻¹ в зависимости от блочности массива горных пород и скорости звука в них [353, 354].

Следует отметить, характер вынужденных колебаний определяется и параметрами внешней силы, и свойствами возбуждаемых горных пород. В начале действия периодических импульсных внешних сил, какими являются удары с помощью пневмаустройства, характер колебаний горных пород изменяется со временем. Здесь еще колебания горных пород не являются упорядоченными. По происшествию некоторого времени в близлежащем возбуждаемом объеме горных пород формируются периодические вынужденные колебания с периодом равным частоте следования ударов, с одной стороны, а с другой - равной основным частотам возбуждающего акустического импульса. При этом возбуждаемый объем, за счет отражения от границ блоков горных пород [124], формирует дополнительный килогерцовый частотный диапазон акустических колебаний. Установление вынужденных колебаний в возбуждаемом объеме тем быстрее, чем больше коэффициент затухания колебаний β в этом объеме горных пород [355]. При начале возбуждения в части породного массива, ограниченного процессами затухания акустических импульсов в нем, одновременно возникают собственные и вынужденные колебания блоков горных пород. В начальный момент времени амплитуды их равны, но противоположны по фазе.

Затем по мере затухания собственных колебаний в объеме с теми параметрами возбуждения, которые представлены ранее, преимущественно остаются установившиеся вынужденные колебания. Поскольку в начальный период возбуждения горных пород с большой вероятностью существуют собственные колебания близкие по частоте с периодом ударов и основным частотам возникающих акустических импульсов, то переходной процесс, во время которого сосуществуют собственные и вынужденные колебания, может сопровождаться биениями амплитуды акустических колебаний [251]. Следует заметить, что поскольку возбуждающие акустические импульсы близки по амплитуде, то и установившиеся вынужденные колебания объема горных пород также будут близки по амплитуде. В результате под действием этих вынужденных колебаний происходят акустико-электромагнитные преобразования на границах минералов и слоев, на трещинах или на контактах различных минеральных включений, и генерируются электромагнитные отклики горных пород. Причем в начальный период времени, в соответствие с изменением амплитуды установившихся вынужденных колебаний, электромагнитные сигналы будут иметь более высокую амплитуду с последующим понижением ее до определенного уровня.

Модельные эксперименты, показавшие уменьшение амплитуды ЭМЭ от последующих ударов, равных по энергии первоначальным ударам, позволили объяснить явление плавного изменения параметров электромагнитной эмиссии после некоторых мощных технологических взрывов. Примеры приведены выше на рисунках 85 и 89. Надо заметить, что такие изменения хода амплитуды ЭМЭ в период релаксации породного массива после технологических взрывов

295

большой мощности наблюдались не каждый раз. На рисунке кроме плавных изменений наблюдаются и пиковые изменения ЭМЭ. Это указывает на то, что после взрыва происходит медленное сдвижение массива горных пород с разной скоростью и с перераспределением НДС по разломам и другим плоскостям скольжения [356]. Пиковые значения амплитуды ЭМЭ отображают наиболее мощные по энергии сколы при перемещении породной массы или ускоренное их сдвижение в этот промежуток времени.

Мониторинг таких сдвижений массива горных пород на Таштагольском руднике выполняется постоянно по изменению расстояний между реперами, закрепленных в массиве горных пород и выходящих в свободное пространство проходок разного назначения [181, 182]. Сдвижение массива горных пород сопровождается множественными механическими сколами, трещинообразованием и, соответственно, акустической эмиссией. В результате совокупности трения породных масс и трещинообразования при перемещении, а также воздействия возникающих акустических сигналов на двойные электрические слои, всегда присутствующих в горных породах, появляются электромагнитные отклики, амплитуда которых изменяется плавно на определенном уровне значений в соответствие с энергией механического воздействия. На это и указывают результаты физического моделирования при воздействии на массив низкоэнергетическими ударами. Появление акустических и электромагнитных сигналов большой амплитуды (рисунок 5.15) обусловлено нарушениями сплошности массива с повышенной запасенной энергией.

Для подтверждения возникновения и изменения параметров ЭМС при трении и скольжении горных пород в массиве проведено моделирование трения в лабораторных условиях с использованием разнородных блоков горных пород. Неподвижным блоком был выбран монолитный образец среднезернистого розово-красного гранита размером ($0.9 \times 0.4 \times 0.2$) м³, одна из сторон которого имеет плоскую нешлифованную поверхность. Твердость гранита соответствует семи по шкале твердости Мооса. В качестве второго блока использовали образец калиевого полевого шпата размером ($0.09 \times 0.07 \times 0.03$) м³, имеющего твердость близкую к шести по шкале твердости Мооса, в качестве второго блока использовали образец калиевого полевого шпата размером ($0.09 \times 0.07 \times 0.03$) м³, имеющего твердость близкую к шести по шкале твердости Мооса, который являлся подвижным элементом при трении между поверхностиями блоков. На рисунке 5.49 приведена характерная зависимость изменения интенсивности электромагнитных сигналов при трении образцов калиевого полевого шпата и гранита. Циклическое трение производили с частотой 2 Гц в течение 60 секунд на 25 сантиметрах поверхности гранита, перед этим не участвующей в процессе трения. Эксперимент с трением блоков гранита и калиевого полевого шпата повторялся 5 раз с перерывами не менее 10 минут. Интенсивность ЭМС записывали во встроенную память регистратора РЭМС1 с усреднением данных мониторинга за 1 секунду. Средний разброс данных измерений в пяти

проведенных экспериментах составил не более 14%. На рисунке видно, что в начале производимого трения амплитуда интенсивности ЭМС возрастает на 35 имп/с.



Рисунок 5.49 – Изменения интенсивности электромагнитных сигналов при трении образца калиевого полевого шпата о гранит

В интервале времени от 10 до 15 секунд возрастает на 100 имп/с. После 15 секунды количество импульсов плавно уменьшается и устанавливается практически на одном уровне после 25 секунды. Здесь возрастание и спад интенсивности ЭМС обусловлен хрупким выкашиванием, скалыванием, смятием и срезанием частиц на поверхности блока калиевого полевого шпата, поскольку его твердость меньше, чем у гранита. Некоторое понижение уровня интенсивности ЭМС относительно первоначального с большой вероятностью вызвано уменьшением количества неровностей на трущейся поверхности блока калиевого шпата.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что многократные низкоэнергетические серии ударов в массиве горных пород возбуждают первоначально электромагнитные сигналы с повышенной амплитудой с последующим ее снижением до одного установившегося уровня. Такие же серии низкоэнергетических ударов возникают в результате совокупности сколов и трещинообразования при перемещении массива горных пород по плоскостям скольжения и разломам. В результате такой совокупности, а также воздействия возникающих акустических сигналов на двойные электрические слои появляются электромагнитные отклики горных пород массива, амплитуда которых изменяется плавно на определенном уровне значений в соответствие с энергией, выделяющейся при сдвижении массива горных пород.

5.6. Выводы по главе 5

В результате проведенных исследований электромагнитной эмиссии в шахтном поле Таштагольского железорудного месторождения электромагнитной эмиссии массива горных пород установлено:

1. Деформирование массива горных пород при изменении его напряжённого состояния практически всегда сопровождается и изменениями параметров и характеристик электромагнитного поля. Следствием этого являются механоэлектрические преобразования, сопровождающиеся импульсными электромагнитными сигналами и электромагнитной эмиссией, параметры и характеристики которых зависят от изменений НДС массива горных пород.

2. Атмосферное электричество не оказывает заметного влияния на суточный ход электромагнитной эмиссии массива горных пород в рудных шахтах глубиной более 300 метров.

3. Мониторинг изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород во времени по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии предпочтительно вести на дайках, трещинах, других тектонических нарушениях и контактах пород, имеющих выход на разломы, зоны смещения и смятия, а также в места проведения технологических взрывов и ведения очистных работ.

4. Характеристики инфракрасного свечения скважин изменяются в соответствие с процессами подготовки разрушения горных пород, находящихся в меняющемся или действующем напряженно-деформированном состоянии горного массива. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию, наряду с электромагнитным профилированием, для определения мест с высоким НДС массива горных пород, а также выявлять места установки регистраторов электромагнитных сигналов.

5. Выявление участков породного массива, находящихся в повышенном напряженнодеформированном состоянии, позволит существенно снизить количество используемых регистраторов электромагнитных сигналов. Это повысит эффективность прогноза развития и проявления геодинамических событий после технологических взрывов в массиве горных пород и при проведении очистных работ.

6. При использовании метода мониторинга возникновения и развитии деструктивных зон и геодинамических проявлений по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии необходимо учитывать электрические и магнитные свойства горных пород, а также их удельную проводимость. Сравнение параметров и характеристик ЭМЭ, полученных при помощи емкостных и индукционных датчиков, показало, что индукционные датчики наиболее целесообразно устанавливать в массиве, сложенном магнетитовой рудой, обладающей магнитными свойствами и высокой проводимостью. Емкостные датчики эффективно устанавливать во вмещающих руду породах, характеризующихся высоким удельным электрическим сопротивлением.

7. Изменения характеристик электромагнитной эмиссии, возникающей вследствие механоэлектрических преобразований в горных породах, отображают изменения напряженно - деформированного состояния породного массива. Измерения интенсивности и амплитуды ЭМЭ горных пород в условиях шахт позволяет определять реальные времена подготовки геодинамических событий и их проявления, а также выявлять особенности перераспределения НДС массива. Знание этих особенностей позволит правильно и эффективно осуществлять управлением разгрузкой массива горных пород с целью профилактики безопасного ведения разведочных, проходческих, очистных и строительных работ.

8. Выявлено три основных временных процессов изменения НДС после взрыва, которые проходят в течение секунд, минут и часов. Первое из них это взрывное изменение НДС горного массива в течение первых двух десятков секунд и прохождение «горного удара» с задержкой в течение десятков секунд. Затем последующая в течение нескольких минут релаксация возбужденного состояния массива после «горного удара». В отсутствии «горного удара» релаксация может продолжаться в течение нескольких смещений и проявлений, которое может длиться во времени до 17 и более часов. При этом нарастание возбужденного состояния в течение 1-2 часов с возвратом в течение часа в относительно устойчивое состояние на новом стабилизированном уровне.

9. Результаты исследований и совместного анализа электромагнитной и акустической эмиссии горных пород, спектральных параметров электромагнитных сигналов, данных сейсмических наблюдений до технологических взрывов, в период их проведения и при релаксации породного массива в разные времена года показали связь изменений напряженнодеформированного состояния породного массива, характеристик и параметров ЭМЭ горных пород.

10. Из результатов наблюдений следует, что по амплитудно-частотным параметрам электромагнитных сигналов горных пород можно судить о развитии трещинообразования и, соответственно, о развитии деструктивных зон и динамике массива.

11. Сезонные измерения с целью изучения влияния влажности на показатели электромагнитной активности в шахтном поле Таштагольского месторождения в период релаксации породного массива показали, что на характеристики регистрируемой электромагнитной эмиссии влажность в шахтном поле рудника оказывает влияние в большей степени по электрической составляющей электромагнитного поля и в меньшей степени на показания по индукционной составляющей.

12. Для объективного представления об изменении напряженно-деформированного состояния массива, образования деструктивных зон и их развития, проявления геодинамических событий по характеристикам электромагнитной эмиссии важным является расположение зон и центров событий по отношению к месту нахождения регистраторов ЭМЭ.

13. Проведенные натурные исследования показали, что объективно существует связь между сейсмическими событиями в шахтном поле рудника, электромагнитной и акустической эмиссией горных пород как накануне события, так и в момент времени его прохождения. В районах шахтного поля, где проводился мониторинг, зарегистрированы изменения ЭМС, которые связаны с формированием деструктивных зон в исследуемых участках.

14. При проведении мониторинга выявлено, что все сейсмические события фиксируются приборами РЭМС1 и РЕМАС1 по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий.

15. Проведенные натурные исследования показали, что выбранный при проектировании автономных регистраторов диапазон частот от 1.0 до 100 кГц для мониторинга образования деструктивных зон и развития геодинамических событий в шахтном поле рудника с прочными и упругими горными породами является наиболее информативным и достаточным.

16. Модельные эксперименты, показавшие уменьшение амплитуды ЭМЭ от последующих ударов, равных по энергии первоначальным ударам, позволили объяснить явление плавного изменения параметров электромагнитной эмиссии после некоторых мощных технологических взрывов. Это указывает на то, что после взрыва происходит медленное сдвижение массива горных пород с разной скоростью и с перераспределением НДС по разломам и другим плоскостям скольжения. Наблюдающиеся пиковые значения амплитуды ЭМЭ отображают наиболее мощные по энергии сколы при перемещении породной массы или ускоренное их сдвижение в этот промежуток времени.

300

Глава 6. Комплексная система мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий, включая инфракрасное свечение скважин

В предыдущих главах проведены теоретические, лабораторные и натурные экспериментальные исследования. Результаты этих исследований положены в качестве физических основ для разработки и создания комплексной система мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий, включая инфракрасную радиографию скважин или контактов горных пород. Надо заметить, что для шахт, сложенных прочными породами и способными накапливать энергию до 10⁹ Дж параметры ЭМС и характеристики ЭМЭ будут отличаться по амплитудно-частотным и временным параметрам ЭМЭ от менее прочных горных пород, например, от пород в угольных шахтах. Поэтому создание в них систем мониторинга развития динамических проявлений по параметрам и характеристикам ЭМЭ требует дополнительных исследований.

6.1. Обобщенная схема механоэлектрических преобразований в горных породах на этапах подготовки разрушения

На основании полученных результатов при математическом моделировании и проведенных лабораторных и натурных экспериментов на модельных образцах и образцах горных пород, являющихся сложными гетерогенными материалами, предложена следующая физическая модель механоэлектрических преобразований.

Остановимся на механическом воздействии на исследуемые материалы, характеризующемся как одноосное сжатие. Поскольку это самое простое и воспроизводимое воздействие на материалы. Растяжение отличается от процесса сжатия только первым этапом, при прохождении которого происходит уплотнение подверженных силовому нагружению материалов вдоль направления приложения силы. Сдвиговое воздействие является суммарным процессом, обусловленным напряжениями сжатия и растяжения.

В качестве механоэлектрических преобразователей будем рассматривать двойные электрические слои, которыми являются контакты минералов, входящих в горную породу, границы слоистости и блоков горной породы, границы объемных дефектов и трещин, как существующих, так и образующихся в процессе изменения напряженно-деформированного состояния гетерогенных материалов и горных пород. Следует заметить, что образование таких двойных электрических слоев может эффективно происходить только в диэлектрических материалах, какими является большинство горных пород. При наличии включений из минералов с повышенной проводимостью изолированных вмещающими диэлектрическими породами, такими как, например, магнетит, на их границах также образуются двойные электрические слои. Это может быть обусловлено разной работой выхода электронов в контактирующих материалах, движением дислокаций с окружающими ее точечными дефектами в направлениях из зоны сжатия в зону разгрузки, разделением заряда при образовании трещин и другими процессами. Кроме того, механоэлектрические преобразования происходят на сегнетоэлектрических минералах за счет прямого пьезоэлектрического эффекта, при перемещении минерализованной воды в микротрещинах, за счет перемещения заряда в устье развивающейся трещины. Возможны и другие механизмы механоэлектрических преобразований, например, с участием изменяющихся электрического и магнитного полей. Результаты математических расчетов и лабораторных экспериментальных исследований приведены выше в главе 4 настоящей работы.

В общем виде в сложных гетерогенных материалах, какими являются горные породы, процесс механоэлектрических преобразований происходит в соответствие с этапами подготовки разрушения.

При одноосном сжатии образца на первом этапе происходит уплотнение материала. В результате схлопывания имеющихся объемных дефектов на сжимаемой поверхности и вблизи нее, а также за счет трения возникают акустические импульсы, взаимодействие которых с двойными электрическими слоями или сегнетоэлектрическими минералами (прямой пьезоэлектрический эффект) приводит к возникновению электромагнитных сигналов.

Второй этап характеризуется образованием деструктивной зоны, длительность которой во времени будет определяться скоростью изменения силы сжатия, прочностью отдельных минералов, входящих в состав породы, и структурно-текстурными особенностями образцов. На этом этапе при достижении текущих значений механических напряжений P_{mex} , превышающих прочность отдельных минералов (материалов) или их контактов, происходит прорастание микротрещин. Образование микротрещин сопровождается электромагнитными сигналами за счет перемещения заряда в устье трещины, а также акустическими импульсами, которые взаимодействуют с окружающими ее двойными электрическими слоями на имеющихся ранее дефектах и на вновь образовавшихся трещинах. При дальнейшем повышении механической нагрузки, в соответствие с кинетической теорией прочности [357, 358], происходит увеличение напряжений в устьях микротрещин с последующим перекрытием этих зон и соединением трещин, расположенных в зонах перекрытия напряжений. В результате также как и при образовании первичных микротрещин излучается два вида ЭМС, параметры которых характеризуются перемещением заряда в устьях соединяющихся трещин и взаимодействием

302

акустических импульсов с окружающими двойными электрическими слоями. Увеличение трещин может идти в несколько этапов до тех пор, пока для прорастания трещин отрыва потребуется создание значительных напряжений. В результате перед третьим этапом устанавливается спокойный отрезок, в течение которого регистрируются редкие ЭМС с пониженной частотой. Следует отметить, что при образовании деструктивной зоны должны наблюдаться и наблюдается в экспериментах расширение частотного диапазона ЭМС и их амплитуда. Причем увеличение амплитуды происходит в конце формирования зоны деструкции при прорастании трещин в более прочных минералах, составляющих горную породу.

На третьем этапе после относительного «затишья» начинают соединяться более крупные трещины. В результате возникают ЭМС и более длительные акустические импульсы, которые также как и на двух предыдущих этапах взаимодействуют с уже имеющейся дефектной структурой и с вновь увеличившимися заряженными трещинами. При этом длительность ЭМС и их амплитуда возрастают.

На четвертом этапе нагружения прорастают трещины отрыва, и наступает разрушение материала. Амплитуда ЭМС в этом случае максимальная, а частотный спектр находится в диапазоне 1-800 кГц.

Таким образом, при силовом нагружении гетерогенных материалов, в том числе таких сложных систем как горные породы, механоэлектрические преобразования происходят при участии акустических импульсов, возникающих при трещинообразовании на различных этапах подготовки и развития разрушения образцов. Возникновение электромагнитных сигналов происходит по следующим механизмам: при переносе заряда в устье трещин с дозвуковыми скоростями; при изменении дипольного момента двойных электрических слоев под действием акустических импульсов на контактах минералов или веществ, на бортах трещин, дефектов и блоков: при взаимодействии акустических импульсов с сегнетоэлектриками И минерализованной жидкостью. Частотные и амплитудные параметры возникающих ЭМС определяются размерами трещин, дефектов и блоков, степенью минерализации жидкости, акустическими и сегнетоэлектрическими свойствами минералов и веществ, входящих в гетерогенную систему материала или горной породы, их структурно-текстурными особенностями. На рисунке 6.1 представлена обобщенная схема механоэлектрических преобразований в гетерогенных диэлектрических структурах и горных породах на этапах подготовки их разрушения. Основными механизмами возбуждения ЭМС в этом обобщенном алгоритме являются рост трещин, перенос заряда, возникновение акустических импульсов и их взаимодействие с заряженными дефектами и сегнетоэлектрическими минералами, в том числе и с явными пьезоэлектриками. Такая же схема и основные механизмы возбуждения ЭМС действует и в массиве горных пород.



Рисунок 6.1 – Обобщенная схема основных механизмов возбуждения электромагнитных сигналов в горных породах

Отличительной чертой возникающих ЭМС в массиве горных пород является их существенно повышенный низкочастотный спектр, регистрируемый приборами РЭМС1 и РЭМАС1 в диапазоне от 1.0 до 5.0 кГц. Надо отметить, что процесс образования деструктивных зон зависит от структуры блоков в образцах и массиве горных пород. В первую очередь при повышении давления сжатия или другого типа нагрузок трещинообразование начинается в менее прочных минералах и горных породах. Дальнейшее повышение нагрузки приводит к процессу трещинообразования и в более прочных структурных составляющих. Поэтому процесс развития деструктивной зоны в горных породах может быть растянутым во времени, продолжительность которого зависит от скорости нагружения и прочности структурных составляющих горные.

Заметим, что при добыче руды в шахте добавляется еще внешнее акустическое воздействие на породный массив от работающих механизмов.

6.2. Разработка макета информационной системы для контроля и прогноза состояния горных массивов в процессе формирования и проявления геодинамических событий

Для непрерывной записи данных о параметрах и характеристиках ЭМЭ необходимо было разработать алгоритм автоматизации измерений и предварительной обработки данных. Поскольку разработка программного обеспечения велась параллельно с регистратором РЭМАС1, то для создания алгоритмов предварительной обработки использовались уже имеющиеся результаты измерений на Таштагольском руднике, полученные с помощью регистратора РЭМС1.

В главе 5 было показано, что регистрация электромагнитных и акустических сигналов до массового технологического взрыва, во время него и в период релаксации горного массива в шахте Таштагольского месторождения позволяла получать важную информацию о процессах предшествующих горным ударам. Эта информация способствовала разработке алгоритма метода, в основу которого положены механоэлектрические преобразования в горных породах. Так как в течение 3 суток, начиная за сутки до взрыва, не проводится никаких работ с использованием оборудования, то влияние электромагнитных шумов практически отсутствует.

Для наглядности на рисунке 6.2 представлены временные зависимости интенсивности и амплитуда электромагнитных сигналов в частотной полосе 1-100 кГц в шахте Таштагольского рудника. Данные получены в ноябре 2007 года при измерениях ЭМЭ на горизонте минус 280 (730 метров от дневной поверхности) в орте 27. Регистрировалась импульсная электрическая составляющая электромагнитного поля. Для этих целей при измерениях использовались ёмкостные датчики, подключенные к регистратору РЭМС1 по дифференциальной схеме. Время

усреднения количества поступающих на вход прибора ЭМС и их амплитуд составляло 5 секунд. На рисунке отмечены момент массового технологического взрыва, а также этапы подготовки горного удара и момент горного удара.

6.2.1. Взаимодействие программы с регистраторами РЭМАС1 по сети передачи данных

Для организации система взаимодействия сервера и регистраторов использовался коммуникационный протокол, который был создан с использованием клиент-серверной архитектуры *Modbus RTU*, разработанной фирмой *Modicon* [359]. Изначально протокол *Modbus RTU* был создан для работы с контроллерами, в которых применяется программируемая логика (*PLC*). В промышленности этот протокол стал стандартом, поэтому он был использовани и в создаваемом макете информационной системы взаимодействия регистраторов и удаленного ПК. При этом надо заметить, что при работе с архитектурой *Modbus* обычно используются для передачи регистрируемых данных связь через последовательные порты *RS*-485, *RS*-422, *RS*-232. Кроме того, могут быть использованы протоколы сетей *Transmission Control Protocol (TCP)* и *Internet Protocol (IP*). Как показано в работе [359] обычно совместимый последовательный интерфейс *RS*-232C используют в стандартных *Modbus*-портах.



Рисунок 6.2 – Временная зависимость усредненных за 5 секунд интенсивности и амплитуды электромагнитных сигналов в частотной полосе 1-100 кГц

При этом может быть использовано прямое соединение контроллеров или через модем. Модем здесь будет обеспечивать физическую адаптацию информационного сигнала со средой

его распространения. При соединении контроллеров может использоваться только технология с главным и подчиненными. В этом случае только главный контроллер может сделать запрос на передачу данных. Устройство на основе главного контроллера включает в себя ведущий процессор и панели программирования, а подчиненные устройства являются программируемыми контроллерами.

Главное устройство передает запрос на выполнение действий подчиненным, а те отвечают на этот запрос. При этом в сетях *Modbus* применяется два способа передачи данных *ASCII* или *RTU*. В *Modbus ASCII* (*American standard code for information interchange*) для обмена используются только символы, которым соответствуют числовые коды. В *Modbus RTU* применяется двоичный вариант. Сообщения разделяются по паузе в линии. Сообщение должно начинаться и заканчиваться интервалом тишины, длительностью не менее 3,5 символов при данной скорости передачи. При применении способа передачи для конфигурации каждого контроллера выбираются режимы передачи совместно с параметрами скорости передачи, режимом паритета и другими режимами.

Для РЭМАС1 хорошо подошел способ передачи *RTU*. Для понимания работы автоматизированной записи данных регистрации ЭМС необходимо представить общее описание протокола *Modbus RTU*. Выше уже говорилось о том, что протокол *Modbus* предполагает только одно запрашивающее устройство в информационной линии, которое передает требуемые команды ведомым устройствам по принадлежащим им адресам. Протокол позволяет направлять команды 247 устройствам по одной линии связи, составленной по стандарту *RS*-485. Иногда также используются и стандартные линии связи через *RS*-422 или *RS*-232. Запрос и ответ по протоколу *Modbus* строго фиксированы и приведены в Таблице 6.1.

Адрес ведомого устройства	Номер функции	Данные	CRC
1 байт	1 байт	N < 253 (байт)	2 байта

Таблица 6.1 – Кадр посылки Modbus RTU

При этом ведомые устройства отвечают только на запросы, поступившие в их адрес. Ответ ведомого устройства также начинается со своего адреса, который может находиться в пределах от 1 до 254. Для широковещательной передачи всем ведомым устройствам используется код 0. Номер функции говорит ведомому устройству о необходимых действиях или передаче тех данных, о которых запрашивает ведущее устройство. Поле «Данные» содержит информацию о выполняемой функции, заданной ведущим устройством, или содержит данные, передаваемые ведомым устройством в ответ на запрос. В этом случае длина и формат этого поля зависит от нумерации заданной функции. В конце таблицы приводится заключительное двухбайтное поле кадра. Эта контрольная сумма применяется для проверки отсутствия ошибок в кадре посылки *Modbus RTU*.

При обмене данными могут возникать ошибки, связанные с искажениями при передаче данных, а также логические ошибки. В работе [359] подробно изложены системы обнаружения ошибок при помощи фреймов символов, контроля чётности и циклической контрольной суммы при искажении данных или с помощью соответствующих протоколов в случае логических ошибок. Программа обмена должна работать со всеми доступными данными, полученными с приборов-регистраторов и измерительного комплекса на основе платы АЦП. На рисунке 6.3 представлена *UML*-диаграмма классов, реализующих хранение и преобразование данных в программе [359]. Все данные могут быть представлены во временной или частотной области. Это разделение осуществляют классы *CTDSignal* и *CFDSignal* – сигнал во временной и частотной области соответственно. Оба класса наследованы от базового класса *CSignal*, хранящего массив значений сигнала. Сигнал во временной области хранит массив временных отсчетов с заданным периодом дискретизации, либо есть возможность загрузить произвольный массив данных. Аналогично сигнал в частотной области имеет массив отсчетов с заданным шагом по частоте.

Зарегистрированные с помощью измерительного комплекса временные отсчеты электромагнитного сигнала является наиболее полным источником информации, потому что по нему можно получить среднюю амплитуду сигнала в определенной полосе частот и частоту импульсов сигнала. Исходный электромагнитный сигнал хранится в классе *CTDEMSignal*. Как видно из схемы, из него можно получить отдельные спектральные составляющие сигнала (класс *CFDEMSignalFFT*), применить к сигналу цифровую фильтрацию (класс *CTDEMDigitalFiltering*), подсчитать энергию и частоту импульсов сигнала. Параметры акустического сигнала в данных представлены в виде энергии сигнала (класс *CTDEnrgSignal*).

На вход программы данные могут поступать от двух источников: из текстовых табличных файлов; от приборов-регистраторов, подключенных к компьютеру, на котором установлено ПО «DungeonKeeper».

Алгоритм чтение текстовых табличных данных следующий. Прибор, в процессе измерения параметров электромагнитных и акустических сигналов, записывает измеренные данные во флэш-память. При этом он использует сложный формат записи в бинарные файлы. Это сделано, для того чтобы уменьшить размер хранящихся в памяти данных и увеличить скорость записи. Поэтому такие «сырые» данные требуется сначала преобразовать в удобный для использования в программе формат. Для этого была разработана утилита для осуществления преобразования файлов. Входные файлы представляют собой бинарные файлы с расширением *.09d.



Рисунок 6.3 – UML-диаграмма классов для хранения данных [359]

Структура имени файла следующая:



В начале каждого файла содержится заголовок, включающий информацию о названии прибора, его версии, версии формата файла, заголовки столбцов данных, дату время начала измерения (создание файла), маска частот, на которых проводится измерения.

Файл состоит из 2-х частей: заголовок с описанием параметров измеряемых данных и основная часть, содержащая данные измерения значений амплитуды на выделенных в заголовке частотах, частота импульсов, энергия сигнала электромагнитной эмиссии, а также, вставки измерений энергии сигнала акустической эмиссии, и вставки логов.

В структуре заголовка содержатся: имя прибора или его версия; *FileFormat* – версия формата файла; *Date* – дата создания файла; *Time* – время создания файла; *ColumnsOrder* – порядок записи данных в столбцах; *Bands* – строка частот; *NumOfRecord* – число записей; *eoc* – конец.

Строка флагов частот содержит последовательность символов '0' и '1'. Если позиция в строке занята символом '1', то соответствующая номеру позиции частота приведена в данных.

Все данные измерений, представленные в основной части файла, двухбайтовые. Порядок данных определяется значением строки *ColumnsOrder*. В ней записываются идентификаторы данных, разделенные вертикальной чертой. Для обозначения типов данных введены следующие обозначения:

• *F* - *N* столбцов значений амплитуд частот электромагнитного сигнала, в соответствии со строкой Bands;

• *NEME* – частота импульсов электромагнитного сигнала;

• ЕМЕ – энергия электромагнитного сигнала.

В целях оптимизации, значения параметров акустической эмиссии записываются в этот же файл в виде вставок тегов *«BeginAcoust» «EndAcoust»*, между которыми записываются значения энергии сигнала акустической эмиссии. Также, в виде тегов *«BeginLog» «EndLog»* вставляются логи с событиями.

После преобразования входного файла создаются 5 файлов с данными:

1) Файл описания (по умолчанию, <ИМЯ ИСХОДНОГО ФАЙЛА>.*remas*) со структурой приведенной выше. Переменная *ColumnsOrder* содержит строку – последовательность типов столбцов данных, содержащихся в выходной *ASCII*-таблице.

2) Бинарный файл с параметрами электромагнитного сигнала <ИМЯ ФАЙЛА ОПИСАНИЯ>_*em.dat*. Запись данных производится в том же формате, что и в исходном файле.

310

3) Бинарный файл с параметрами акустического сигнала <ИМЯ ФАЙЛА ОПИСАНИЯ>_*ae.dat*. В файл записывается содержимое между тегами <BeginAE><EndAE>.

4) Текстовый файл с логами <ИМЯ ФАЙЛА ОПИСАНИЯ>_logs.txt. В файл записывается содержимое между тегами *BeginLog><EndLog>*.

5) Выходной файл в виде *ASCII*-таблицы со столбцами параметров электромагнитного и акустического сигналов <ИМЯ ФАЙЛА ОПИСАНИЯ>.*txt*.

Загрузка данных, измеренных прибором РЭМАС-1 и измерительным комплексом на основе платы АЦП *Lan4-USB*, также производится с текстовых табличных файлов. Эти данные уже представлены в виде текстовых табличных файлов, поэтому не требуют конвертирования. Но необходимо к каждому файлу создать текстовый файл описания по типу файлов описания, создаваемых конвертором. Специально для этого введены дополнительные идентификаторы типов столбцов данных. Приведем полный список всех допустимых идентификаторов:

• *F* - *N* столбцов значений амплитуд частот электромагнитного сигнала, в соответствии со строкой Bands;

• *F[start]-[stop]* – значение амплитуды в полосе частот, [*start*] и [*stop*] необходимо заменить значениями стартовой и стоповой частоты полосы в кГц;

• *NEME* – частота импульсов электромагнитного сигнала;

• ЕМЕ – энергия электромагнитного сигнала;

• *EMS* – значения амплитуды электромагнитного сигнала, регистрируемого измерительным комплексом;

• *АЕ* – энергия акустического сигнала.

Программа считывает файл описания, разбирает его, потом находит соответствующий текстовый файл со столбцами данных.

Для тестирования работы сервера опроса были разработаны эмуляторы в виде клиентских приложений, взаимодействующих с сервером через последовательный интерфейс.

Основные настройки СОМ-порта:

• скорость передачи данных;

• контроль четности;

• номер *СОМ*-порта;

• стоповые биты;

• количество битов в символе.

После подключения в линию сервер в отдельном потоке посылает запрос всем приборам для инициализации предустановленной структуры запроса. При этом производится преобразование данных запроса в байтовый массив, и формируются пакеты по 256 байт, которые содержат информации о команде сервера, адрес прибора получателя, данные, номер

пакета, количество пакетов в запросе и *CRC*. Далее производится запись пакетов в линию, и сервер переходит в режим прослушивания линии (на строго определенный промежуток времени).

Клиент принимает по одному пакету, декодирует их, определяет адрес прибораполучателя и если он совпадает с его собственным адресом, то он начинает обработку запроса. Далее происходит постепенное считывание пакетов из линии. Все пакеты декодируются, рассчитывается значение *CRC* и сравнивается со значением и пакета. Если они совпадают, то собирается полный запрос сервера. Далее происходит генерация ответа, и посылка ответа. Процедура посылки ответа клиентом аналогична процедуре посылки запроса сервером.

6.2.2. Разработка и исследование макета информационной системы для контроля и прогноза состояния горных массивов в процессе формирования и проявления геодинамических событий

В разделе 3.6.3 в главе 3 настоящей работы представлена структурная схема регистратора электромагнитных и акустических сигналов для исследования напряженного состояния горных пород РЭМАС1. Эксплуатация регистратора РЭМАС1 при проведении экспериментальных исследований в шахтном поле Таштагольского месторождения, как было показано в главе 5 настоящей работы, состояла в установке приборов на участках горизонта рудника перед проведением массовых технологических взрывов. Приборы запускались в режиме самописца и осуществляли сбор информации о спектральных характеристиках сигналов в шахте до взрыва и в момент его проведения, а также в процессе релаксации породного массива. Объем флэш-памяти прибора и энергетическая емкость аккумуляторов позволяли уверенно осуществлять непрерывный анализ и регистрацию сигналов на протяжении до 3.5 суток. Данный подход оправдал себя на начальном этапе работ. Были обнаружены закономерности изменения электромагнитных сигналов на этапе подготовки и развития деформационных зон, проявления геодинамических событий. Недостатком являлось невозможность наблюдения процессов формирования и развития геодинамических процессов на опасных участках рудника в реальном режиме времени удаленным диспетчером.

Прибор РЭМАС1, как первичный регистратор ЭМС и АС, обеспечивает в процессе автоматического их анализа формирование данных в виде математического ожидания и дисперсии амплитуд электромагнитных и акустических сигналов за интервалы времени в пределах от $8 \cdot 10^{-3}$ до $128 \cdot 10^{-3}$ секунды. При этом данные по ЭМС формируются в интервале от 1 до 100 кГц с интервалом 1 кГц. Дальнейшее развитие метода мониторинга и краткосрочного прогноза возникновения деструктивных зон и геодинамических событий связано с созданием

единой информационной системы для диагностики напряженно-деформированного состояния массива горных пород в шахте в реальном масштабе времени.

В ходе работы был проведены исследования и анализ подходов к построению информационной системы шахтного применения. Ключевым вопросом при построении информационной системы является способ передачи данных и канал их распространения. В первую очередь выбор стоит между проводной связью и передачей данных по радиоканалу.

Ограничением первого подхода является большие инфраструктурные затраты. Прокладка информационного канала в шахтных условиях – процесс трудоемкий и дорогостоящий.

Существующие информационные магистрали и другие технологические объекты, предназначенные для работы рудника (линии подключения сейсмических датчиков, линии связи, рельсы, трубопроводы, высоковольтные кабели) не обеспечивают необходимой пропускной способности, кроме того, могут быть недоступны в местах, представляющих интерес для проведения исследований либо конкретных измерений. Второй подход лишен недостатков связанных с прокладкой информационных кабелей до мест установки регистраторов, однако, эффективность таких систем во многом определяется дальностью связи и пропускной способностью канала радиосвязи в условиях реальной шахтной выработки. На рисунках 6.4 и 6.5 приведены топологии сетей передачи данных реализующих обозначенные подходы.



Рисунок 6.4 – Топология сети основанной на интерфейсе RS-485

Сеть на базе интерфейса *RS*-485 представляет двухпроводную дифференциальную шину данных, позволяющую подключить параллельно до 32 устройств и обеспечить скорость передачи данных до 100 кбит на расстояние до 1200 м. Для обеспечения большей дальности и/или пропускной способности шины в нее могут быть установлены дополнительные (магистральные) усилители. Второй подход подразумевает применение радиопередающих модулей для организации информационного канала передачи данных с приборов на диспетчерский пульт или в банк данных. Преимуществом такого подхода является возможность реализации на базе радиопередающих модулей как топологии сети точка-точка, звезда, так и топологии mesh, при которых каждый из приемопередающих модулей может выступать в качестве ретранслятора для нескольких модулей в зоне приема, причем сами эти модули могут не иметь непосредственной связи. Это позволяет, в перспективе, даже при небольшой дальности уверенного приема между двумя модулями в сети (до 200 – 500 метров) обеспечивать самоорганизующиеся *mesh*-сети обеспечивающие широкую зону покрытия.



Рисунок 6.5 – Организация сети, основанной на интерфейсе передачи данных по радиоканалу

Была осуществлена модификация структурной схемы регистратора. Схема прибора дополнена блоком преобразования интерфейса, который должен обеспечивать передачу данных на удаленный диспетчерский пульт с использованием проводного канала связи (*RS*-485) и/или радиоканала (*ISM* 433 МГц). Модифицированная структурная схема приведена на рисунке 6.6.



Рисунок 6.6 – Модифицированная структурная схема регистратора РЭМАС1

Внутрисхемный интерфейс работает по двум линиям связи. Этот интерфейс применяется как аппаратный модуль микроконтроллеров *Atmega* и значительно облегчает работу с шиной I2C, по которой работают другие устройства. Последовательный периферийный интерфейс *SPI* (*Serial Peripheral Interface*) обеспечивает последовательную передачу данных в режиме полного дуплекса, то есть передавать и принимать информацию одновременно.

Интерфейс *PPI (Pixels Per Inch)* используется в схеме для определения разрешающей способности при выводе и вводе графики. Были разработаны принципиальные схемы блоков преобразования интерфейсов *RS*-232 – *RS*-484 и *RS*-232 – *ISM* 433. Разработана принципиальная схема блоком преобразования интерфейса, реализующего подключение приборов по радиоканалу в разрешенном радиолюбительском *ISM (Industrial, Scientific and Medical)* диапазоне с центральной частотой 433 МГц. Схема блока преобразования выполнена на базе радиочастотного модуля *SIM*20-433 производства *SimCom*. В радиочастотном диапазоне 433 МГц модуль обеспечивает передачу данных между двумя устройствами, снабженными последовательным интерфейсом *UART*. Модуль *SIM*20-433 очень хорошо обеспечивает решение задачи беспроводной замены кабеля *RS*-232 и обеспечивает уверенную связь на расстояниях до 1000 метров при максимально возможной мощности радиосигнала $20\cdot10^{-3}$ Вт. Основные характеристики модуля *SIM*20-433 приведены в таблице 6.3.

Параметр	Значение
Рабочий частотный диапазон, МГц	433 434,39
Модуляция	2GFSK
Точность перестройки частоты, кГц	200
Дальность связи при 1200 бит/с	1000 м
Выходная максимальная мощность, 10 ⁻³ Вт	20
Число уровней выходной мощности	10
Максимальная чувствительность приемника, дБм	-115
Скорость обмена данными, бит/с	1200 - 115200
Ток в спящем режиме, 10 ⁻⁶ А	5
Максимальное потребление тока в режиме излучения,	
10 ⁻³ A	35
Максимальное потребление тока в режиме приема, 10 ⁻³ А	35
Рабочий температурный диапазон, °С	-2070

Таблица 6.3 – Основные технические характеристики модуля SIM20-433

Было произведено тестирование изготовленного приемопередающего макета на основе модуля *SIM*20-433. В ходе лабораторного тестирования было экспериментально установлена связь между модулями расположенными на расстоянии 100 м на скорости 128 кБит/с. Предельная дальность работы модулей с использованием штыревых ненаправленных антенн составляет 1000 м. Потребляемый ток в режиме передачи не превышает 60 мА. Проведены натурные испытания в шахте Таштагольского месторождения на горизонте минус 350

приемопередающих модулей *SIM*20-433. На рисунке 6.7 приведена схема натурных испытаний. Также была разработана принципиальная схема блока преобразователя интерфейсов *RS*-232/*RS*-485 для работы в проводных сетях передачи данных.

Тестирование проводной системы на основе интерфейсов *RS*-232/*RS*-485 также показало, что на расстоянии 400 м можно передавать данные со скоростью 460.8 кбит/с по проводу с одной витой парой. На расстояние 1200 м скорость передачи данных 62,5 кбит/с. Потребляемый ток не превышает 250 мА.

Таким образом, предложено два макета для передачи информации от регистратора удаленному диспетчеру:

- на основе приемопередатчиков по радиоканалу;

- по проводному интерфейсу *RS*-485.

Предпочтительнее передача информации по радиоканалу, так как этот способ имеет существенно более низкое энергопотребление, но передача радиосигнала в подземном руднике существенно затруднена из-за нелинейности выработок породы (ортов и штреков). Хотя в отдельных случаях прямолинейность выработок, например на Таштагольском руднике, может достигать значений до 500 м. Расстояние до диспетчерской службы на поверхности составляет (3-5)·10³ м. Нелинейность проходок потребует большего количества приемопередатчиков.



Рисунок 6.7 – Схема испытаний беспроводной передачи данных мониторинга электромагнитной эмиссии в условиях шахты

Передача информации по проводному интерфейсу *RS*-485 может быть предпочтительнее при наличии проводной сети сейсмостанции или телефонных проводов, как на Таштагольском руднике. В этом случае проводной интерфейс *RS*-485 может быть обеспечен энергией,

подведенной к датчикам сейсмостанции и телефонам. Преимуществом в этом случае является комплексирование данных электромагнитных и сейсмических измерений.

Подводя итоги исследованиям двух разработанных макетов можно сказать, что выбор того или иного способа передачи информации определяется конкретными условиями снабжения энергией информационной сети, геологической обстановкой в руднике и технологией добычи полезного ископаемого.

6.2.3. Алгоритм и схема проведения мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий, включая инфракрасное свечение скважин

Основой информационной системы мониторинга и краткосрочного прогноза изменений НДС массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий является автономный регистратор РЭМАС1. На рисунке 6.8 представлен алгоритм развертывания системы мониторинга с регистраторами РЭМАС1.



Рисунок 6.8 – Алгоритм развертывания системы мониторинга изменений напряженнодеформированного состояния массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии

Регистратор обеспечивает не только запись параметров импульсных ЭМС и АС, но и предварительную обработку амплитудно-частотных и временных данных измерений электромагнитной эмиссии. Поскольку контроль всего шахтного поля затруднителен из-за необходимости иметь большое количество регистраторов, то предлагается вести наблюдения изменений НДС только вокруг взрываемого или отрабатываемого блоков горных пород. Количество регистраторов в этом случае может быть ограничено тремя, четырьмя или пятью приборами. Три прибора располагаются в шахте по горизонту вокруг разрабатываемого блока горных пород, который находится ниже взрыва. Четвертый прибор помещается на вышележащем горизонте шахты, а пятый – на нижележащем горизонте. Пятый прибор может не использоваться. Такое расположение регистраторов позволяет калибровать электромагнитные и акустические импульсы по энергии технологического взрыва. При этом расстояние до места взрыва не должно превышать 150-200 метров и не быть ближе 40 метров.

Важным является непосредственное расположение регистраторов. Как уже было отмечено, емкостные *E* или индукционные *H* датчики необходимо размещать на контактах горных пород и руды, на «дайках» и залеченных трещинах, которые направлены по своей протяженности в сторону взрываемого блока. Для определения электромагнитной активности места установки регистраторов необходимо использовать электромагнитный метод профилирования, описанный в разделе 5.1.1 настоящей работы. Может также активно использоваться метод ИК радиометрии при наличии скважин или при их специальном бурении. Метод детально представлен в разделе 5.1.2 настоящей работы.

Датчики регистраторов РЭМАС1 устанавливаются в выявленных местах с повышенной электромагнитной активностью. В зависимости от слагающих массив горных пород устанавливаются емкостные или индукционные датчики, а также закрепляются (вбиваются) приспособленные для процесса вбивания в породу акустические датчики. Электромагнитные датчики могут быть подключены к регистратору РЭМАС1 как по дифференциальной схеме, так и без нее. Емкостные датчики, как правило, подключаются к регистраторам по дифференциальной схеме из-за повышенного уровня электромагнитных помех из дальней зоны шахтного поля рудника. Расстояние между датчиками одного прибора при дифференциальной схеме 3 метров.

Несмотря на герметичность и прочность корпусов регистраторы РЭМАС1 при установке должны быть максимально защищены от обвалов горных пород при взрывах путем сооружений временных укрытий из досок или камней, всегда имеющихся в шахте. На рисунке 6.9 показан пример обрушения горных пород в шахте Таштагольского месторождения. Затем регистраторы подключаются к информационной сети. Включается электрическое питание и регистратор записывает, предварительно обрабатывает данные мониторинга ЭМЭ и АЭ и передает в информационную сеть предварительно установленный диапазон данных. Алгоритм развертывания системы мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии повторяется для каждого устанавливаемого регистратора.



Рисунок 6.9 – Пример обрушения горных пород в шахте Таштагольского месторождения

Схема информационной системы на базе регистраторов РЭМАС1 приведена на рисунке 6.10. Как видно из схемы предварительная обработка электромагнитных и акустических сигналов предполагает разложение ЭМС на спектральные составляющие, оценку математического ожидания и дисперсии спектральных амплитуд ЭМС на заданном временном интервале от 8·10⁻³ до 128·10⁻³ секунд, а также усреднение амплитуд AC за время 128·10⁻³ секунды. В дальнейшем на выбранных частотах результаты предварительной обработки передаются узлам по транспортным сети информационной системы на ПК диспетчера. По данным мониторинга математического ожидания и дисперсии амплитуд ЭМЭ на выбранных частотах диспетчер следит за развитием динамики контролируемого участка массива горных пород.

Таким образом, уже на стадии предварительной обработки данных мониторинга параметров и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород можно судить о развитии деструктивных зон и геодинамических проявлений. Разработка и применение в последующем специальных триангуляционных программ обеспечит контроль энергии и места развивающихся геодинамических событий в шахте [360, 361].



Рисунок 6.10 – Схема работы информационной системы на базе регистраторов РЭМАС1

6.3. Определение развития деструктивных зон. Математическое моделирование обнаружения предвестников разрушения горных пород на этапе принятия решений диспетчером с использованием временных рядов параметров электромагнитных сигналов

В главе 5 настоящей работы уже отмечалась перспективность электромагнитных методов мониторинга изменений НДС образцов и массива горных пород, а также

краткосрочного прогноза геодинамических проявлений в шахтном поле рудников. При технологических взрывах разной интенсивности, при проведении проходок и очистных работ происходит перераспределение сжимающих, растягивающих и сдвиговых напряжений, действия которых в результате механоэлектрических преобразований сопровождаются электромагнитной эмиссией. Параметры электромагнитных сигналов и характеристики электромагнитной эмиссии содержат информацию о процессах возникновения и развития деструктивных зон, а также о процессах сдвижения или скольжения породных масс по разломам и контактам горных пород.

В главе 4 настоящей работы на образцах горных пород рассмотрены различные механизмы механоэлектрических преобразований. Кроме того, показано, что разным этапам разрушения соответствуют определенные амплитудно-частотные параметры ЭМС. Такому различию в большой степени способствует многостадийный процесс развития трещин. При этом надо заметить, что формирование деструктивной зоны разделено по времени с фактом разрушения или создания трещин отрыва. Полученные сведения о формировании параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ определили направленность на создание практических методов выявления прочности материалов со сложной структурой и текстурой на ранних этапах их нагружения, а также мониторинга изменения НДС горных массивов и прогноза их динамики во времени. При измерениях параметров и характеристик ЭМЭ горных пород, согласно схеме работы информационной системы на начальном этапе регистраторы РЭМАС1 автоматически производят расчёт математического ожидания и дисперсии амплитуд ЭМС за установленный промежуток времени (8-128)·10⁻³ секунд по интервалу частот (1-100) кГц через 1 кГц, а амплитуд АС только в интервале $128 \cdot 10^{-3}$ секунды. Эти действия важны для сокращения количества передаваемой информации по сети на ПК диспетчера.

Конечным этапом при передаче информации на ПК диспетчера является анализ обработанных и переданных данных мониторинга параметров и характеристик ЭМЭ, а также принятие решений о продолжении работ на контролируемом объекте или блоке массива горных пород. В работе [362] приведено математическое моделирование обнаружения предвестников разрушения горных пород на этапе принятия решений диспетчером с использованием временных рядов параметров электромагнитных сигналов. Моделирование проводилось с учетом разработанных под руководством академика РАН А.Д. Гвишиани в Геофизическом центре РАН с участием С.М. Агаяна, Ж. Злотники, Ш.Р. Богоутдинова новых методов и алгоритмов обнаружения предвестников геодинамических явлений по временным рядам. При анализе больших массивов геолого-геофизической информации эти методы и алгоритмы позволяли получать новые важные результаты в геоинформатике. Были созданы новые методы иерархической кластеризации, а также алгоритмы узнавания аномалий на временных рядах

пространственных геофизических и геодинамических объектов на базе нечеткой логики и их приложения в геофизике и геоинформатике [363, 364]. Рассматривались также алгоритмы, разработанные французскими учеными J.-L. LeMouël и др. [365].

Для нелинейных и стохастических данных, какими являются параметры ЭМС и характеристики ЭМЭ горных пород, в настоящее время не существует достоверных алгоритмов обнаружения предвестников. Аналитическое описание ЭМС и ЭМЭ неполно или невозможно совсем. Если представить их в виде реальных временных рядов, то эти ряды будут содержать параметрическую неопределенность, не стационарность и зашумленность. Поэтому обработка данных потребует комплексного подхода по обнаружению предвестников геодинамических событий и их развития.

В связи с этим были проведены исследования с целью поиска предвестников разрушения горных пород и создания алгоритма на их основе. Для этого первоначально использовались результаты экспериментальных исследований по разрушению образцов горных пород при одноосном сжатии. Регистрируемые при развитии разрушения амплитудные параметры электромагнитных сигналов записывались в виде временных рядов.

Экспериментальные исследования проводились на образцах горных пород, представленных скарнами, сиенитами и магнетитовой рудой, отобранных на Таштагольском железорудном месторождении. Одноосное сжатие осуществлялось с постоянной скоростью 0.25 кН/с до разрушения образцов. В процессе нагружения измерялись усилие, создаваемое при сжатии, и продольная деформация, а также характеристики электромагнитной эмиссии образцов. Измерение характеристик ЭМЭ проводились аналого-цифровым регистратором электромагнитных и акустических сигналов РЕМС1 [219], описанным в разделе 3.6.2 главы 3 настоящей работы. Регистратор принимал с помощью емкостных или индукционных датчиков ЭМС и записывал с усреднением за 1 секунду во встроенную память в реальном режиме времени следующие характеристики ЭМЭ: интенсивность; амплитуду ЭМС по трем каналам в полосах частот с добротностью не более 5 и с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц, по одному каналу амплитуду в широкой полосе частот от 1 до 100 кГц. Кроме того, регистратор, при необходимости, мог записывать с помощью пьезоэлектрического приемника акустические сигналы. Для исследований в шахтных условиях время усреднения увеличивалось из-за конечной встроенной памяти до 5 секунд. Данные об ЭМЭ, получаемые с использованием РЕМС1 представляют собой временные ряды, которые послужили основой для разработка алгоритма поиска предвестников разрушения образцов горных пород по временным рядам измерений электромагнитных сигналов.

6.3.1. Модельное представление электромагнитного сигнала. Постановка задачи поиска предвестников геодинамического события

Как было показано в главах 4 и 5 амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов и амплитудные характеристики электромагнитной эмиссии для выбранных частот в эксперименте с регистратором РЭМС1, также как и для РЭМАС1 в дальнейшем, соответствуют уровню приложенных усилий и энергии развивающихся геодинамических событий, в том числе и разрушению горных пород. Поэтому задачу обнаружения предвестников геодинамического события можно решать, используя изменения данных мониторинга характеристик электромагнитной эмиссии. Для решения задач сигнал ЭМЭ горной породы с выхода датчика y(t) можно записать в виде аддитивной смеси полезного сигнала x(t) и помехи $\eta(t)$

$$y(t) = x(t) + \eta(t),$$
 (6.1)

Модель полезного сигнала x(t) можно представить в виде кусочно-заданной функции:

$$x(t) = \begin{cases} f_1^x(t), \quad t_0 < t \le t_1 \\ f_2^x(t), \quad t_1 < t \le t_2 \\ \vdots \\ f_n^x(t), \quad t_{n-1} < t \le t_n \end{cases}$$
(6.2)

$$\Gamma \text{дe } f_k^x(t) = \Pi(t_{k-1}, t_k) \left(f_{k-1}^x(t_{k-1}) + \phi_{t(k)} \left(\frac{t - t_{k-1}}{\Delta t} \right) \right), \quad t : N^x \to N^{\phi},$$

$$N^x = \{1, \dots, n\}, N^{\phi} = \{1, \dots, J\}, \qquad k \in N^x, \qquad j \in N^{\phi}, \qquad \Delta t = t_k - t_{k-1}, \qquad \Pi(\tau_1, \tau_2) = \theta(\tau_1) - \theta(\tau_2),$$

$$\theta(\tau) = \begin{cases} 1, t \ge \tau \\ 0, t < \tau \end{cases}.$$

Здесь $\theta(\tau) - \phi$ ункция Хэвисайда, а $\phi_j(t)$ - функция $F_{\omega} = \{\varphi_j(t)\}$, представленная как параметр предвестника разрушения или динамического события. Времена $t_0 \le t_1 \le ... \le t_n$ отображают импульсные изменения вида функций $\phi_j(t)$. Предполагалось, что регистрируемый процесс изменения характеристик ЭМС на дискретном интервале времени Δt обязательно находится в одном из j-ых состояний.

После аналого-цифрового преобразования сигналов электромагнитной эмиссии, поступающих с принимающих датчиков, дискретные значения временного ряда, содержащие признаки предвестников геодинамических событий, внешние помехи и шум квантования по уровню, представлялись в виде суммы:

$$y_k = x_k + \eta_k + e_k, \tag{6.3}$$

где k > 0, $x_k = x(k\Delta t)$, Δt - интервал квантования по времени информационных сигналов датчиков (для нашего случая $\Delta t = 1, c.$), e_k - погрешность квантования, имеющая случайный характер, η_k – дискретные значения помехи в виде белого шума, которому соответствует нулевое математическое ожидание и неизвестная ограниченная дисперсия σ_n^2 .

Для создания модели предвестника геодинамического события и описания составляющей x_k в выражении (6.3) во фрагменты временного ряда ЭМЭ вводились в качестве базисных элементарных функций $\Phi = \{f_v(k), v = 1,...,h\}$, где $f_v(k)$ - детерминированные аналитически заданные функции. Используя выражения (6.2) и (6.3), модель регистрируемого процесса изменения характеристик ЭМЭ на *i*-том фрагменте временного ряда можно записать как:

$$y_k^i = x_k^i + \eta_k^i + e_k^i, (6.4)$$

где i = 1,...I, $x_k^i = f(k\Delta t)$, $\Delta t > 0$, $f(t) \in \mathbb{R}$ - здесь представляет собой базисную элементарную функцию, выбранную из Φ , которая, как показано выше, описывает характеристики неслучайной составляющей x_k^i в *i*-м фрагменте временного ряда ЭМЭ.

При построении алгоритма обнаружения предвестников геодинамического события использовалась методология, предложенная в работах [366, 367]. В этой методологии стохастический временной ряд представлялся в виде некоторого множественного ряда S^n случайных векторных объектов, где $s^n = ((t_1, y_1), ..., (t_n, y_n)), n \ge 1, t_k, y_k \in \mathbb{R}, s_j = (t_k, y_k) \in \mathbb{R}^2, t_k = k\Delta t, \Delta t > 0, t_1 < ... < t_d$. Здесь y_k будет удовлетворять соотношению (6.4) и вводится множество S^n всех различных вектор-объектов длины п как $S^n \subseteq \mathfrak{S}, \mathfrak{S} = \bigcup_{n=1}^{\infty} S^n$.

6.3.2. Алгоритм выявления предвестников геодинамического события

При построении алгоритма выявления предвестников геодинамического события применялась разметка временного ряда, это понятие описано в работе [365]. Базисные функции $\Phi = \{f_v(k), v = 1, ..., h\}$ обозначались метками μ_i , которые представляют конечное множество $M = \{\mu_1, ..., \mu_h\}$. Это множество является определенным алфавитом α -разметки. С помощью решающей процедуры, подставляющей каждому векторному объекту метку из $M = \{\mu_1, ..., \mu_h\}$, получилась α -разметку вектор-объекта \mathbf{s}^n . Так как аналитическое описание зависимостей, соответствующих некоторому состоянию j регистрируемого процесса ЭМЭ, неизвестно, то задавалось их описание как $\tilde{\chi}_j = (\mu_1, ..., \mu_m) \in M^{\times}$, $M^{\times} = \{\tilde{\chi}_j\}$, $M^{\times} \subset \tilde{M}$, $\mu_i \in M$, j = 1, ..., J,
i = 1,...,m с использованием алфавита M. Для описаний $\tilde{\chi}_j = (\mu_1,...,\mu_m) \in M^{\chi}$ применялось определенное множество $X = \{\chi_1,...,\chi_J\}$ символов, которое представляет собой алфавит β разметки. Здесь β -разметкой будет некоторая последовательность меток $\chi^n = (\chi_1,...,\chi_n), \chi^n \in X^n$ из выбранного алфавита X, тогда Xⁿ представляет собой множество всех различных β разметок длиной n, а $\tilde{\chi} = \bigcup_{n=1}^{\infty} X^n$ множество всех β -разметок. Для формирования β -разметки использовалась решающая процедура, которая устанавливала соответствие для α -разметки μ^n каждого вектор-объекта \mathbf{s}^n метку из применяемого алфавита $X = \{\chi_1,...,\chi_J\}$.

Таким образом, из выше описанного следует, что алгоритм обнаружения предвестников геодинамического события можно разделить на три этапа (рисунок 6.11).



Рисунок 6.11 – Этапы процесса выявления предвестников геодинамических событий по временным рядам данных амплитуд электромагнитной эмиссии горных пород

На первом этапе производился выбор базисных функций (рисунок 6.12) и α-разметка измеряемого временного ряда ЭМЭ (рисунок 6.13). При этом использовался алгоритм α-разметки, основанный на процедуре преобразования временного ряда в символьную последовательность Symbolic Aggregate approXimation (SAX) [368].

Используемые данные для алгоритма α -разметки: окрестность $\mathbf{o}(s_j, u_j) = ((t_{i_1}, y_{i_1}), \dots, (t_j, y_j), \dots, (t_{i_2}, y_{i_2}))$ точки $s_j = (t_j, y_j)$ и временной участок ряда $y_{i_1}, \dots, y_j, \dots, y_{i_2}$; алфавит разметки $M = \{m1, m2, m3, m4\}$, составленный из меток функций $\Phi = \{f_v(k), v = 1, \dots, h\}$; размер алфавита символов α и количество символов в строке w. Работа в соответствие с алгоритмом позволила получить соответствующую метку $\mu \in M$ для точки $s_i = (t_i, y_j)$.



Рисунок 6.12 – Базисные функции для α-разметки





На втором этапе происходила β -разметка временного ряда. Разметка также производилась по результатам измерений амплитуды ЭМЭ в процессе подготовки и развития разрушения того же образца при одноосном сжатии. При этом оценивались и были использованы закономерности и признаки, которые указывали на предвестники формирование очага разрушения [303, 369]. Такими признаками являлись импульсные изменения средней амплитуды ЭМЭ и увеличение частоты следования резких изменений амплитуды ЭМЭ. Параметры предвестника записывались в виде наборов меток $M = \{m1, m2, m3, m4\}$ и формировали множество $M^{\chi} = \{\tilde{\chi}_j\}$. Множество M^{χ} уже задавалось β -разметкой $X = \{\chi_1, ..., \chi_J\}$, где метки χ_j близки соответствующим описаниям параметров предвестника $\tilde{\chi}_j \in M^{\chi}$; алфавит β -разметки $X = \{\chi_1, ..., \chi_J\}$, который соответствовал меткам описаний параметров предвестника $M^{\chi} = \{\tilde{\chi}_i\}$. В результате, используя алгоритм для β -разметки, получили метки $\chi \in X$, соответствующие α -разметке μ^m . Для определения метки χ использовалась формула: $\chi = \arg \min_{j=1,...,J} \rho(\mu^m, \tilde{\chi}_j)$. Определение расстояний между описанием параметра предвестника $\tilde{\chi}_j$ и α -разметкой μ^m , вычислялось в соответствие с расчетами в работе Левенштейна [370]. Для этого строилась композиция алгоритмов с применением корректирующих операций, в основу которых положен метод анализа иерархий [366].

Для подбора необходимых базисных функций $\Phi = \{f_v(k), v = 1,...,h\}$, а также для описания $M^{\chi} = \{\tilde{\chi}_j\}$ функциональных закономерностей $F_{\omega} = \{\phi_j\}$ и набора обучающих выборок \mathfrak{L} , элементами которых являлись вектор-объекты $s^m = ((t_1, y_1), ..., (t_m, y_m))$ на этапе формирования зоны разрушения использовались результатам лабораторных исследований разрушения образцов разных горных пород при одноосном сжатии.

Исходя из выражений (6.1) и (6.4), существует возможность некорректности a, β разметок из-за различия α -разметок μ^n , μ'^n и β -разметок χ^n , χ'^n , статистически эквивалентных вектор-объектов s^n и s'^n . В связи с этим для обнаружения предвестников разрушения образцов горных пород использовались корректные алгоритмы a и β разметки. Уменьшение числа ошибок разметок случайного временного ряда обеспечивалось численным расчетом оптимальной системы окрестностей предвестника. Для этого выбиралась окрестность из всех возможных систем окрестностей $\mathbf{O}^n = \{\mathbf{o}_1^n(s_1, u_c), ..., \mathbf{o}_n^n(s_n, u_c)\}$, имеющих размеры $u^{\min} < u_c < u^{\max}$ ($u^{\min} > 0$ и $u^{\max} < n$). Использовались следующие критерии оптимизации: минимуму неопределенностей разметки μ^n вектор-объекта s^n , соответствует минимум энтропии выбранных критериев в системе окрестностей; функция вероятности распределения меток из алфавита M α -разметки; точность α -разметки, в смысле расстояния $\rho(\gamma_v, \gamma'_i)$, где γ_v, γ'_i - признаки эталонных временных рядов; система окрестностей \mathbf{O}_*^n должна иметь минимально возможный размер u_c .

В результате процесс выявление оптимальной системы окрестностей предвестника имеет три этапа. Это этап предобработки, включающий выбор систем окрестностей предвестника разрушения, этап расчета критериев для каждой выбранной системы; этап принятия решений, заключающийся в формировании множества Парето $\Pi(\mathfrak{X})$ и выбора оптимальной системы окрестностей.

На рисунке 6.14 приведена блок-схема алгоритма, использующего β -разметку временного ряда амплитуды ЭМЭ и частоты вхождения описаний параметров предвестника $\tilde{\chi}_{j}$.



Рисунок 6.14 – Алгоритм обнаружения предвестников разрушения образцов горных пород

Оценивались значения функции g(t), характеризующие принадлежность соответствующего участка временного ряда к предвестникам. Работа приведенного на рисунке 6.14 алгоритма обнаружения предвестников разрушения тестировалась на временных рядах амплитуд ЭМЭ, полученных при разрушении лабораторных образцов (рисунок 6.15 и 6.16) Таштагольского месторождения.

Такое же тестирование проводилось на временных рядах амплитуд ЭМЭ при проведении взрыва и в период релаксации напряженного состояния горного массива в окрестностях установки регистратора РЭМС1 в шахте Таштагольская (рисунок 6.17). На рисунке 6.15 приведена обучающая выборка участка временного ряда амплитуд ЭМЭ, обведенная синей штриховой линией. На рисунке 6.16 зеленой штриховой линией обведен участок временного ряда амплитуд ЭМЭ, в котором возможно формирование очага разрушения.



Рисунок 6.15 – Функции *g*(*k*) для временного ряда измерений амплитуд ЭМЭ в интервале (1–100) кГц, полученных при разрушении образца вмещающей руду породы одноосным сжатием

В дальнейшем алгоритм обнаружения предвестников разрушения тестировался на временном ряде амплитуд ЭМЭ, полученного в натурных условиях шахты Таштагольской после технологических взрывов. На рисунке 6.17 построена функция g(k) для временного ряда амплитуд ЭМЭ зарегистрированного РЭМС1 в ноябре 2007 года. На временном ряде ЭМЭ отмечен массовый технологический взрыв ТВ и последующий за ним «горный удар» ГУ. На

рисунке 6.18 приведен временной ряд, где после технологического взрыва «горного удара» не последовало.



Рисунок 6.16 – Функции *g*(*k*) для временного ряда измерений амплитуд ЭМЭ в интервале (1–100) кГц, полученных при разрушении образца магнетитовой руды одноосном сжатием



Рисунок 6.17 – Характеристические функции *g*(*k*), построенные для временных рядов амплитуд ЭМЭ, полученных при измерениях в шахте Таштагольской в 2007 году, включающих массовый технологический взрыв ТУ и «горный удар» ГУ



Рисунок 6.18 – Характеристические функции *g*(*k*), построенные для временных рядов амплитуд ЭМЭ, полученных при измерениях в шахте Таштагольской в 2009 году, включающих массовый технологический взрыв ТУ, «горный удар» не последовал

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет выявлять во временных рядах измерений амплитуд ЭМЭ особенности, характерные для этапа, предшествующего разрушению лабораторных образцов горных пород. Кроме того, данный алгоритм может быть успешно использован в составе программного обеспечения информационной системы, которая предназначена для мониторинга изменения НДС массивов горных пород и прогноза удароопасности по параметрам и характеристикам ЭМЭ после технологических взрывов и проведения очистных работ в рудниках.

Заключение

Для достижения целей настоящей диссертационной работы, заключающихся в разработке физических основ электромагнитных методов контроля подготовки и развития разрушения прочных горных пород по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии, а также в разработке методов и средств мониторинга развития геодинамических событий по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии горных пород, проведен определенный объем работы.

1. В процессе работы над диссертацией проведен анализ:

 изученности механизмов и разработанных моделей генерации электромагнитных сигналов диэлектрическими твердотельными материалами и горными породами;

 механизмов разрушения горных пород и связей характеристик акустической и электромагнитной эмиссий при механическом воздействии;

условий формирования горного удара;

методов, схем построения и параметров используемых приборов и средств контроля
 электромагнитных сигналов и электромагнитной эмиссии диэлектрических гетерогенных
 материалов и горных пород;

 – направлений применения инфракрасной радиометрии для целей мониторинга развития деструктивных процессов в образцах и массивах горных пород;

 – горно-геологической и гидрологической характеристик Таштагольского железорудного месторождения;

 физико-механических, электрических и магнитных свойства горных пород Таштагольского месторождения.

2. Разработан и изготовлен универсальный стенд, позволяющий исследовать закономерности изменений и измерять параметры электромагнитных откликов твердотельных диэлектрических образцов на внешнее импульсное акустическое воздействие. На этом же стенде возбуждаются и сами воздействующие акустические импульсы с заданными параметрами, измеряется скорость звука в образцах и его затухание. Возбуждение акустических импульсов происходит либо на основе обратного пьезоэлектрического эффекта в пьезоэлектрической керамике, либо ударом шарика с известным весом и скоростью налета.

3. Разработан и изготовлен стенд на основе пресса ИП-500 с компьютерным управлением, на котором возможно проводить исследования параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии при нагружении образцов горных пород одноосным сжатием или сдвигом до разрушения. При нагружении образцов возможно исследование изменений параметров токов поляризации, проводимости, ИК радиометрии и

отслоения микрочастиц, в том числе и при внешнем акустическом воздействии. Кроме того, на этом стенде возможно изменять тип нагружения (линейный, ступенчатый или циклический), измерять деформацию образца и параметры акустических импульсов, возникающих при развитии разрушения исследуемого объекта.

4. Разработан, изготовлен и применен в лабораторных и шахтных условиях Таштагольского рудника и на других объектах полевой автономный программно-аппаратный регистратор РЭМС1, обеспечивающий измерение параметров и характеристик электромагнитной эмиссии и акустических импульсов модельных образцов, образцов и массивов горных пород по 6 каналам с усреднением за одну или пять секунд интенсивности потока ЭМЭ, амплитуд ЭМС и АС в широкой полосе частот (1-100) кГц, максимальных амплитуд в полосах с добротностью не более 5 и с центральными частотами 2.0, 15.0 и 100 кГц.

5. Разработан, изготовлен и апробирован в лабораторных и шахтных условиях Таштагольского рудника регистратор электромагнитных и акустических сигналов горных пород РЭМАС1. Регистратор обеспечивает прием в диапазоне частот (1-100) кГц ЭМС с высокой чувствительностью по входу не хуже 2.10⁻⁶ В и АС не хуже 5.10⁻⁵ В. В приборе возможна установка временного цикла обработки данных измерения от 8·10⁻³ до 128·10⁻³ секунд во всем диапазоне с выборкой по частотам не менее 1 кГц. Регистратор обеспечивает также непрерывную запись ЭМС и АС горных пород в процессе развития геодинамических явлений в течение 72 часов без смены или подзарядки аккумуляторов. Способы программной обработки регистрируемых ЭМС и АС служат для уменьшения объема выходных данных при мониторинге, а также для получения амплитудно-частотных параметров электромагнитных импульсов. Работа регистраторов РЭМАС1 в шахте Таштагольского месторождения и результаты обработки регистрируемых электромагнитных сигналов горных пород позволили сделать вывод о возможности использования их для первичной записи, предварительной обработки и передачи данных наблюдения ЭМЭ и АЭ в информационную сеть для дальнейшего анализа и принятия решений удаленным диспетчером. Защищенность прибора от пыли и влаги на уровне IP64.

6. Проведено теоретическое и экспериментальное обоснование для разработки и применения методов мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженнодеформированного состояния горных пород в естественном их залегании по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии.

7. Измеренное распределение зарядов на поверхности образцов горных пород сиенитового скарна, известняка, магнетитовой руды из Таштагольского месторождения и на поверхности кальцитового сталактита, взятого в качестве сравнительного образца, показало, что максимальная величина заряда находится в местах с наибольшим удельным

сопротивлением. Причем такие максимальные значения заряда возникают как в горных породах с высоким удельным сопротивлением, имеющим низкоомные включения, так и на высокоомных включениях, имеющих низкоомное окружение основной породы, содержащейся в образце. Измерения поверхностного распределения заряда на сталактите с залеченной трещиной подтвердили этот вывод, так как сопротивление залеченной трещины на четыре порядка ниже, чем основной материал, из которого состоит сталактит.

8. Математическое моделирование изменений параметров ЭМС при разных амплитудах акустического воздействия на дефектную структуру с постоянным зарядом показало, что в результате акустоэлектрических преобразований на двойных электрических слоях происходит переизлучение энергии воздействующих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. Также установлено, что амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся В непосредственной связи С характеристиками детерминированных акустических воздействий и зарядовым состоянием дефектов структур. Изменение амплитуды ЭМС линейно зависит от величины заряда на обкладках дефекта и от величины возбуждающего акустического импульса при постоянном зарядовом состоянии дефекта.

9. На примере образцов кальцита экспериментально установлено, что электризация отличающихся по размеру структурных элементов приводит к их поляризации и к увеличению поверхностной плотности заряда с уменьшением размеров структурных элементов. Подобную зависимость имеет и время релаксации поверхностного заряда. При этом амплитуда электромагнитного отклика на внешнее акустическое возбуждение из крупнокристаллического образца выше, чем у мелкокристаллического. Такие закономерности изменения амплитуды ЭМС зависят от величины дипольного момента структурных элементов.

10. Математическое моделирование акустоэлектрических преобразований в слоистых твердотельных материалах, а также математическое моделирование изменений параметров электромагнитных откликов при импульсном детерминированном акустическом воздействии выявило закономерности преобразования на двойных электрических слоях энергии возбуждающих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. Кроме того, показана связь амплитудно-частотных параметров генерируемых электромагнитных сигналов с зарядовым состоянием слоистых структур и характеристиками детерминированных акустических воздействий.

11. Полученные закономерности влияния электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов показали, что в естественных условиях при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород, по каким-либо причинам, вариации

напряженности электромагнитного поля будут определяться и поляризационными токами, отражающими динамические процессы в очаге готовящегося разрушения.

12. Электрические и магнитные свойства горных пород и минеральных включений в них оказывают существенное влияние на амплитудно-частотные параметры ЭМС при акустических воздействиях. При этом амплитуды ЭМС нарастают при увеличении приложенных постоянных электрических или магнитных полей. При электризации вмещающих магнетитовую руду высокоомных образцов горных пород, например сиенита, в амплитудно-частотных спектрах проявляются его низкочастотные составляющие. Показано также, что изменения амплитуды ЭМС зависят от содержания магнетита в образцах руды и подчиняется явлению гистерезиса. Ориентация магнитных диполей магнетита без внешнего акустического воздействия сохраняется длительное время. Воздействие акустическими импульсами приводит ориентацию магнитных диполей в первоначальное не намагниченное состояние. Выявленные в ходе экспериментов закономерности позволяют оперативно и объективно с помощью аппаратурного контроля максимальной амплитуды ЭМС и акустического воздействия сораяния определять содержания магнетитов руды в кернах горных пород при разведочном бурении.

13. На контактах кристаллов и горных пород при акустическом возбуждении генерируются ЭМС с повышенной амплитудой и сложным частотным спектром. На примере кристаллов кварца, природного кварцита и других горных пород показано, что в спектре ЭМС всегда присутствуют резонансные частоты, связанные с размерами образца. Этот вывод важен для выбора частотного диапазона измерительной аппаратуры, используемой в лабораторных и натурных исследованиях ЭМС.

14. Параметры ЭМС исследуемых материалов и характеристики воздействующего акустического импульса находятся в непосредственной связи. Это обстоятельство указывает на то, что генерируемые при росте трещин акустические импульсы участвуют в формировании частотного спектра ЭМС как при развитии разрушения образцов, так и при формировании деструктивных зон в массивах горных пород. Изменения параметров возбуждающего акустического импульса и расстояния от излучающей поверхности приводят к изменениям регистрируемых параметров ЭМС.

15. Амплитуда электромагнитных сигналов, генерируемых в двух-, трех- и многослойных образцах при механоэлектрических преобразований, находится в прямой связи с амплитудно-частотными параметрами акустического воздействия. Наличие слоистых включений во вмещающих материалах резко меняет параметры распространяющегося акустического сигнала. При этом надо учитывать, что слой с меньшим акустическим импедансом отсекает высокочастотную часть спектра колебаний, но пропускает его низкочастотную часть. В соответствие с этим изменяются и амплитудно-частотные спектры

электромагнитных сигналов слоистых сред, в том числе и горных пород. Наличие слоев и прожилков с акустическим импедансом равным волновому сопротивлению вмещающего материала или горной породы не будет вызывать значительных изменений амплитуды ЭМС вблизи включения. В области металлического слоя или, например, прожилка горной породы с повышенной проводимостью в слоистой системе происходит уменьшение амплитуды ЭМС.

16. На примере переменно-слоистой горной породы серпентинит и минералов из которых состоит его слоистая структура (серпентин и хризотил – асбест) показано влияние количества слоев на амплитуду ЭМС, которая превышает амплитуду ЭМС из каждого отдельного образца серпентина и хризотил – асбеста в десятки раз при тех же условиях эксперимента и размеров образцов. Возрастание амплитуды, несомненно, вызвано присутствием большого количества двойных электрических слоев на границах полосчатых чередований минералов серпентина и хризотил – асбеста. Этот факт подтверждают и измерения зарядового состояния поверхности серпентинита, и уменьшение амплитуды ЭМС при равном акустическом воздействии после удаления части слоев. Изменения распространения фронта акустического импульса относительно простирания слоев приводит к преобразованиям параметров спектра ЭМС. Кроме того, полученные результаты исследований и их анализ подтверждают резонансный колебательный механизм возбуждения ЭМС при акустическом возбуждении горных пород, имеющих сложное структурно-текстурное строение.

17. Экспериментальные исследования и математические обосновали расчеты положение о том, что в спектре ЭМС сложных по текстуре образцов всегда будут присутствовать частоты разной амплитуды, обусловленные биением из-за сложения близких частот акустических импульсов, возникающих при отражении от структурно включений. При этом набор частот определяться размерами структурно-текстурных может как неоднородностей, так и разностью скоростей акустических импульсов в них.

18. Экспериментальными исследованиями показано, что при акустическом возбуждении контакта высокоомной горной породы на примере системы «микродиорит – минерализованная вода» генерируемые ЭМС имеют параметры, изменяющиеся с увеличением концентрации NaCl в дистиллированной воде. Эти изменения носят двойственный характер. Так, с одной стороны, амплитудно-частотные параметры ЭМС определяются удельным электрическим сопротивлением водного раствора NaCl, что приводит к уменьшению амплитуды с увеличением концентрации соли. С другой стороны, увеличение концентрации NaCl в солевом растворе приводит к расширению частотного спектра ЭМС. С повышением концентрации линейно контактирующего раствора NaCl появляются высокочастотные полосы с возрастающими амплитудами. Показано также влияние величины приложенного электрического поля на параметры ЭМС из системы «микродиорит – минерализованная вода».

336

При возрастании напряженности электрического поля от 10² В/м до 2.5·10² В/м пропорционально увеличивается амплитуды ЭМС и его основных спектральных полос. Выявленные закономерности изменения амплитудно-частотных параметров ЭМС при контакте минерализованных водных растворов с горными породами необходимо учитывать при разработке информационной системы мониторинга и прогноза геодинамических событий в шахтном поле рудников.

19. Для электрической составляющей электромагнитной эмиссии горных пород было показано, что амплитуда спектральных составляющих ЭМС уменьшается при увеличении предельной прочности образца. Такой эффект с большой вероятностью обусловлен возбуждением ЭМС при прохождении акустического импульса через сетку микротрещин или дефектов с двойными электрическими слоями. Показано, что увеличение удельного электрического сопротивления на 10% приводит к снижению амплитуды спектральных составляющих ЭМС почти в 4 раза.

20. Для образцов магнетитовой руды прямой зависимости амплитуды спектральных составляющих ЭМС от предельной прочности не выявлено. Малое удельное электрическое сопротивление магнетитовой руды существенно понижает накопление зарядов на двойных электрических слоях, что и приводит к снижению амплитуды ЭМС в руде. При этом в образце магнетитовой руды с незначительным содержанием кварца почти в 10 раз повышается амплитуда ЭМС. Кроме того, анализ параметров ЭМС показал, что присутствие в образцах высокопроводящего минерала магнетита приводит к снижению амплитуды в 1,5-2 раза. Была обнаружена прямая связь между удельным электрическим сопротивлением породы и количеством содержащихся в ней минералов с высокой проводимостью. Эта связь обусловлено главным образом структурно-текстурным строением породы. Если между высокопроводящими минералами, такими как магнетит, в породе с высоким удельным электрическим сопротивлением нет непосредственных контактов, и они находятся в ней в виде изолированных друг от друга включений, то проводящие включения не оказывают заметного влияния на сопротивление породы и параметры ЭМС даже при очень высокой их концентрации. Полученные результаты необходимо учитывать при разработке методов мониторинга и прогнозирования изменений напряженно-деформированного краткосрочного состояния массивов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массивов горных пород.

21. Анализ электромагнитной эмиссии при одноосном сжатии образцов горных пород позволил определить закономерные изменения амплитудно-частотных параметров сигналов. Эти изменения характеризуют этапы уплотнения, формирования очага разрушения, предшествующие разрушению и непосредственное разрушение. В спектре ЭМС всегда имеются частотные полосы характерные для разных этапов подготовки и развития разрушения

337

образцов, связанных с размерами образующихся трещин. Кроме того, на всех этапах из-за близости возникающих трещин или из-за структурно-текстурных особенностей горной породы возможно появление сигналов, обусловленных биением. При приближении к разрушению образца всегда происходит смещение спектральных составляющих в область низких частот и возрастание амплитуды спектральных полос ЭМС. Полученные закономерности изменения амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород могут быть успешно использованы для мониторинга и краткосрочного прогноза развития деструктивных зон и геодинамических событий в породных массивах.

22. Параметры амплитуды, частотного спектра, интенсивности импульсного потока электромагнитных сигналов, несут информацию о характеристиках воздействующих на гетерогенные материалы акустических импульсах и, как следствие, несут информацию о процессах подготовки и развития разрушения этих материалов. Диапазон амплитуд ЭМС, излучаемых горными породами Таштагольского рудника при импульсном акустическом воздействии, лежит в интервале от первых десятков микровольт до единиц вольт, частотный спектр – в интервале от единиц герц до единиц мегагерц, но наиболее значимыми являются частоты 1÷80 кГц, которые определяются блочностью породного массива. Изменение интенсивности импульсного потока ЭМС должно характеризовать развитие процессов подготовки разрушения горных пород или других гетерогенных материалов.

23. Установлена связь токов поляризации и характеристик электромагнитной эмиссии. Показано, что характеристики ЭМЭ существенно зависят от проводимости горной породы. Присутствие в образцах горной породы минералов с низким удельным сопротивлением оказывает существенное влияние на эффективность МЭП и, соответственно, приводит к снижению амплитуды ЭМЭ. Показано, что амплитуда и интенсивность ЭМЭ диэлектрических вмещающих горных пород и магнетитовой руды при нагружении одноосным сжатием коррелируют с токами поляризации на всех этапах возникновения деструктивных зон и их развития, включая и этап уплотнения. Процессы изменения знака поляризационных токов в магнетитовой вероятно, обусловлены совокупным влиянием руде, возникающего электрического поля за счет роста трещин, движения дислокаций и точечных дефектов и изменением направлений ориентации магнитных диполей.

24. Экспериментально показано, что при развитии деструктивных зон происходит эмиссия микрочастиц, которые могут участвовать в генерации электромагнитных сигналов на стадиях предшествующих прорастанию трещин и в момент разрушения образцов горных пород, а, следовательно, при таких же процессах и в породном массиве.

25. Установлено, что инфракрасное свечение отверстий отображает процесс подготовки разрушения горных пород и его свершение. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию для определения этапов разрушения образцов горных пород и других твердотельных материалов, в том числе со сложной структурой. В слоистых и перемешанных двух и более компонентных твердотельных материалах появляется возможность выявления пороговых значений деструкции составляющих компонент при наложении различных типов силовой нагрузки. Кроме того, ИК термографию можно успешно применять для выявления напряженных участков массива горных пород.

26. Полученные результаты исследования являются основой для построения феноменологической схемы генерации и определения параметров электромагнитных сигналов при возникновении деструктивных зон и развитии разрушения горных пород в процессе изменения их напряженно-деформированного состояния.

27. В результате проведенных исследований электромагнитной эмиссии в шахтном поле Таштагольского железорудного месторождения электромагнитной эмиссии массива горных пород было установлено, что деформирование массива горных пород при изменении его напряжённого состояния практически всегда сопровождается изменениями параметров и характеристик электромагнитного поля. Следствием этого являются механоэлектрические преобразования, сопровождающиеся импульсными электромагнитными сигналами и электромагнитной эмиссией, параметры и характеристики которых зависят от изменений НДС массива горных пород.

28. Атмосферное электричество не оказывает заметного влияния на суточный ход электромагнитной эмиссии массива горных пород в рудных шахтах глубиной более 300 метров.

29. Мониторинг изменения во времени напряженно-деформированного состояния массивов горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии предпочтительно вести на дайках, трещинах, других тектонических нарушениях и контактах пород, имеющих выход на разломы, зоны смещения и смятия, а также в места проведения технологических взрывов и ведения очистных работ.

30. Характеристики инфракрасного свечения скважин изменяются в соответствие с процессами подготовки разрушения горных пород, находящихся в меняющемся или действующем напряженно-деформированном состоянии горного массива. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию, наряду с электромагнитным профилированием, для определения мест с высоким НДС массива горных пород, а также выявлять места установки регистраторов электромагнитных сигналов типа РЭМС1 и РЭМАС1.

31. Выявление участков породного массива, находящихся в повышенном напряженнодеформированном состоянии, позволит существенно снизить количество используемых

339

регистраторов электромагнитных сигналов. Это повысит эффективность прогноза развития и проявления геодинамических событий после технологических взрывов в массиве горных пород и при проведении очистных работ.

32. При использовании метода мониторинга возникновения и развитии деструктивных зон и геодинамических проявлений по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии необходимо учитывать электрические и магнитные свойства горных пород, а также их удельную проводимость. Сравнение параметров и характеристик ЭМЭ, полученных при помощи емкостных и индукционных датчиков, показало, что индукционные датчики наиболее целесообразно устанавливать в массиве, сложенном магнетитовой рудой, обладающей магнитными свойствами и высокой проводимостью. Емкостные датчики эффективно устанавливать во вмещающих руду породах, характеризующихся высоким удельным электрическим сопротивлением.

33. Изменения характеристик электромагнитной эмиссии, возникающей вследствие механоэлектрических преобразований в горных породах, отображают изменения напряженно - деформированного состояния породного массива. Измерения интенсивности и амплитуды ЭМЭ горных пород в условиях шахт позволяет определять реальные времена подготовки геодинамических событий и их проявления, а также выявлять особенности перераспределения НДС массива. Знание этих особенностей позволит правильно и эффективно осуществлять управлением разгрузкой массива горных пород с целью профилактики безопасного ведения разведочных, проходческих, очистных и строительных работ.

34. Выявлено три основных временных процессов изменения НДС после взрыва, которые проходят в течение секунд, минут и часов. Первое из них это взрывное изменение НДС горного массива в течение первых двух десятков секунд и прохождение «горного удара» с задержкой в течение десятков секунд. Затем последующая в течение нескольких минут релаксация возбужденного состояния массива после «горного удара». В отсутствии «горного удара» релаксация может продолжаться в течение нескольких часов. При этом возможно повторное возбуждение массива за счет протекания геодинамических смещений и проявлений, которое может длиться во времени до 17 и более часов. При этом нарастание возбужденного состояния в течение 1-2 часов с возвратом в течение часа в относительно устойчивое состояние на новом стабилизированном уровне.

35. Результаты исследований и совместного анализа электромагнитной и акустической эмиссии горных пород, спектральных параметров электромагнитных сигналов, данных сейсмических наблюдений до технологических взрывов, в период их проведения и при релаксации породного массива в разные времена года показали связь изменений напряженно-

340

деформированного состояния породного массива, характеристик и параметров ЭМЭ горных пород.

36. Из результатов наблюдений следует, что по амплитудно-частотным параметрам электромагнитных сигналов горных пород можно судить о развитии трещинообразования и, соответственно, о развитии деструктивных зон и динамике массива.

37. Сезонные измерения с целью изучения влияния влажности на показатели электромагнитной активности в шахтном поле Таштагольского месторождения в период релаксации породного массива показали, что на характеристики регистрируемой электромагнитной эмиссии влажность в шахтном поле рудника оказывает влияние в большей степени по электрической составляющей электромагнитного поля и в меньшей степени на показания по индукционной составляющей.

38. Для объективного представления об изменении напряженно-деформированного состояния массива, образования деструктивных зон и их развития, проявления геодинамических событий по характеристикам электромагнитной эмиссии важным является расположение зон и центров событий по отношению к месту нахождения регистраторов ЭМЭ.

39. Проведенные натурные исследования показали, что объективно существует связь между сейсмическими событиями в шахтном поле рудника, электромагнитной и акустической эмиссией горных пород как накануне события, так и в момент времени его прохождения. В районах шахтного поля, где проводился мониторинг, зарегистрированы изменения ЭМС, которые связаны с формированием деструктивных зон в исследуемых участках.

40. При проведении мониторинга выявлено, что все сейсмические события фиксируются приборами РЭМС1 и РЕМАС1 по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий.

41. Проведенные натурные исследования показали, что выбранный при проектировании автономных регистраторов диапазон частот от 1.0 до 100 кГц для мониторинга образования деструктивных зон и развития геодинамических событий в шахтном поле рудника с прочными и упругими горными породами является наиболее информативным и достаточным.

42. Модельные эксперименты, показавшие уменьшение амплитуды ЭМЭ от последующих ударов, равных по энергии первоначальным ударам, позволили объяснить явление плавного изменения параметров электромагнитной эмиссии после некоторых мощных технологических взрывов. Это указывает на то, что после взрыва происходит медленное сдвижение массива горных пород с разной скоростью и с перераспределением НДС по разломам и другим плоскостям скольжения. Наблюдающиеся пиковые значения амплитуды ЭМЭ отображают наиболее мощные по энергии сколы при перемещении породной массы или ускоренное их сдвижение в этот промежуток времени.

43. Используя данные по связи изменений НДС и характеристик ЭМЭ возможно уже на стадии предварительной обработки данных мониторинга параметров и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород судить о развитии деструктивных зон и геодинамических проявлений.

44. На основе проведенных исследований в шахтном поле Таштагольского месторождения разработан алгоритм и схема проведения мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий, включая инфракрасное свечение скважин.

45. Разработанный алгоритм позволяет выявлять во временных рядах измерений амплитуд ЭМЭ особенности, характерные для этапа, предшествующего разрушению лабораторных образцов горных пород. Кроме того, данный алгоритм может быть успешно использован в составе программного обеспечения информационной системы, которая предназначена для мониторинга изменения НДС массивов горных пород и прогноза удароопасности по параметрам и характеристикам ЭМЭ после технологических взрывов и проведения очистных работ в рудниках.

46. Создан и апробирован в шахтных условиях Таштагольского месторождения макет информационной системы для передачи данных от регистратора на удаленный компьютер. В качестве первичного приемника информации об электромагнитных и акустических сигналах массива горных пород предполагается использовать программно-аппаратный регистратор РЭМАС1.

Таким образом, проведенные теоретические, лабораторные и натурные исследования параметров и характеристик электромагнитной эмиссии показали, что для разработки и создания метода мониторинга и краткосрочного прогноза развития геодинамических явлений в подземных сооружениях по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии выполнены все поставленные задачи.

1. Созданы комплексные методы мониторинга и прогноза развития деструктивных зон и геодинамических явлений по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии горных пород, в том числе с использованием ИК радиометрии.

2. Разработаны приборы и средства мониторинга для исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии гетерогенных материалов и горных пород:

 в лабораторных условиях при акустическом возбуждении и одноосном сжатии, в том числе при приложении электрических или магнитных полей; – в натурных условиях шахты непрерывно до 170 часов при возбуждении взрывом массива горных пород, в том числе до взрыва, во время его проведения и в период релаксации механических напряжений в породном массиве.

3. На основании лабораторных и натурных исследований с применением созданных регистраторов электромагнитной и акустической эмиссий РЭМС1 и РЭМАС1 разработан метод для мониторинга и контроля развития деструктивных зон и геодинамических процессов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массива горных пород, а также макет информационной системы такого мониторинга.

4. Математически смоделирован и экспериментально определен спектр амплитудночастотный параметров электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом воздействии на образцы с различными структурными особенностями, электрическими, сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами, при поляризации образцов и приложении электрического и магнитного полей, а также образцов, контактирующих с солевыми водными растворами.

5. Экспериментально выявлены закономерные связи амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии образцов горных пород на разных этапах подготовки и развития разрушения одноосным сжатием.

6. Разработаны способы выявления наиболее эффективных мест установки приборов электромагнитного мониторинга геодинамической обстановки в натурных условиях шахтного поля рудников.

7. Разработана феноменология возникновения и развития геодинамических явлений в массивах горных пород при взрывных воздействиях. Для чего установлены закономерные связи изменений напряженно-деформированного состояния горных пород с амплитудно-частотными параметрами электромагнитных сигналов и характеристиками электромагнитной эмиссии породного массива. На основании полученных закономерностей определены диапазоны наиболее эффективных частот для мониторинга образования и развития геодинамических проявлений различного характера.

8. Разработаны алгоритм и схемы информационной системы мониторинга и краткосрочного прогноза развития геодинамических событий по параметрам ЭМС и характеристикам ЭМЭ массива горных пород.

343

Список сокращений и условных обозначений

- МЭП механоэлектрические преобразования;
- ЭМС электромагнитные сигналы;
- АС акустические сигналы;
- ЭМО электромагнитный отклик;
- ЭМИ электромагнитное излучение;
- ЭМЭ электромагнитная эмиссия;
- АЭ акустическая эмиссия;
- АЧС амплитудно-частотный спектр;
- НДС напряженно-деформированное состояние;
- ЩГК щелочно-галоидные кристаллы;
- РЭМС1 марка регистратора электромагнитных и акустических сигналов;
- РЭМАС1 марка регистратора электромагнитных и акустических сигналов;
- ДЕП датчик емкостной навесной;
- ДИП датчик индукционный навесной;
- ПАИ пьезоэлектрический излучатель АС;
- ПАП пьезоэлектрический приемник АС;
- АП акустический приемник;
- ДУ дифференциальный усилитель;
- БДА блок дополнительных аккумуляторов;
- БП блок питания;
- ФНЧ фильтр нижних частот;
- ФВЧ фильтр верхних частот;
- П унифицированные согласующие усилители тока;
- Φ частотные фильтры;
- И индикаторы на дисплее регистратора;
- У усилители;
- ЗУ запоминающее устройство;
- С счетчик сигналов;
- Д дисплей;
- К клавиатура;
- Ч блок реального времени;
- К_у-коэффициент усиления;
- ФД фотодиод;

- СД светодиод;
- ПК персональный компьютер;
- БУ блок управления;
- НУ насосная установка;
- ДД датчик давления;
- ДП датчик перемещения;
- СК сервоклапан;
- ВВ взрывчатое вещество;
- ТВ технологических взрыв;
- ГУ горный удар;
- ИК инфракрасное излучение;
- АЦП аналого-цифровой преобразователь;
- ЦСП цифровой сигнальный процессор;
- ЖКИ жидкокристаллический индикатор;
- ОС операционная система;
- ПО программное обеспечение;
- БПФ быстрое преобразование Фурье;
- РВИНДС радиоволновой индикатор напряженно-деформированного состояния;
- АИП анализатор импульсного потока;
- Кр/кр крупнокристаллический;
- М/кр мелкокристаллический;
- ПММА полиметилметакрилат;

ПНИЛ ЭДиП ТПУ – Проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники, диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета.

Словарь терминов

Орт – горизонтальная подземная горная выработка, не имеющая непосредственного выхода на поверхность и проведённая по рудному телу в крест простирания залежи полезного ископаемого.

Штрек – горная выработка, не имеющая непосредственного выхода на земную поверхность, лежащая в горизонтальной плоскости и проходящая по простиранию рудного тела.

Дайка – интрузивное тело с секущими контактами, длина которого во много раз превышает ширину, а плоскости эндоконтактов практически параллельны.

Проходка – горная выработка для добычи полезных ископаемых.

Забой – передвигающаяся в пространстве поверхность полезного ископаемого или вмещающих его пород, с которой непосредственно осуществляется их выемка.

Призабойный массив – пространство, примыкающее к забою горной выработки, в котором находятся забойные проходческие или выемочные машины, средства доставки, забойная крепь, а также обслуживающий персонал.

Горный удар – хрупкое разрушение предельно напряжённой части пласта или блока породы, прилегающей к горной выработке, возникающее в условиях, когда скорость изменения напряжённого состояния в этой части превышает предельную скорость релаксации напряжений в ней.

Стреляние горных пород – это быстрое откалывание и отскакивание кусков породы от обнаженной поверхности в горных выработках, сопровождающееся звуковым эффектом и возникающее вследствие их хрупкого разрушения при соответствующем напряженном состоянии.

Толчки – принято называть горные удары, проявляющиеся в разрушении горных пород и полезного ископаемого за пределами контуров выработок на некоторой глубине в толще пород, без их выброса в горную выработку.

Горно-тектонический удар – вызывается воздействием энергии сейсмических волн от толчкообразного деформирования горного массива, в том числе техногенных землетрясений, и проявляется в виде горных ударов на нескольких участках шахтного поля или группы шахт. Горно-тектонический удар сопровождается сильными сотрясениями массива, резким звуком, образованием пыли и воздушными волнами.

Зенитный угол – представляет собой измеренный в градусах угол, на который ствол скважины или ось геодезического прибора отклоняется от строгой вертикали. Наклон 0° соответствует строгой вертикали, наклон 90° соответствует строгой горизонтали. В нашем случае – это отклонение события в градусов от вертикали, проведенной от места расположения регистратора, и места события, координаты которого определены сейсмостанцией.

Декрипитация – это свойство некоторых минералов растрескиваться и разрушаться при нагревании и последующем охлаждении.

Список литературы

Авершин, С.Г. Сдвижение горных пород при подземных разработках / С.Г. Авершин.
 - М: Углетехиздат, 1947. – 245 с.

2. Авершин, С.Г. О природе горного удара в выработках/ С.Г. Авершин, В.Н. Мосинец, Г.П. Черепанов// ДАН СССР. – 1972. – Т. 204, №3. – С. 569-571.

3. Опарин В.Н. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования/ Опарин В.Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.– 499 с.

4. Рудные месторождения СССР: под ред. акад. АН СССР Смирнова В.И. – М.: Недра, 1974. – Т. 1. – 328 с.

5. Железорудные месторождения Алтай – Саянской горной области: под ред.: акад. АН СССР И. П. Бардина и др.]. – М.: АН СССР, 1959. – 624 с.

6. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 112 с.

7. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях Горной Шории, склонных к горным ударам. – Новокузнецк: ВостНИГРИ, ВНИМИ, 1991. – 90 с.

8. Егоров, П.В. Управление состоянием массива горных пород на рудниках Горной Шории/ П.В. Егоров, Ю.А. Шевелев, И.Ф. Матвеев, Н.И. Скляр, В.А. Квочин. – Кемерово, 1999. – 257 с.

9. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика /Под редакцией Н.Б. Дортман, – 2–е изд. – М: Недра, 1984. – 455 с.

10. Курленя, М.В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири/ М.В. Курленя, А.А. Еременко, Б.В. Шрепп. – Нсб: Наука, 2001. – 184 с.

11. Квочин, В.А. Управление сдвижением и удароопасностью горного массива при разработке железорудных месторождений Сибири на основе изучения их геодинамики: дис. в виде науч. доклада. ... д-ра. тех. наук: 05.15.01 /Квочин Валерий Александрович. ВостНИГРИ – Новокузнецк, 2000. – 78 с.

12. Yamada, I. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture / I. Yamada, K. Masuda, H. Mizutani // Phys. Earth Planet. Int. – 1989. – Vol. 57, № 1-2. – P. 157-168.

 Sklarczyk, C. Die elektrische emission beim versagen von faserverbundwerkstoffen und ihren komponenten / C. Sklarczyk, S. Winkler, B. Thielicke, // Mat. Wiss. Werkstofftech. – 1996. – Vol. 27. – P. 559–566.

14. Яворович, Л.В. Исследование амплитуды электромагнитного сигнала при ударном воздействии на образцы горных пород с различной пористостью/ Л.В. Яворович, Р.М. Гольд,

В.В. Ласуков //Физико-технические проблемы разведки полезных ископаемых. – 1999. – №6. –
 С. 33-39.

15. Frid, V. Fracture induced electromagnetic radiation / V. Frid, A. Rabinovitch, D. Bahat // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2003. – Vol. 36, № 13. – P. 1620–1628.

16. Беспалько, А.А. Влияние электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии / А.А. Беспалько, Р.М. Гольд, Л.В. Яворович // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7, №5. – С.95-99.

17. Sedlak, P. Acoustic and electromagnetic emission as a tool for crack localization / P. Sedlak, J. Sikula, T. Lokajicek, Y. Mori // Meas. Sci. Technol. – Vol.19, №4. – P. 1-7. DOI: 10.1088/0957-0233/19/4/045701.

18. Koktavy, P. Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources / P. Koktavy, J. Pavelka, J. Sikula // Meas. Sci. Technol. – 2004. – Vol. 15. – P. 973–977.

19. Беспалько, А.А. Экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитной эмиссии в неоднородных диэлектрических материалах/ А.А. Беспалько, Р.А. Кузьминых, Б.А. Люкшин, Г.Е. Уцын, Л.В. Яворович // Известия Высших учебных заведений. Физика. – 2007. – №2. – С. 16-22.

20. Misra, A. A theoretical model for the electromagnetic radiation emission during plastic deformation and crack propagation in metallic materials / A.A. Misra, R.C. Prasad, V.S. Chauhan, B. Srilakshmi // Int. J. Fract. – 2007. – Vol. 2. – P. 99-121.

21. Koshevaya, S. Electromagnetic emission from magnetite plate cracking under seismic processes / S. Koshevaya, V. Grimalsky, N. Makarets, A. Kotsarenko, J. Siquieros-Alatorre, R. Perez-Enriquez, D. Juarez-Romero // Adv. Geosci. – 2008. – Vol. 14. – P. 25-28.

22. Koktavy, P. Experimental study of electromagnetic emission signals generated by crack generation in composite materials / P.Koktavy // Meas. Sci. Technol. – 2009. – Vol. 20. – P. 1-8.

23. Lacidogna, G. Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes / G. Lacidogna, A. Carpinteri, A. Manuello, G. Durin, A. Schiavi, G. Niccolini, A. Agosto // Strain. – 2010. – Vol. 47. – P. 144–152.

24. Курдюмов, Г.В. Развитие учения о прочности и пластичности твердых тел (обзор работ А.В. Степанова)/ Г.В. Курдюмов, М.В. Классен–Неклюдова // УФН. –1973. – Т.111, вып.3. – С. 525-534.

25. Fischbach, D.B./ D.B.Fischbach, A.S. Nowick // Phys. Rev. – 1955. – Vol. 98. – Р. 1543 (В статье Корнфельд М.И. Электризация ионного кристалла при пластической деформации и расщеплении/ М.И.Корнфельд// – УФН. – 1975. – Т.116, вып.2. – С.327-339).

26. Caffin, I.E./ I.E. Caffin, T.L. Goodfel // Nature. – 1955. – Vol. 176. – Р. 878. (В статье Корнфельд М.И. Электризация ионного кристалла при пластической деформации и расщеплении /Корнфельд М.И.// – УФН. – 1975. – Т.116, вып.2. – С.327-339).

Воробьев, А.А. О возможности возникновения электрических разрядов в недрах
 Земли / А.А. Воробьев // Геология и геофизика. – 1970. – №12. – С. 3-14.

28. Воробьев, А.А. Наблюдения радиоволн и аномальные изменения электропроводимости при нагревании образцов горных пород и минералов / А.А. Воробьев, В.Н. Сальников // ФТПРПИ. – 1976. – N 5. – C.3-15.

29. Воробьев, А.А. Наблюдение электромагнитных и электрических явлений в образцах горных пород при нагревании/ А.А. Воробьев, А.А. Беспалько В.Г. Качковский, В.Н. Сальников// Сб. Физ. свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. – Тбилиси, 1974. – С.115-118.

30. Воробьев, А.А. О природе электромагнитных волн, излучаемых горными породами при их нагружении / А.А. Воробьев, В.Ф. Ширяев, Л.А. Защинский, В.Д. Евсеев //Проблемы нефти и газа Тюмени. – 1974. – Вып.4. – С. 77-80.

31. Гольд, Р.М. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подвергнутых механическому нагружению/ Р.М. Гольд, Г.П. Марков, П.Г. Могила, М.А. Самохвалов //Известия АН СССР. Физика Земли. – 1975, № 7. – С. 109-111.

32. Галусташвили, М.В. Электрические эффекты при пластической деформации кристаллов LiF/ М.В. Галусташвили //Физика твердого тела. – 1970. – Т.12, в.4. – С.1263 -126.

33. Хатиашвили, Н.Г. Электрические явления при деформировании и разрушении горных пород/ Н.Г. Хатиашвили // Сб. Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. – Тбилиси: Мецниереба, 1974. – С.290 - 293.

34. Беляев, Л.М. Об электромагнитных процессах, сопровождающих образование новых поверхностей в щелочногалоидных кристаллах/ Л.М. Беляев, Ю.Н. Мартышев, Ю.Я. Яшин //Сб. Механоэмиссия и механохимия твердых тел. – Фрунзе: Илим. – 1974. – С.121-125.

35. Воробьев, А.А. Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов при физико-химических процессах в них/ А.А. Воробьев, Е.К. Завадовская, В.Н. Сальников //ДАН СССР. – 1975. – Т.220, № 1. – С.82-85.

36. Тюрикова, Л.А. Исследование параметров радиоизлучения при нарушении адгезии полимер - твердое тело / Л.А. Тюрикова, Б.Г. Авербух, Н.И. Москвитин, Н.А. Кротова //ДАН СССР. – 1971. – Т.201, №4. – С.833-836.

37. Гохберг, М.Б. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры/ М.Б.
 Гохберг, И.А. Гуфельд, Н.И. Гершензон //Известия АН СССР. Физика Земли. – 1985. – №1. – С.
 72-87.

38. Егоров, П.В. Метод бесконтактного прогноза динамических форм проявления горного давления/ П.В. Егоров, В.П. Корнейчиков, А.Ф. Горелкин // Шахтная геофизика и геология. Тр. ВНИМИ. – 1978. – №110. – С. 35-39.

39. Воробьев, А.А. Наблюдение излучения горных пород /А.А. Воробьев, И.С. Дмитриевский, Е.К. Заводская, Б.Н. Приезжаев, В.Н. Сальников // Сб. Вопросы геологии Сибири. – Томск, 1971. – С. 16-22.

40. Финкель, В.М. Заряжение берегов трещины и работа разрушения щелочногалоидных кристаллов/ В.М. Финкель, Ю.И. Тялин, А.Н. Колодин //ФТТ. – 1986. – Т. 28, №9. – С. 2908-2911.

41. Молоцкий, М.И. Дислокационный механизм электризации ионных кристаллов при расщеплении/ М.И. Молоцкий // ФТТ. – 1986. – Т. 18, № 6. – С. 1763-1764.

42. Гершензон, Н.И. Электромагнитное излучение вершины трещины при разрушении ионных кристаллов/ Н.И. Гершензон, Д.О. Зилпилшани, П.В. Манджгаладзе и др. //ДАН СССР. – 1986. – Т. 228, № 1. – С. 75-78.

43. Урусовская, А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов/ А.А. Урусовская // Успехи физических наук. – 1968. – Т.86, №1. – С. 39-60.

44. Финкель, В.М. Физические основы торможения разрушения/ В.М. Финкель. – М.: Металлургия, 1977. – 359 с.

45. Дерягин, Б.В. Адгезия. Исследования в области прилипания и клеящего действия// Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова. – М.: Изд-во АН СССР, 1946. – 244 с.

46. Хатиашвили, Н.Г. Об электромагнитном эффекте при трещинообразовании в щелочно–галоидных кристаллах и горных породах/ Н.Г. Хатиашвили // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1984. – №9. – С.13-19.

47. Иванов, В.В. Динамика трещин и электромагнитное излучение нагруженных горных пород/ В.В. Иванов, П.В. Егоров, Л.А. Колпакова, А.Г. Пимонов // ФТПРПИ. – 1988. – №5. – С. 20-27.

48. Головин, Ю.И. Быстропротекающие процессы и динамика дислокаций в пластически деформируемых щелочно-галоидных кристаллах/ Ю.И. Головин, А.А. Шибков // ФТТ. – 1986. – Т.28, №1. – С. 3492-3499.

49. Мирошниченко, М.И. Излучение импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках/ М.И. Мирошниченко, В.С. Куксенко //ФТТ. – 1980. – Т.22, №5. – С. 1531-1533.

50. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов/ А.А. Урусовская // УФН. – 1968. – Т. 96, в.1. – С. 39-48.

51. Корнфельд, М.И. Электризация ионного кристалла при пластической деформации и расщеплении/ М.И. Корнфельд //УФН. – 1975. – Т.116, № 2. – С. 327-340.

52. Финкель, В.М. Электризация щелочно-галоидных кристаллов в процессе скола/
В.М. Финкель, Ю.И. Тялин, Ю.И. Головин, Л.Н. Муратова, М.В. Горшенев // ФТТ. – 1979. –
Т.21, №7. – С. 1943-1947.

53. Перельман, М.Е. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков/ М.Е. Перельман, Н.Г. Хатиашвили // ДАН СССР. – 1981. – Т.256, №4. – С. 824-826.

54. Вишневская, Н.Л. Расчет напряженности самосогласованного электрического поля, возникающего в диэлектрике при механическом воздействии/ Н.Л. Вишневская, Л.А. Защинский // Известия ВУЗов. Физика. – 1977. – №5. – С.71-74.

55. Воробьев, А.А. Электромагнитные поля деформируемых образцов кварцевой керамики/ А.А. Воробьев, Ш.Р. Мастов, В.Ф. Гордеев //Томск, ТПУ. – 1979. – 14 с.- Деп. В ВИНИТИ 14.01.80, №1219-80.

56. Дерягин, Б.В. Адгезия твердых тел/ Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова, В.П. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 280 с.

57. Гуфельд, И.Л. Электрическая прочность субмикронных зазоров/ И.Л. Гуфельд, В.В. Постнов, Я.Г. Давидович//Письма в ЖТФ. – Т.1, № 4. – С. 161-166.

58. Воробьев, А.А. Заряжение стенок трещины диэлектрика в неоднородном поле механических напряжений/ А.А. Воробьев, А.Г. Иванчин // Сб. V Всесоюзный симпозиум по механоэмиссии и механохимии твердых тел, 1975. Т.1.: – Таллин, 1977. – С. 188-193.

59. Сальников, В.Н. Исследование свечения и электрических явлений, вызванных нагреванием некоторых минералов в вакууме/ В.Н. Сальников, Ю.М. Страгис, А.А. Беспалько// Сб. IV Всесоюзного симпозиума по механоэмиссии и механохимии твердых тел. – М., 1973. – С. 70-71 с.

60. Пархоменко, Э.И. Явления электризации в горных породах/ Э.И. Пархоменко. – М.: Наука, 1968. – 255 с.

61. Пархоменко, Э.И. Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах/ Э.И. Пархоменко, А.Т. Бондаренко. – М.: Наука, 1972. – 279 с.

62. Lewis, D.R. Exoelectron-emission phenomena and geological applications/ D.R. Lewis // Bull. Geol. Soc. – 1966. – Vol. 77. – P. 761–769.

63. Кишш, И. Исследование электрических эффектов, возникающих при локальном деформировании кристаллов LiF / И. Кишш// Кристаллография. – 1965. – Т.10, №6. – С. 890-895.

64. Шевцов, Г.И. Взаимосвязь напряженного состояния и трещиноватости горных пород с их электризацией/ Г.И. Шевцов, В.Е. Ольховатенко, И.Ф. Антонов //Отражение современных полей напряжений и свойств горных пород в состоянии скальных массивов. – Апатиты, 1977. – С.112-113.

65. Соболев, Г.А. Электризация полевых шпатов при их деформировании и разрушении
/ Г.А. Соболев, Г.И. Шевцов, Н.И. Мигунов, Э.В. Козлов // ДАН. – 1975. – Т. 225, №2. – С.313-315.

66. Хатиашвили, Н.Г. Электрические явления при деформации и разрушении горных пород: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.: 01.04.12/ Хатиашвили Нодар Георгиевич. – М. 1974. – 25 с.

67. Воробьев, А.А. Импульсное электромагнитное поле, возникающее при деформациях грунтов в лабораторных условиях/ А.А. Воробьев, Л.А. Защинский, С.Г. Надежкин, В.Ф. Ширяев //ФТПРПИ. – 1981. – №5. – С. 119-120.

 Катиашвили, Н.Г. Электромагнитное излучение ионных кристаллов, стимулированных акустической волной/ Н.Г. Хатиашвили //Письма в ЖТФ. – 1981. – Т.7, в. 18. – С. 1128-1132.

69. Хатиашвили, Н.Г. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы/ Н.Г. Хатиашвили, М.Е. Перельман //ДАН. – 1982. – Т.263, №4. – С. 839-842.

70. Воробьев, А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах/ А.А. Воробьев. – Томск: Изд-во ТГУ, 1980. – 211 с.

71. Воробьев, А.А. Применение метода счета частичных разрядов в геологии/ А.А. Воробьев, Е.К. Завадовская, Б.Н. Приезжев, В.Н. Сальников // Сб. Вопросы геологии Сибири. – Томск: Изд. ТГУ, 1971 – С. 234-235.

72. Арефьев, К.П. Термостимулированные электромагнитные явления в кристаллах и гетерогенных материалах./под ред. М.В. Кабанова/ К.П. Арефьев, С.Д. Заверткин, В.Н. Сальников. – Томск: STT, 2001. – 400 с.

73. Гохберг, М.Б. Электромагнитные предвестники землетрясений/ М.Б. Гохберг, И.А. Гуфельд, И.П. Добровольский и др. – М: Наука, 1982. – 88 с.

74. Гохберг, М.Б. Сейсмоэлектромагнитные явления/ М.Б. Гохберг, В.А. Моргунов, О.А. Похотелов. – М.: Наука, 1988. – 174 с.

75. Ласуков, В.В. Аэрозольный механизм генерирования аномалий в электромагнитном поле Земли/ В.В. Ласуков // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1993. –№7. – С.81-82.

76. Ласуков, В.В. Озонный, перколяционный и аэрозольный механизмы электромагнитного предвестника землетрясений/ В.В. Ласуков //Известия ВУЗов. Физика. – 2000. – №2. – С. 64-70.

77. Гульельми, А.В. Электромагнитный сигнал из очага землетрясения/ А.В. Гульельми,
 В.Т. Левшенко // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1997. – №9. – С.22-30.

Гульельми, А.В. Инерционный механизм генерации сейсмоактивных сигналов/ А.В.
 Гульельми, В.Т. Левшенко // ДАН. – 1993. – Т.329. – С. 432-434.

79. Gershenzon, N.I. On the electromagnetic field of an earthquake focus/ N.I. Gershenzon,M.B. Gokhberg, S.L. Yanga // Phys. Earth Planet Interiors. – 1993. – Vol.77. – P. 13-19.

80. Тарасов, Б.Г. Геотектонические процессы и аномалии квазистационарного электрического поля в земной коре/ Б.Г. Тарасов, В.В. Дырдин, В.В. Иванов // ДАН СССР. – 1990. – Т.312, №5. – С. 1092-1095.

81. Алексеев, Д.В. Механизм формирования квазистационарного электрического поля в нагруженных горных породах/ Д.В. Алексеев, В.В. Иванов, П.В. Егоров // ФТПРПИ. – 1993. – №2. – С. 3-6.

82. Алексеев, Д.В. Баратоки в твердых телах с диффузионным механизмом проводимости/ Д.В. Алексеев // ФТТ. – 1991. – Т.33, №10. – С. 2828-2834.

83. Алексеев, Д.В. Баратоки в пьезоэлектриках с диффузионным механизмом проводимости/ Д.В. Алексеев // ФТТ. – 1992. – Т.34, №12. – С. 3663-3670.

84. Dickinson, J.T. Simultaneous measurements of the electron and photon emission accompanying fracture of single-crystal MgO/ J.T. Dickinson, S.C. Langford, L.C Jensen //Journal of Applied Physics. – 1987. – Vol. 62, №4. – P. 1437-1449.

85. Enomoto, Y. Emission of charged particles from indentation fracture of rocks/ Y. Enomoto, H. Hashimoto //Nature. – 1990. – Vol. 346. – P. 641–643.

86. Nitsan, U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks/ U. Nitsan //Geophysical Research letters. – 1977. – Vol.4, №8. – P. 333–336.

87. Warwick, J.W. Radio emission associated with rock fracture: Possible application to the Great Chilean Earthquake of May 22, 1960/ J.W. Warwick, C. Stoker, T.R. Meyer // J. Geophys. Res. – 1982. – Vol.87, №4. – P. 2851-2859.

88. Фурса, Т.В. Источники акустоэлектрических преобразований в бетонах / Т.В. Фурса, Н.Н. Хорсов, Е.А. Батурин // ЖТФ. – 1999. – Т. 69, № 10. – С. 51-55.

89. Khatiashvili, N.G. On the electromagnetic effect induced by crack formation in alkali halide crystals and rocks/ N.G. Khatiashvili //Gerlands Beitrage zur Geophysik. – 1984. – Vol.93, № 2. – P. 107-115.

90. Ogawa, T. Electromagnetic radiations from rocks/ T. Ogawa, K. Oike, T. Miura //J. Geophys. Res. – 1985. – Vol. 90. – P. 6245-6249.

91. O'Keefe, S.G. A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials/ S.G. O'Keefe, D.V. Thiel //Phys. Earth and Planet. Inter. – 1995. – Vol. 89, №11. – P. 127-135.

92. Yoshida, S. Convection current generated prior to rupture in saturated rocks/ S. Yoshida //J. Geophys. Res. - 2001. - Vol.106 (B2). - P. 2103-2120.

93. King, O. Earthquake prediction: Electromagnetic emissions before earthquakes/ O. King.
 – 1983. – 377 p.

94. Hayakawa, M. On the possible influence of seismic activity on the propagation of magnetospheric whistlers at low latitudes / M. Hayakawa, T. Yoshinoa, V.A. Morgounov // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1993. – Vol. 77, №1/2. – P. 97-108.

95. Ueda, S. Evaluation of VAN Method: Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes/ S. Ueda, K.S. Al-Damegh. – Tokyo: Masashi Hayakawa. Terra Scientific Pub. Co., 1999. – 996 p.

96. Frid, V. Rockburst Hazard Forecast by Electromagnetic Radiation Excited by Rock Fracture/ V. Frid // J. Rock Mech. and Rock Eng. –1997. – Vol. 30, №4 – P. 229-236.

97. Frid, V. Electromagnetic radiation associated with induced triaxial fracture in granite. // V. Frid, A. Rabinovitch, D. Bahat, // Philosophical Magazine Letters – 1999. – Vol.79, №2. – P. 79-86.

98. Frid, V. Electromagnetic radiation method water-infusion control in rockburst-prone strata / V. Frid // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol. 43, № 1. – P. 5-13.

99. Frid, V. Calculation of electromagnetic radiation criterion for rockburst hazard forecast in coal mines / V. Frid // Pure applied geophysics. – 2001. – Vol. 158. – P. 931-944.

100. Sakai, H. Electromagnetic Changes Detected at Explosion Seismic Experiment / H. Sakai, T. Nakayama and H. Doi //J. Phys. Earth. – 1992. – Vol.40. – P. 447-58.

101. Tomizawa, I. Generation Mechanism of Electric Impulses Observed in Explosion Seismic Experiments / I. Tomizawa, I. Yamada // J. Geomagn. Geoelect. – 1995. – Vol. 47. – P. 313-24.

102. Rabinovitch, A. Similarity and dissimilarity of electromagnetic radiation from carbonate rocks under compression, drilling and blasting / A.Rabinovitch, D. Bahat, V. Frid // J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39, №1. – P. 125-129.

103. Misra, A. Theoretical study of the fracture-induced magnetic effect in ferromagnetic materials / A. Misra // Physics Letters. – 1977. – Vol.62A, № 4. – P. 234-236.

104. Misra, A. Electromagnetic radiation characteristics during fatigue crack propagation and failure / A. Misra, S. Gosh // Appl. Phys. – 1980. – Vol.23. – P. 387-390.

105. Молоцкий, М.И. Дислокационный механизм эффекта Мисры/ М.И. Молоцкий// Письма в ЖТФ. – 1980. – Т.6, вып. 1. – С. 52-55.

106. Jagasivamani, V. Electromagnetic emission during the fracture of heat-treated spring steel / V. Jagasivamani, K. Iyer // Mater. Lett. – 1988. – Vol. 6. – P. 418-422.

107.Финкель В.М. Электрические эффекты при разрушении кристаллов LiF в связи с проблемой управления трещиной./ В.М. Финкель, Ю.И. Головин, Б.Е.Середа, Г.П. Куликова., Л.Б. Зуев// ФТТ. – 1975. – Т.17, № 3. – С. 770-776.

108. Tetelman, A.S., McEvly A.J. Fracture of Structural Materials/ A.S. Tetelman, A.J. McEvly. – New York: Willey, 1967. – P. 697.

109. Petrenko V.F. On the nature of electrical polarization of materials caused by cracks, application to ice/ V.F. Petrenko// Phil. Mag. B. – 1993. – Vol. 67, N_{2} 3. – P. 301-315.

110. Грешников, В.А. Акустическая эмиссия/ В.А. Грешников, Ю.В. Дробот. – М.: Издво стандартов, 1976. – 276 с.

111. Хаттон, Р.Х. Акустическая эмиссия/ Р.Х. Хаттон, Р.Н. Орд. Сб. Методы неразрушающих испытаний. – М.: Мир, 1972. – С. 27-58.

112. Корнейчиков, В.П. Исследование механизма формирования электромагнитного излучения горных пород в связи с прогнозированием землетрясений: автореф. дис. ...канд. физ.-мат. Наук: 01.04.12/Корнейчиков Владимир Петрович. – Троицк, 1985. – 17 с.

113. Ямщиков, В.С. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти / В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник, Г.К. Лыков // ФТПРПИ. – 1990. – №2. – С. 23-28.

114. Егоров, П.В. О некоторых закономерностях импульсного электромагнитного излучения ЩГК и горных пород/ П.В. Егоров, В.В. Иванов, Л.А. Колпакова // ФТПРПИ. – 1988. – №1. – С. 67-70.

115. Кузнецов, С.В. Совместная регистрация электромагнитных и сейсмоакустических сигналов/ С.В. Кузнецов //Геофизические способы контроля напряжений и деформаций: Сб. научных трудов. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985. – С. 31-34.

116. Курленя, М.В. Оценка длительности сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород / М.В. Курленя, А.Г. Вострецов, Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковицкая // ФТПРПИ. – 1999. – №4. – С. 61-65.

117. Касьян, М.В. Изменение спектров эмиссионных сигналов при развитии трещин и разрушении горных пород / М.В. Касьян, В.А. Робсман, Г.Н. Никогосян // ДАН СССР. Геофизика. – 1989. – Т.306, №4. – С. 826-830.

118. Гуфельд, И.Л. Характеристики источников электромагнитного излучения в массиве горных пород / И.Л. Гуфельд, Н.Н. Никифорова, А.А. Рожной, Г.Е. Яковицкая и др. // Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород: Сб. науч. тр. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 70-77.

119. Гохберг, М.Б. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений/ М.Б. Гохберг. – М.: ИФЗ АН СССР, 1988. – 244 с.

120. Курленя, М.В. Стадийность процесса разрушения на основе исследования ЭМИизлучения / М.В. Курленя, Г.Е. Яковицкая, Г.И. Кулаков // ФТПРПИ. – 1990. – №1. – С. 44-49.

121. Тамм, И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. – М.: Наука, 1989. – 504 с.

122. Вострецов, А.Г. Прогнозирование разрушения горных пород по спектральным характеристикам сигналов электромагнитного излучения / А.Г. Вострецов, Г.И. Кулаков, Ю.А. Тимоненков, Г.Е. Яковицкая // ФТПРПИ. –1998. – №4. – С. 21-25.

123. Иванов, В.В. Статистическая модель ЭМЭ из очага разрушения в массиве горных пород / В.В. Иванов, А.Г. Пимонов // ФТПРПИ. – 1990. – №2. – С. 53-56.

124. Опарин, В.Н. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристики объектов геосреды / В.Н. Опарин, В.Ф. Юшкин, А.А. Акинин, Е.Г. Балмашнова // ФТПРПИ. – 1998. – №5. – С. 16-32.

125. Дмитриев, А.П. Исследование разрушения породных целиков в температурных полях /А.П. Дмитриев, И.В. Баклашов, Г.Я. Новик// Физические процессы горного производства. – М.:МГИ, 1982. – С. 101-107.

126. Губанов, А.И. К теории разрывной прочности твердых полимеров / А.И. Губанов, А.Д. Чевыгелов // ФТТ. – 1962. – Т.4, № 4. – С. 928-933.

127. Абдульманов, И.Г. Влияние формы включений на распределение напряжений в горных породах / И.Г. Абдульманов, Н.С. Красилова, В.А. Максименко, В.П. Нетребко, Н.П. Новиков // ФТПРПИ. – 1988. – №1. – С. 49-53.

128. Воробьев, А.А. Термофлуктуационная теория разрушения пород и землетрясения /
 А.А. Воробьев, В.С. Дмитриевский, О.Н. Соколовский // ФТПРПИ. – 1980. – №5. – С.19-23

129. Петров, В.А. Термодинамический подход к микромеханике разрушения твердых тел / В.А. Петров // ФТТ. – 1983. – Т.25, №10. – С. 3110 - 3113.

130. Петров, В.А. О механизме и кинетике макроразрушения / В.А. Петров // ФТТ. – 1979. – Т.21, №12. – С. 3681-3686.

131. Куксенко, В.С. Модель перехода от микро – к макроразрушению твердых тел / В.С. Куксенко// Сб. докладов I Всесоюз. шк.-семинара «Физика прочности и пластичности».– Л.: Наука, 1986. с. 36 – 41.

132. Пимонов, А.Г. Имитационная модель процесса трещинообразования в очагах разрушения горных пород / А.Г. Пимонов, В.В. Иванов // ФТПРПИ. – 1990. – №3. – С. 34-37.

133. Воробьев, А.А. Теоретические вопросы физики горных пород / А.А. Воробьев, М.П. Тонконогов, Ю.А. Векслер. – М.: Недра, 1972. – 151 с.

134. Куксенко, В.С. Физические и методические основы прогнозирования горных ударов / В.С. Куксенко, И.Е. Инжеваткин, Б.Ц. Манжиков, С.А. Станчиц и др. // ФТПРПИ. – 1987. – №1. – С. 9-22.

135. Журков, С.Н. Кинетическя теория прочности твердых тел / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1968. – №3. – С. 46-52.

136. Протодьяконов, М.М. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве / М.М. Протодьяконов, С.Е. Чирков. – М.: Наука, 1964. – 69 с.

137. Булат, А.Ф. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов / А.Ф. Булат, В.К. Хохолев. – Киев: Наукова думка, 1990. – 168 с.

138. Кузнецов, С.В. Исследование напряженно-деформированного состояния трещиновато-пористого нелинейно-упругого массива горных пород около выработки / С.В. Кузнецов, М.Э. Слонин // Сб. Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород. – Фрунзе: Илим, 1979. – С. 58-65.

139. Петухов, И.М. Горные удары на угольных шахтах / И.М. Петухов. – М.: Недра, 1972. – 221 с.

140. Schols, C.H. Microfraturing and the inelastic deformation of rock in compression / C.H. Schols // J. Geophys. Res. – 1968. – Vol.73. – P.1417-1432.

141. Томашевская, И.С. Предвестники разрушения образцов горных пород / И.С. Томашевская, Я.Н. Хамидуллин //Известия АН СССР. Физика Земли. – 1972. – №5. – С. 12-20.

142. Гусев, В.А. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов / В.А. Гусев. – М.: Наука, 1972. – 107 с.

143. Koltsov, F.G. Investigation of precursoty stage and fracture development in the rock samples be complex geophysical methods/ F.G. Koltsov, F.V. Ponomarev, B.G. Salov et.al. // Acta Geophys. Pol. – 1984. – Vol. 32, №3. – P. 283-299.

144. Болотин, Ю.И.. Теоретические предпосылки измерения развивающейся трещины с помощью акустической эмиссии/ Ю.И. Болотин, В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот, Л.Н. Маслов // Измерительная техника. – 1974. – №12. – С. 34-37.

145. Болотин, Ю.И. Анализ акустической эмиссии, вызванной ростом трещины в прямоугольной пластине / Ю.И. Болотин, В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот // Измерительная техника. – 1975. – № 1. – С. 24-28.

146. Болотин, Ю.И. О коэффициенте электроакустического излучения трещин нормального отрыва при разрушении горных пород / Ю.И. Болотин // ФТПРПИ. – 1993. – № 5. – С. 44-46.

147. Шамина, О.Г. Об особенностях спектров продольных и поперечных волн/ О.Г. Шамина // Физика Земли. – 2000. – № 11. – С. 35-39.

148. Динариев, О.Ю. Об электромагнитном отклике при распространении сейсмического сигнала во фрагментированном горном массиве / О.Ю. Динариев, В.Н. Николаевский // Физика Земли. – 1998. – № 12. – С. 45-49.

149. Гордеев, В.Ф. Физика электромагнитного эмиссионного метода контроля качества
 материалов и его перспективы/ В.Ф. Гордеев, В.В. Ласуков // Известия ВУЗов. Физика. – 2001.
 – Т.44, № 7. – С. 84-91.

150. Перельман, М.Е. Генерация электромагнитного излучения двойными электрическими слоями и ее проявление при землетрясениях / М.Е. Перельман, Н.Г. Хатиашвили // ДАН СССР. – 1983. – Т. 271, № 1. – С. 80-83.

151. Lacidogna, G. Behavior of Materials / G. Lacidogna, O. Borla, G. Niccolini, A. Carpinteri // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. – 2013. – Vol.1. – P. 387-393.

152. Bespalko, A.A. Mechanoelectrical transformations in quartz and quartz-bearing rocks under acoustic action / A.A. Bespalko, L.V. Yavorovich, P.I. Fedotov // J. Min. Sci. – 2006. – Vol. 43. – P. 472–476.

153. Yavorovich, L.V. Electromagnetic Radiation Generated by Acoustic Excitation of Rock Samples / L.V. Yavorovich, A.A. Bespalko, P.I. Fedotov R.B., Baksht // Acta Geophysica. – 2016. – Vol. 64, № 5. – P. 1446-1461.

154. Cs'efalvay, G. Experimental Study on Feature Selection Using Artificial AE Sources / G. Cs'efalvay, P. Sedl'ak //30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University of Granada. – 2012. – P. 12-15.

155. Bespalko, A.A. Electromagnetic Response of Layered Dielectric Structures to Pulsed Acoustical Action / A.A. Bespalko, B.A. Lyukshin, G.E. Utsyn, L.V. Yavorovich // Russian Physics Journal. – 2015. – Vol. 58, № 4. – P.567-573.

156. Bespalko, A.A. Transformation of acoustic pulses into electromagnetic response in stratified and damaged structures / A.A. Bespalko, Y.N. Isaev, L.V. Yavorovich // Journal of Mining Science. – 2016. – Vol. 52, №. 2. – P.279-285.

157. Luong, M.P. Infrared Thermography of Fracture of Concrete and Rock / M.P. Luong // Fracture of Concrete and Rock. – 1987. – P. 343-353.

158. Luong, M.P. Infrared thermovision of damage processes in concrete and rock /M.P. Luong // Engineering Fracture Mechanics. – 1990. – Vol.35, №1-3. – P. 291-301.

159. Шейнин, В.И. Идентификация напряжений в горных породах по изменению плотности потока инфракрасного излучения / Шейнин В.И., Э.А. Мотовилова, А.А. Морозова, А.В. Фаворова // ФТПРПИ. – 1999. – № 6. – С. 48-53.

160. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль/ В.П. Вавилов – М.: ИД Спектр. – 2009. – 544 с.

161. Luong, M.P. Infrared thermographic evaluation of fatigue behavior of concrete / M.P. Luong //Transact. 14-th Inter. Conf. of Structeral Mech. in Reactor Technol. Lyon, France, 1997. – P.155-162.

162. Squarzoni, C. Terrestrial laser scanner and infrared thermography in rock fall prone slope analysis - Preliminary results / C. Squarzoni, A. Galgaro, G. Teza et.al // Geophysical Research Abstracts. – 2008. – Vol.10. – P. 1-2.

163. Mineo, S. Integrated geostructural, seismic and infrared thermography surveys for the study of an unstable rock slope in the Peloritani Chain (NE Sicily) / S. Mineo, G. Pappalardo, F. Rapisarda, A. Cubito, G. Di Maria // Engineering Geology . – 2015. – Vol. 195. – P. 225-235.

164. Pappalardo, G. InfraRed Thermography proposed for the estimation of the Cooling Rate Index in the remote survey of rock masses / G. Pappalardo, S. Mineo, S. Perriello Zampelli, A. Cubito, D. Calcaterra // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2016. – Vol.83 . – P. 182-196.

165. Baroň, I. Application of infrared thermography for mapping open fractures in deep-seated rockslides and unstable cliffs/Ivo Baroň, David Bečkovský, Lumír Míča// Landslides. – 2014.
– Vol.11 (1). – P. 15-27.

166. Bespalko, A.A. Control of Rock Mass by Mine Tashtagol Method IR-Radiometer/A.A. Bespal'ko, L.V. Yavorovich, S.V. Moiseev //7th International Forum on Strategic Technology (IFOST- 012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. - Tomsk: TPU Press, 2012. - Vol. 2 – P. 228-231.

167. Беспалько, А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород методом ИК - радиометрии/А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, С.В. Моисеев // Вестник науки Сибири. – 2012. – Т. 3 (4). – С. 74-79.

168. He, Man-chao. Physical modeling of failure process of the excavation in horizontal strata based on IR thermography / Man-chao He, Wei-li Gong, De-jian Li, Hui-ming Zhai //Mining Science and Technology (China). – 2009. –Vol.19, № 6. – P. 689-698.

169. Zhao, Yixin. Acoustic emission and thermal infrared precursors associated with bumpprone coal failure/Zhao Yixin, Jiang Yaodong //International Journal of Coal Geology. – 2010. – Vol.83, №1. – P. 11-20.

170. Rami, Haj-Ali. Thermoelastic and infrared-thermography methods for surface strains in cracked orthotropic composite materials / Rami Haj-Ali, Bo-Siou Wei, Rani El-Hajjar, Rani El-Hajjar // Engineering Fracture Mechanics. – 2008. – Vol.75, №1. – P. 58-75.

171. Steinberger, R. Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing/R. Steinberger, T.I.
Valadas Leitão, E. Ladstätter, G. Pinter, W. Billinger, R.W. Lang // International Journal of Fatigue. – 2006. – Vol.28, №10. – P. 1340-1347.

172. Van Leeuen, J. Study of pulsed phase thermography for the detection of honeycombing defects in concrete structures / J. Van Leeuen, M. Nahant and S. Paez // Proc. CompNDT. – 2011.

173. Калугин, А.С. Железорудные месторождения Сибири/ А.С. Калугин, Т.С. Калугина, В.И. Иванов и др. – Новосибирск: Наука, 1981. – 238 с.

174. Рац, М.В. Неоднородность горных пород и их физических свойств/ М.В. Рац. – М.: Изд-во Наука, 1968. – 107 с.

175. Climate-Data.org. https://ru.climate-data.org/location/21806/.

176. Адушкин, В.В. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная/ В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. – М.: ИДГ РАН, 2015. – 364 с.

177. Егоров, П.В. Управление состоянием массива горных пород на рудниках Горной Шории/ П.В. Егоров, Ю.А. Шевелев, И.Ф. Матвеев, Н.И. Скляр, В.А. Квочин. – Кемерово, 1999. – 257 с.

178. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Положение по безопасной работе на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам", 2014 г. – 76 с.

179. Егоров, П.В. Исследования стреляния горных пород и прогнозирование возможности и условий возникновения горных ударов на Таштагольском железорудном месторождении/ П.В. Егоров, А.Т. Шаманская. – Л.: Изд. ВНИМИ, 1968. – 73 с.

180. Ваганова, В.А. Региональные методы контроля напряженного состояния массивов горных пород, используемых при отработке Таштагольского месторождения // Сб. «Оценка современных достижений в области безопасной отработки удароопасных месторождений и предупреждения горных ударов» / В.А. Ваганова, О.В. Шипеев. – Таштагол Кемеровской обл., 2000. – С. 24-33.

181. Лобанова, Т.В. Особенности сдвижения горных пород в периоды массовых взрывов при подземной разработке Таштагольского железорудного месторождения/ Т.В. Лобанова, Е.В. Новикова// ФТПРПИ – 2008. – Vol. 44, №3. – С. 25–33.

182. Лобанова, Т.В. Сдвижение горных пород Таштагольского месторождения как отражение геодинамических процессов/ Т.В. Лобанова // Вестник СибГИУ. – 2012. – №1. – С. 16-22.

183. Еременко, А.А. Диагностика геофизических явлений и развитие технологии разработки железорудных месторождений/ А.А. Еременко, А.А. Беспалько, В.А. Еременко, Л.В. Яворович. – Новосибирск: Изд-во Наука, 2016. – 296 с.

184. Беспалько, А.А. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов //Известия ТПУ. – 2005. – Т.308, №7. – С. 18-23.

185. Пархоменко, Э.И. Электрические свойства горных пород /Э.И. Пархоменко. – М: изд. Наука, 1965. – 164 с.

186. Добрынин, В.М. Петрофизика (Физика горных пород), 2-е издание/ В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. – М: изд-во Нефть и газ, 2004. – 368 с.

187. Ерофеев, Л.Я. Электрические свойства минералов и горных пород/ Л.Я. Ерофеев. – Томск: изд-во ТПУ, 1994. – 54 с.

188. Берсудский, Л.Д. Курс магниторазведки/ Л.Д. Берсудский, А.А. Логачев, О.Ю. Солодухо. – М.: Гостоптехиздат, 1940. – 288 с.

189. Вахромеев, Г.С. Петрофизика/ Г.С. Вахромеев, Л.Я. Ерофеев, В.С. Канайкин, Г.Г. Номоконова. – Томск: Изд-во ТГУ, 1997. – 492 с.

190. Гончаров, А.И. Акустическая эмиссия и электромагнитное излучение при одноосном сжатии/ А.И. Гончаров, В.П. Корявов, В.М. Кузнецов и др. //ДАН СССР. – 1980. – Т.255, №4. – С. 821-824.

191. Гольд, Р.М. Импульсное электромагнитное излучение минералов и горных пород, подвергнутых механическому нагружению/ Р.М. Гольд, Г.П. Марков, П.Г. Могила, М.А. Самохвалов //Известия АН СССР. Физика Земли. – 1975. – №7. – С. 109 - 111.

192. Ржевский, В.В. Эмиссионные эффекты «памяти» в горных породах/ В.В. Ржевский, В.С. Ямщиков, В.А. Шкуратник // ДАН СССР. – 1983. – Т. 273, №5. – С. 1094-1097.

193. Малышков, Ю.П. Закономерности генерирования электромагнитного сигнала твердыми телами при механическом воздействии/ Ю.П. Малышков, В.Ф. Гордеев, В.П. Дмитриев и др.// ЖТФ. – 1984. – Т.54, вып.2. – С. 336-341.

194. Мастов, Ш.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния горных пород с помощью наблюдений импульсной электромагнитной активности/ Ш.Р. Мастов, В.Н. Саломатин, Л.В. Яворович //Сб. Геофизические основы контроля напряжений в горных породах. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. – С. 23-26.

195. Гордеев, В.Ф. Электромагнитный эмиссионный контроль прочности бетонов/ В.Ф. Гордеев, Ю.П. Малышков, В.Л. Чахлов, Х. Баумбах и др. //Дефектоскопия. – 1992. – №7. – С. 76-80.

196. Беспалько, А.А. Влияние слоистости алевролита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Р.М. Гольда, Д.И. Дацко //ФТПРПИ. – 2002. – №2. – С. 27-31.

197. Королев, М.В. Апериодический пьезодатчик для ультразвуковых дефектоскопов/ М.В. Королев //Дефектоскопия. – 1973. – №4. – С.12–18.

198. Беспалько А.А. Регистратор электромагнитных и акустических сигналов/ А.А. Беспалько, Н.Н. Хорсов, П.И. Федотов, С.А. Кураков// Патент на полезную модель №80557. – Приоритет от 20.08.2008.

199. Беспалько, А.А. Регистратор электромагнитных и акустических сигналов для контроля прочности и разрушения материалов и массивов горных пород/ А.А. Беспалько, П.И. Федотов, Л.В. Яворович // Известия ТПУ. – 2008. – Т.312, №2. – С.255-258.

200. Беспалько, А.А. Регистратор электромагнитных сигналов для контроля изменений напряженного состояния горных пород/ А.А. Беспалько, А.А. Бомбизов, А.Г. Лощилов, Л.В. Яворович // Контроль. Диагностика. – 2011. – №11 (161). – С. 14-17.

201. AD8627 Datasheet(PDF) – Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf...AD/AD8627.html.

202. Руководство по установке BNC-2120 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rsreu.ru>en/component/docman/doc_download...bnc-2120.html.

203. Виртуальный осциллограф Velleman PCS-500 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http:// monitor.espec.ws>Измерительные приборы>topic36466.html.

204. TestMachines.RU. Испытательные прессы ИП-1. – Режим доступа: http:// testmachines.ru>evolution/ip-1.html.

205. Осциллографы запоминающие. – Режим доступа: http://prist.ru>produces/pdf/tds-1000b,2000b.pdf.

206. Электрометры – измерители больших сопротивлений Keithley 6517В. Краткое руководство пользователя. – Режим доступа:

http://radio.vilcom.ru>upload...obweizmeritelnoe...6517b...

207. Шейнин, В. И. Диагностика быстрых периодических изменений напряжений в горных породах по данным инфракрасной радиометрии/ В.И. Шейнин, Б.В. Левин, Э.Ф. Мотовилов, А.А. Морозов, А.В. Фаворов // Известия РАН. Физика Земли. – 2001. – № 4. – С. 24-30.

208. Мальшин, А.А. Экспериментальное исследование кинетики накопления элементарных повреждений при разрушении горных пород по импульсному электромагнитному излучению в световом и радио- диапазонах, дис. ... канд. техн. наук:05.15.11/Мальшин Анатолий Александрович. – Томск, 2000. – 166 с.

209. Шейнин, В. И. Исследования особенностей проявления термомеханических эффектов при одноосном сжатии образцов каменной соли/ В.И. Шейнин, Д.И. Блохин // ФТПРПИ. – 2012. – № 1. – С. 46-53.

210. Тепловизор NEC TH-9100. – Режим доступа: http://analyzers.ru>teplovizori/necth9100/index.php...

211. Тепловизор IRISYS 4010. – Режим доступа: http://ThermoView.ru>teplovizor/irisys4010/.

212. Викторов, С.Д. Эмиссия субмикронных частиц при деформировании горных пород/ С.Д. Викторов, А.Н. Качанов, В.Н. Одинцов, А.А. Осокин// Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т.76. – №3. – С. 388-390.

213. Спектрометр аэрозолей APS мод. 3321. – Режим доступа: http://tsi-russia.ru>product/parent/19/products_id/19.

214. Губкин, А.Н. Электреты/ Губкин А.Н.// – М: Изд-во АН СССР, 1961. – 140 с.

215. Пронин, В.П. Основы теории и применение электроемкостных систем/ В.П. Пронин, Б.А. Михайлов. – Саратов: Изд-во СГАУ, 2003. – 200 с.

216. Беспалько, А. А. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов // Известия ТПУ. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 18-23.

217. Беспалько, А. Экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитной эмиссии в неоднородных диэлектрических материалах/ А.А. Беспалько, Р.А. Кузьминых, Б.А. Люкшин, Г.Е. Уцын, Л.В. Яворович // Известия ВУЗов. Физика. – 2007, – №2. – С. 16-22.

218. Беспалько, А.А. Наблюдения изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам электромагнитной эмиссии/ А.А. Беспалько, А.П. Суржиков, Н.Н. Хорсов, Л.В. Яворович, В.К. Климко, В.А. Штирц // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7, ч.2. – С. 253-256.

219. Беспалько, А.А. Аппаратурный комплекс для исследования напряженнодеформированного состояния горных пород в шахтах/ А.А. Беспалько, Н.Н. Хорсов // Сб. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. – Новосибирск, 2004. – С. 210-213.

220. Бомбизов, А.А. Автономный регистратор электромагнитных и акустических сигналов для мониторинга шахтных сооружений/ А.А. Бомбизов, А.А. Беспалько, А.Г. Лощилов // ПТЭ. – 2013. – № 1. – С. 141-143.

221. Беспалько, А.А. Наблюдение импульсного электромагнитного излучения горных пород на Слюдянском месторождении флогопита/ А.А. Беспалько, М.В. Коровкин, И.М. Парусова, В.Н. Сальников// Сб. «Геология и полезные ископаемые Сибири». – Томск. ТГУ, 1974. – С.14-15.

222. О природе радиоизлучения горных пород в их естественном залегании и результаты регистрации интенсивности электромагнитного поля на геологических объектах Хакасской АО и Тувинской АССР// Отчет о НИР (№ 3064 НТБ ТПУ)/ Беспалько А.А., Воробьев А.А. – Томск, Томский политехнический институт, 1974. – 158 с.

223. Гольд, Р.М. Оценка НДС горных пород на Таштагольском месторождении и тоннелях БАМ экспрессным электромагнитным методом/ Р.М. Гольд, Ш.Р. Мастов, В.Н. Саломатин, Н.Д. Королев, А.Д. Басов, Л.В. Яворович // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций. Сб. научных трудов, Новосибирск, 1985. – С. 85-91.

224. Натурные исследования вариаций электромагнитной активности в сейсмоактивных районах страны. Отчет по теме ТОМ-ЭДИП-4/ Ю.П. Малышков. – Томск, 1989. – 147 с. – деп. в ВНТИ-центр, № 02900017339.

225. Вострецов, А.Г. Аппаратура регистрации сигналов ЭМИ в условиях подземных горных выработок/ А.Г. Вострецов, А.В. Кривецкий, А.А. Бизяев, Г.Е. Яковицкая // ФТПРПИ. – 2008. – №2. – С.115-122.

226. Бизяев, А.А. Регистрационно-диагностический комплекс РДК РЭМИ-3 и экспериментальные исследования разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок Таштагольского месторождения/ А.А. Бизяев, А.Г. Вострецов, Г.Е. Яковицкая // Доклады АН ВШ РФ. – 2015. – №3. – С.29-38.

227. Руководство по эксплуатации ЕГ20К.000 РЭ аппаратуры для индикации участков с повышенной геодинамической активностью горных пород и грунтов «АНГЕЛ». – Санкт-Петербург, 2004. – Часть 1 и 2.

228. Руководство по эксплуатации КОМПЛЕКС "ANGEL, ЕГ23МК.000 РЭ. – Санкт-Петербург, 2004. – 36 с.

229. Хачай, О.А. Исследование разрешающей способности попланшетной электромагнитной методики для активного картирования и мониторинга неоднородных геофизических сред/ О.А. Хачай, Е.Н. Новгородова, А.Ю. Хачай //Физика Земли. – 2003. – №1. – С.30-41.

230. Яворович, Л.В. Взаимосвязь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20/ Яворович Людмила Васильевна. – Томск, 2005. – 190 с.

231. Малышков, Ю.П. Источники и механизмы электромагнитной эмиссии в бетонах/ Ю.П. Малышков, Т.В. Фурса, В.Ф. Гордеев, В.М. Картопольцев, Г.Ф. Черных // Известия ВУЗов, "Строительство". – 1996. – №12. – С. 31-37.

232. Фурса, Т.В. Источники электромагнитной эмиссии в бетонах/ Т.В. Фурса, В.Ф. Гордеев, В.В. Ласуков, Ю.П. Малышков //Письма в ЖТФ. – 1994. – Т. 20, вып. 21. – С. 1-5.

233. Ультразвуковые преобразователи – под ред. Е. Кикучи, пер. с англ., М.: Мир, 1972. – 424 с.

234. Федотов, П.И. Регистратор электромагнитных и акустических сигналов для мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния горных пород, дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13/ Федотов Павел Иванович. – Томск, 2011. – 142 с.

235. Беспалько, А.А. Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах при динамических воздействиях/ А.А. Беспалько, А.П. Суржиков, Л.В. Яворович //Горный журнал. – 2006. – №4. – С. 32-34.

236. Поляков, В. Пространственная селекция сигналов/ В. Поляков. – Радио. – 1999. – №5. – С. 20-21.

237. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство, пер. с нем./ У. Титце, К. Шенк. – М.: Мир, 1982. – 512 с.

238. Алексеенко, А.Г. Основы микросхемотехники/ А.Г. Алексеенко. – М.: Юнимедистайл, 2002. – 448 с.

239. Котюк, А.Ф. Датчики в современных измерениях/ А.Ф. Котюк. – М.: Радио и связь, 2006. – 96 с.

240. ГОСТ Р 51086-97 «Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения, раздел 3 «Термины и определения». – М.: Госстандарт РФ, 2005. –7 с.

241. Мейнке, Х. Радиотехнический справочник/ Х. Мейнке, Ф. Гундлах. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 416 с.

242. Богданов, Г.Б. Основы теории и применения ферритов в технике измерений и контроля: Ферриты в технике измерений и контроля/ Г.Б. Богданов. – М.: Советское радио, 1967. – 399 с.

243. Операционные усилители и компараторы. Справочник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Додэка-XXI, 2002. – 560 с.

244. Беспалько, А.А. Механоэлектрические преобразования в горных породах Таштагольского железорудного месторождения/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов, Е.В. Виитман //Геодинамика. – 2008. – №1(7). – С. 54-60.

245. Бомбизов, А.А. Разработка прибора для мониторинга напряженнодеформированного состояния горных пород по косвенным признакам электромагнитного и акустического излучения/ А.А. Бомбизов, А.А. Беспалько, А.Г. Лощилов, А.В. Филатов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – Часть 1, №26. – С. 24-28. 246. Bombizov, A.A. Spectrum Monitoring of Electromagnetic Signals from Rocks to Control Geodynamic Processes under Working Mine Conditions/ Bombizov, A.A., Bespalko, A.A.//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol.81. – P.1-9. DOI:10.1088/1757-899X/81/1/012105

247. Бомбизов, А.А. Автономный аппаратно-программный комплекс регистрации и обработки электромагнитной эмиссии для непрерывного мониторинга напряженнодеформированного состояния горных пород : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Бомбизов Александр Александрович. – Томск, 2015. – 19 с.

248. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород/В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

249. Гульельми, А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы/ А.В. Гульельми, В.А. Троицкая. – М: Наука, 1973. – 208 с.

250. Воробьев, А.А. Заряжание поверхностей при разрушении, контакте или трении тел/Воробьев А.А. – Томск, 1982. – Ч.1. – 242 с. – Деп. ВИНИТИ, № 2702-82.

251. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Галямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

252. Желудев, И.С. Основы сегнетоэлектричества/ И.С. Желудев. – М.: Атомиздат, 1973. – 472 с.

253. Струков, Б. А. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах/Б. А. Струков, А.П. Леванюк. – М.: Наука, 1983. – 240 с.

254. Лёб, Л. Статическая электризация / Л. Лёб, пер. с англ. В. М. Фрадкина. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.

255. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле // Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1986. – 264 с.

256. Беспалько, А.А. Исследование механоэлектрических преобразований при акустическом возбуждении кальцитов в процессе поляризации/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович // Сб. Всероссийский симпозиум «Электрическая релаксация и электретный эффект в диэлектриках». – Москва, 2002. – С.284-286.

257. Горелов, Ю.Н. Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений (методы Рунге-Кутта): учебное пособие / Ю. Н. Горелов. – Самара: СамГУ, 2006. – 45 с.

258. Bespalko, A.A. Electromagnetic Emission in Polarized Calcites Induced by Acoustic / A. Bespalko, R. Gol`d, L. Yavorovich // 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. KORUS, Ulsan, Republic of Korea, 2003. –Vol. 3. – C. 37-40.

259. Балбачан, М.Я. Исследование макроскопических обменных процессов при возникновении и релаксации механоэлектретного состояния горных пород/ М.Я. Балбачан //Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1987. – №12. – С. 56-71.

260. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Акинин А.А., Балмашнова Е.Г. О новой шкале структурно иерархических представлений как паспортной характеристики объектов геосреды// ФТПРПИ. – 1998. - №5. – с.16-32.

261. Калашников, А.Г. Магнитная восприимчивость горных пород при упругих напряжениях/ А.Г. Калашников, С.П. Капица //ДАН СССР. – 1957. – Т. 36, № 3. – С. 130-134.

262. Горяинов, П.М. Типы железорудных ансамблей и их геомагнитная систематика (на примере Кольского полуострова)/ П.М. Горяинов, Н.Л. Балабонин, В.А. Тюремнов. – Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР, 1990. – 172 с.

263. Сковородкин, Ю.П. Изучение тектонических процессов методами магнитометрии/ Ю.П. Сковородкин. – М.: Изд. ИФЗ АН СССР, 1985. – 197 с.

264. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (Петрофизика). Справочник геофизика. – М.: Недра, 1976. – 527 с.

265. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред // Теоретическая физика. Изд. 2-е пер. и доп. Е. М. Лифшицем и Л. П. Питаевским/ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – Т.8. – 621 с.

266. Хёрд, К. Ж. Многообразие видов магнитного упорядочения в твердых телах/ К. Ж. Хёрд // Успехи физических наук. – 1984. – Т.142, вып.2. – С.331-355.

267. Беспалько, А.А. Исследование и контроль намагниченности образцов магнетитовой руды по параметрам электромагнитного сигнала/ А.А. Беспалько, П.И. Федотов, Л.В. Яворович //Контроль. Диагностика. – 2013. – №13. – С. 221-224.

268. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел/ В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский– М.: Наука, 1974. – 560 с.

269. Болотин, Ю. И. Установление корреляции между размером трещины и амплитудой импульсов акустической эмиссии/ Ю.И. Болотин, Л.А. Маслов, В.И. Полунин //Дефектоскопия. – 1975. – №4. – С. 119-122.

270. Носов, В.В. Методика определения информативных параметров сигнала акустической эмиссии/ В.В. Носов // Дефектоскопия. – 1998. – № 5. – С. 92-98.

271. Лавров, А. В. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор)/ А.В. Лавров, В.Л. Шкуратник // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, №7. – С. 6-18.

272. Беспалько, А. А. Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии/ А.А. Беспалько, Р.М. Гольд, Л.В. Яворович, Д.И Дацко // ФТПРПИ. – 2003. – № 2. – С. 8-14.

273. Bespalko, A. A. Mechanoelectrical transformations in quartz and quartz-bearing rocks under acoustic action/ A.A. Bespalko, L.V. Yavorovich and P.I. Fedotov // Journal of Mining Science. – 2007. – Vol. 43, No 5. – P. 472-476.

274. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов/ Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

275. Хайрер, Э. Решение обыкновенный дифференциальных уравнений/ Э. Хайрер, С. Нёрсетт, Г. Ваннер. – М.: Мир, 1990. – 512 с.

276. Bespalko, A.A., Study of mechanoelectrical transformation in rocks under dynamic impact/ A A. Bespalko, A.P. Surzhikov, L.V. Yavorovich //Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2007. – №1. – P. 9-11.

277. Боровков, Ю.А. Оценка влияния увлажнения и минерального состава горных пород на их прочностные свойства для прогноза возможного прорыва подземных вод в рудник пород/ Ю.А. Боровков, С.В. Фурман // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – №1. – С. 276-280.

278. Беспалько, А.А. Исследование влияния концентрации водного раствора NaCl на параметры электромагнитного сигнала песчаников / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – №11/2. – С.117-120.

279. Беспалько, А.А. Исследование параметров электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении горных пород, контактирующих с жидкостью/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов //Контроль. Диагностика. – 2011. – Спец. Выпуск. – С. 7-11.

280. Беспалько, А.А. Исследование изменений характеристик механоэлектрических преобразований на контактах горных пород с водными растворами/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Т.В. Овсянникова //Вестник науки Сибири. – 2011. – №1(1). Серия: Инженерные науки. – С. 134-141.

281. Маленков, Г.Г. Зеркально-симметричная структура жидкой воды и опыт геометрического подхода к связанной воде // Сб. «Современное представление о связанной воде в породах». – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 126 с.

282. Глушко, В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – М.: Недра, 1987. – 278 с.

283. Воробьев, А.А. Физические условия залегания и свойства глубинного вещества/ А.А. Воробьев. – Томск.: Изд-во ТПУ, 1975. – 296 с. 284. Беспалько, А.А. Связь петрофизических свойств горных пород с изменение параметров электромагнитных сигналов при акустическом воздействии / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, А.П. Суржиков. – Томск.: Изд-во ТПУ, 2011. – 120 с.

285. Хатиашвили, Н.Г. О механизмах генерации электромагнитного излучения при землетрясениях/ Н.Г. Хатиашвили, М.Е. Перельман // ДАН СССР. – 1987. – Т.295, N4. – С. 836-838.

286. Двойной электрический слой // Химическая энциклопедия. Т. 2. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – С. 5-7.

287. Дамаскин, Б. Б. Введение в электрохимическую кинетику. 2-е изд./ Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – М.: Высшая школа, 1983. – 400 с.

288. Kobayashi, H. Impact compressive and bending behavior of rocks accompanied by electromagnetic phenomena/ H. Kobayashi, H. Keitaro, O. Kinya, W. Keiko// Phil. Trans. R. Soc. A. – 2014. – Vol. 372, № 2023. – P. 1-15. DOI: 10.1098/rsta.2013.0292.

289. Wan, G-X. Piezoelectric responses of brittle rock mass containing quartz to static stress and exploding stress wave respectively/ G-X. Wan, X-B Li, L. Hong // J. Central South Univ. Technol. – 2008. – Vol.15, №3. – P. 344–349. DOI:10.1007/s11771-008-0065-0.

290. Яворович, Л.В. Исследование параметров электромагнитных откликов образцов вмещающих и рудных пород Таштагольского месторождения на акустическое воздействие / Л.В. Яворович, А.А. Беспалько // Контроль. Диагностика. – 2013. – №13. – С. 272-275.

291. Frid, V. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure/ V. Frid, K. Vozoff// J. Coal Geol. – 2005. – Vol. 64, №1-2. – P. 57-65.

292. Беспалько, А.А. Механоэлектрические преобразования в массиве горных пород Таштагольского рудника при взрывных воздействиях/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Е.В. Виитман, П.И. Федотов, В.А. Штирц // ФТПРПИ. – 2010. – №2. – С. 53-62.

293. Беспалько, А.А. Диагностика развития деструктивных зон в образцах горных пород при одноосном сжатии по спектральным характеристикам электромагнитных сигналов / Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов //Дефектоскопия. – 2011. – №. 10. – С. 41-49.

294. Беспалько, А.А. Контроль структурных нарушений породных массивов шахтного поля рудников по параметрам механоэлектрических преобразований/А.А. Беспалько, А.П. Суржиков, Л.В. Яворович, П.И. Федотов //Дефектоскопия. – 2012. – №. 4. – С. 34-40.

295. Mori, Y. Acoustic and electromagnetic emission from crack created in rock samples under deformation/ Y. Mori, Y. Obata, J. Sikula //Acoust. Emiss. – 2009. – Vol.27. – P. 157-166.

296. Sedlak, P.A. Acoustic and electromagnetic emission as a tool for crack localization/ P.A. Sedlak, J.A. Sikula, T.B. Lokajicek, Y. Mori // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19, №4. – P. 157-166. DOI:10.1088/0957-0233/19/4/045701.

297. Rabinovitch, A. Surface oscillations – A possible source of fracture induced electromagnetic radiation/ A. Rabinovitch, V. Fred, D. Bahat // Tectonophysics. – 2007. – Vol.431. – P. 15-21.

298. Rabinovitch, A. Fracture area calculation from electromagnetic radiation and its use in chalk failure analysis/ A. Rabinovitch, V. Fred, D. Bahat, J. Goldbaum // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2000. – Vol.37. – P. 1149-1154.

299. Pralat, A. Electromagnetic and acoustic emission from the rock. Experimental measurements/ A. Pralat and S. Wojtowicz //Acta Geodyn. et Geomater. $-2004. - N_{\odot}.1/-P.$ 111-119.

300. Панин, В.Е. Синергетические принципы мезомеханики/ В.Е. Панин //Физическая мезомеханика. – 2000. – Т.3, №6. – С. 5-36.

301. Макаров, П.В. Эволюционная природа деструкции твердых тел/ П.В. Макаров // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т.10, №3. – С. 23-38.

302. Яковицкая, Г.Е. Исследование спектральных характеристик и затухания сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.07, 05.15.11/Яковицкая Галина Евгеньевна. – Новосибирск, 1991. – 19 с.

303. Беспалько, А.А. Исследование изменений характеристик электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород Таштагольского рудника/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, С.И. Колесникова, В.Г. Букреев, А.Н. Мертвецов, П.И. Федотов // Известия ВУЗов. Физика. – 2011. – Т.54, № 1/2. – С. 78-85.

304. Панин, В.Е. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы/ В.Е. Панин, Ю.В. Гришаев, С.Г. Псахье // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7, Ч.1. – С. 25-40.

305. Грабовский, М.А. Изменение электрического сопротивления магнетита при намагничивании/ М.А. Грабовский //Известия АН СССР, серия геофизическая. – 1951. – №4. – С. 61-70.

306. Грабовский, М.А. Об изменении магнитных свойств магнетитов под действием больших сжимающих напряжений/ М.А. Грабовский, Э.И. Пархоменко //Известия АН СССР, серия геофизическая. – 1953. – №5. – С. 405-417.

307. Богатиков, О.А. Неорганические наночастицы в природе / О.А. Богатиков //Вестник РАН. – 2003. – Т.73, №5. – С.426-428.

308. Адушкин, В.В. Кавитационный механизм формирования нано – и микрочастиц в недрах Земли/ В.В. Адушкин, С.Н. Андреев, С.И. Попель //Доклады РАН. – Т.399, №1. – С.107-109.

309. Трубецкой, К.Н. Техногенные минеральные наночастиц как проблема освоения недр/ К.Н. Трубецкой, С.Д. Викторов, Ю.П. Галченко, В.Н. Одинцев // Вестник РАН. – 2006. – Т. 76, № 4. – С. 318-332.

310. Викторов, С.Д. Основы метода регистрации эмиссии частиц для прогнозирования катастрофических явлений при добыче полезных ископаемых подземным способом/ С.Д. Викторов, А.А. Осокин, А.В. Шляпин //ФТПРПИ. – 2017. – №5. – С. 181-185.

311. Трубецкой, К.Н. Прогноз горных ударов на основе контроля эмиссии субмикронных частиц при деформировании и разрушении горных пород/ К.Н. Трубецкой, С.Д. Викторов, А.А. Осокин, А.В. Шляпин //Горный журнал. – 2017. – №6. – С. 16-20.

312. Уракаев, Ф. Х. Флуктуация энергии и эмиссионные явления в устье трещины/ Ф.Х. Уракаев, И.А. Массалимов // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 9. – С. 1614-1618.

313.Luong, M.P. Infrared Thermography of Fracture of Concrete and Rock/ M.P. Luong // Conference Fracture of Concrete and Rock – 1987. – P. 343-353.

314.Luong, M.P. Infrared thermovision of damage processes in concrete and rock/ M.P. Luong// Engineering Fracture Mechanics. – 35 (1-3). – 1990. – P. 127-135.

315. Sheinin, V.I. Features of Thermomechanical Effects in Rock Salt Samples under Uniaxial Compression/ V.I. Sheinin, D.I. Blokhin // Journal of Mining Science. – 2012, – vol. 48, № 1, – P. 39-45.

316. Мальшин, A.A. Экспериментальное исследование кинетики накопления элементарных повреждений при разрушении пород импульсному горных по электромагнитному излучению в световом и радио- диапазонах: дис. ... канд. техн. наук05.15.11./Мальшин Анатолий Александрович. – Томск, 2000. – 166 с.

317. Muzaffar, K. Modelling and Analysis of Power Distribution of Electromagnetic Waves on Plane Surfaces Using Lock-in IR Thermography/ K. Muzaffar, K. Chatterjee, L.I. Giri et al.// Journal of Nondestructive Evaluation. – 2017. – vol.36:60. DOI.org/10.1007/s10921-017-0439-z.

318. Balageas, D. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection/ D. Balageas, X. Maldague, D. Burleigh, V.P. Vavilov, B. Oswald-Tranta, J.M. Roche, G.M. Carlomagno // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2016. – Vol.35, № 1. – P.1-17. https://DOI.org/10.1007/s10921-015-0331-7

319. Vavilov, V. Ultrasonic and optical stimulation in IR thermographic NDT of impact damage in carbon composites. / V. Vavilov, W. Świderski, D. Derusova// Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2015. – V.12, № 2. – P. 162–172.

320. Беликов, Б.П. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород/ Б.П. Беликов, К.С. Александров, Т.В. Рыжова. – М.: Наука, 1970. – 276 с. 321. Курленя, М.В. Электрометрический метод диагностики напряженнодеформируемого состояния массивов горных пород/ М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ДАН СССР. – 1990. – Т. 313, № 1. – С. 71-77.

322. Фридель, Ж. Дислокации/ Ж. Фридель. – М.: Мир, 1967. – 660 с.

323. Кухлинг, Х. Справочник по физике/ Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982.– 520 с.

324. Гиляров В.Л. Энергетика термоупругого эффекта в твердых телах/ В.Л. Гиляров, А.И. Слуцкер, В.П. Володин, А.И. Лайус// ФТТ. – 1998. – Т.40, №8. – С.1548-1551.

325. Коваленко А.Д. Термоупргость/ А.Д. Коваленко. – Киев: Изд. АН УССР, 1975. – 216 с.

326. Кушнир Р.М. Задача термоупругости для ортотропной цилиндрической оболочки с поперечной сквозной трещинной/ Р.М. Кушнир, А.М. Николишин, В.А. Осадчук//Теоретическая и прикладная механика. – 2003. – Вып.37. – С. 109 – 113.

327. Irwin G.R. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate/ Irwin G.R. //J. Appl. Mech. – 1957. – vol.24. №3. – P. 361–364.

328. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел/ В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

329. Thompson W. (Lord Kelvin). Mathematical and Physical Papers/ W. Thompson (Lord Kelvin). – London, 1890. – 592 p.

330.Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids/ A.A. Griffith // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1921. – Sereis A. – Vol.221. –P. 163-198.

331. Егоров, П.В. Геомеханика /П.В. Егоров, Г.Г. Штумпф, А.А. Ренев, Ю.А. Шевелев,
И.В. Махраков, В.В. Сидорчук. – Кемерово: Кузбасский государственный технический
университет, 2002. – 339 с.

332. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 286 с.

333. Бабичев, А.П. Физические величины: Справочник. Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232 с.

334. Кальман, Г. Элементарные процессы при ионизации ударом материальных частиц/ Г. Кальман, Б. Розен // УФН. – 1932. – Т.12. №1. – С. 105–135. (Physikalische Zeitschrift, 14, 521, 1931. Перевод А. Б. Щехтер).

335. Завилопуло, А. Н. Ионизация молекул азота, кислорода, воды и двуокиси углерода электронным ударом вблизи порога / А. Н. Завилопуло, Φ. Ф. Чипеев, О. Б. Шпеник // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 50, № 4. – С. 402–407.

336. Беспалько А.А. Регистратор электромагнитных и акустических сигналов для контроля прочности и разрушения материалов и массивов горных пород/ А.А. Беспалько, П.И. Федотов, Л.В. Яворович // Известия ТПУ. – 2008. – Т.312, №2. – С. 255-258.

337. Беспалько, А.А. Электромагнитная эмиссия напряженно-деформированных массивов горных пород в шахтных выработках / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Д.И. Дацко, М.В. Золотарев, Н.Н. Хорсов // Сб. III Международного симпозиума «Контроль и реабилитация окружающей среды». – Томск, 2002. – С. 92-94.

338. Матвеев, И.Ф. Особенности строения и отработки Таштагольского месторождения//Сб. докладов конференции "Оценка современных достижений в области безопасной отработки удароопасных месторождений, методам прогноза и предупреждения горных ударов". – Таштагол, 2000. – С. 3-11.

339. Климко, В.К. Краткая геомеханическая и геодинамическая характеристика Таштагольского месторождения/ В.К. Климко// Сб. докладов конференции "Оценка современных достижений в области безопасной отработки удароопасных месторождений, методам прогноза и предупреждения горных ударов". – Таштагол, 2000. – С. 12-23.

340. Семенов, А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля, 3-е изд./ А.С. Семенов. – Л.: Недра, 1980. – 446 с.

341. Беспалько, А.А. Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Т.А. Климко // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7, ч.2. – С.285-287.

342. Беспалько, А.А. Взаимосвязь изменений напряженного состояния массива с параметрами электромагнитной эмиссии/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, Т.А. Климко // Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Горные науки Республики Казахстан – итоги и перспективы». – Алматы, 2004. – С.84-87.

343. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных, нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам. – М.:«НТЦ»: По безопасности промышленности Госгортехнадзор России, 2000 – 43 с.

344. Еременко, А.А. О критерии удароопасности массива горных пород/ А.А. Еременко, А.П. Гайдин, В.А. Ваганова, В.А. Еременко // ФТПРПИ. – 1999. – № 6. – С. 44-47.

345. Бушуев, Э.Б. Проектирование взрывных работ в промышленности, 2 изд. / Э.Б. Бушуев, А.М. Бейсебаев, Б.Ф. Богацкий // – М.: Недра, 1983. – 359 с.

346. Ганапольский, М.И. Методы ведения взрывных работ. Специальные взрывные работы, под редакцией В.А. Белина. / М.И. Ганапольский, В.Л. Барон, В.А. Белин, В.В. Пупков, В.И. Сивенков. – М.: Из-во Московского государственного горного университета, 2007. – 563 с.

347. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика, 10-е издание. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.

348. Еременко, А.А. Проведение и крепление горных выработок в удароопасных зонах железорудных месторождений/ А.А. Еременко, А.Н. Федоренко, А.И. Копытов // – Новосибирск: Наука, 2008. – 423 с.

349. Ставрогин, А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах/ А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня // – М.: Недра, 1985. – 271 с.

350. Соболев, Г.А. Кинетика электромагнитного и акустического излучения как предвестник неустойчивости контактов блоков/ Г.А. Соболев, В.М. Демин // ДАН СССР. – 1988. – Т. 303, №4. – С.834-836.

351. Беспалько, А.А. Контроль структурных нарушений породных массивов шахтного поля рудников по параметрам механоэлектрических преобразований / А.А. Беспалъко, А.П. Суржиков, Л.В. Яворович, П.И. Федотов. // Дефектоскопия. – 2012. – № 4. – С. 34–40.

352. Беспалько, А.А. Электромагнитная эмиссия горных пород после взрывов/ А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, А.А. Еременко, В.А. Штирц //ФТПРПИ. – 2018. – №2. – С.10-18.

353. Горная энциклопедия. Рубрики: Геология полезных ископаемых. Акустические свойства горных пород. – М.: Советская энциклопедия, 1984-1991.

354. Ржевский, В.В. Акустически методы исследования и контроля горных пород в массиве/ В.В. Ржевский, В.С. Ямщиков. – М.: Наука, 1973. – 224 с.

355. Хайкин, С. Э. Физические основы механики/ С.Э. Хайкин//– М.:Наука, 1971. – 752 с.

356. Сашурин, А. Д. Сдвижение горных пород на рудниках черной металлургии/ А.Д. Сашурин. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 268 с.

357. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел/ С.Н. Журков// – Вестник АН СССР. – 1968 – №3. – С. 46-52.

358. Журков, С.Н.. О прогнозировании разрушения горных пород / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров, В.Н. Савельев, У. Султанов //Известия АН СССР. Физика Земли. – 1977. – №6. – С. 11-18.

359. Мейерс, С. Эффективное использование C++. 3 издание/ С. Мейерс. – М.: Изд-во «ДМКпресс», 2006. – 301 с.

360. Скворцов, А.В. Алгоритмы построения и анализа триангуляции / А.В. Скворцов, Н.С. Мирза// – Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – 168 с.

361. Белоцерковский, Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства/ Г.Б. Белоцерковский. – М.: Советское радио, 1975. – 336 с.

362. Беспалько, А.А. Алгоритм поиска предвестников разрушения горных пород по временным рядам измерений электромагнитных сигналов/ А.А. Беспалько, В.Г. Букреев, А.Н. Мертвецов, Л.В. Яворович // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 3-7.

363. Гвишиани, А.Д. Математические методы геоинформатики. II. Алгоритмы нечеткой логики в задачах выделения аномалий на временных рядах/ А.Д. Гвишиани, С.М. Агаян, Ш.Р. Богоутдинов, Ж. Злотники, Ж. Боннин // Кибернетика и системный анализ. – 2003. – № 4. – С.103-111.

364. Гвишиани, А. Д. Математические методы геоинформатики. III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах / А.Д. Гвишиани, С.М. Агаян, Ш.Р. Богоутдинов, Ж. Злотники, Ж. Боннин // Кибернетика и системный анализ. – 2008. – Т. 44, № 3. – С. 3-18.

365. LeMouël, J. L. Remanent magnetization vector direction and the statistical properties of magnetic anomalies/ J. L. LeMouël, A. Galdeano, X. LePichon // Geophysical journal. – 1972. – V.30. – P. 353-371.

366. Колесникова, С.И. Проблемно-ориентированные модели распознавания и оценивания состояний сложных объектов: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.13.01./Колесникова Светлана Ивановна. – Томск, 2011. – 364 с.

367. Чехович, Ю.В. Элементы алгебраической теории синтеза обучаемых алгоритмов выделения трендов : дис. ... канд. физ. – мат. наук: 01.01.09./ Чехович Юрий Викторович. – М., 2003. – 70 с.

368. Lin, J. Symbolic Representation of Time Series, with Implications for Streaming Algorithms/ J. Lin, E. Keogh, S. Lonardi, B.A. Chiu// In proceedings of the 8th ACM SIGMOD Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery. San Diego, 2003. – P. 2-11.

369. Беспалько, А.А. Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, С.И. Колесникова, В.Г. Букреев, А.Н. Мертвецов, П.И. Федотов // Материалы Юбилейной XX международ. науч. школы им. академика С. А. Христиановича, Алушта. – Симферополь: Изд-во ТНУ, 2010. – С. 58-70.

370. Левенштейн, В.И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов / В.И. Левенштейн // ДАН СССР. – 1965. – Т. 163, № 4. – С. 845–848.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Данные сейсмостанции «Таштагольская» с момента массового технологического взрыва 05 февраля 2017 года

Местное время	Х	Y	Ζ	Привязка к	Энергия	Класс	Класс
(Кемеровская обл.)				местности	события	события	далёкого
							события
05.02.2017 12:05:07	12450	11480	-281	М.В., бл12, гор	2,15E+07	7,33	7,3
				208:-350м,			
				на зажим.среду 1			
				слоя бл.12			
05.02.2017 12:05:22	12474	11482	-281	орт 10, восток	2,45E+01	1,39	
05.02.2017 12:05:23	12497	11379	-303	орт 7, центр	5,61E+01	1,75	
05.02.2017 12:05:24	12350	11384	-343	запад, ств. 11 орт	4,34E+01	1,64	
05.02.2017 12:05:25	12348	11362	-344	запад, ств. 11 орт	4,62E+01	1,67	
05.02.2017 12:05:26	12515	11476	-284	орт 9, восток	1,58E+01	1,20	
05.02.2017 12:05:30	12507	11484	-303	орт 9-10, восток	2,71E+01	1,43	
05.02.2017 12:05:35	12354	11466	-349	орт 14, центр	2,95E+02	2,47	2,5
05.02.2017 12:05:36	12366	11427	-401	запад. ств. 12 орт	4.07E+01	1.61	
05.02.2017 12:05:40	12421	11434	-308	орт 10-11. центр	7.83E+01	1.89	
05.02.2017 12:05:41	12459	11511	-294	орт 11 восток	2.90E+01	1.46	
05 02 2017 12:05:42	12412	11424	-2.62	орт 10-11 запал	3.22E+01	1 51	
05.02.2017 12:05:42	12517	11398	-114	орт 7-8 восток	1.41F+01	1,51	
05.02.2017 12:05:45	12317	11450	-320	opt 7 0, BOCTOR	1,41E+01	1,13	
05.02.2017 12:05:49	12417	11510	-320	орт 12, центр	1,00E+01	1,22	
05.02.2017 12:05:50	12407	111123	-373 604	роцих "Запалиая"	9.97E+00	1,00	
05.02.2017 12.05.50	12105	11123	-094	р-он шл. Западная,	9,97L+00	1,00	
05 02 2017 12:05:51	12515	11267	224	opt 4.5 poppag	$1.03E \pm 0.1$	1.01	
05.02.2017 12.05.51	12313	11207	-224	орг 4-3, запад	1,03E+01	1,01	
05.02.2017 12:05:52	12210	11430	-208	запад, ств. 18-19 орт	2,40E+01	1,38	
05.02.2017 12:06:00	12503	11420	-348	орт 8-9, центр	0,88E+01	1,84	
05.02.2017 12:06:01	12420	11413	-343	орт 10-11, запад	1,56E+01	1,19	
05.02.2017 12:06:04	12330	11515	-361	орт 15-16, центр	4,98E+01	1,70	
05.02.2017 12:06:11	12375	11431	-367	запад, ств. 12 орт	1,12E+02	2,05	2
05.02.2017 12:06:12	12515	11483	-359	орт 9-10, восток	1,54E+01	1,19	
05.02.2017 12:06:24	12384	11530	-425	орт 14, центр	9,32E+01	1,97	2
05.02.2017 12:06:28	12456	11476	-285	орт 10-11, центр	1,52E+01	1,18	
05.02.2017 12:06:29	12440	11416	-151	р-он 10 орт, центр	1,04E+01	1,02	
05.02.2017 12:06:55	12427	11412	-286	орт 8-9, центр	5,50E+01	1,74	
05.02.2017 12:06:58	12311	11512	-346	орт 16, центр	1,29E+02	2,11	2,1
05.02.2017 12:07:02	12440	11361	-278	орт 8-9, центр	6,73E+01	1,83	
05.02.2017 12:07:04	12463	11337	-334	орт 8, запад	3,99E+01	1,60	
05.02.2017 12:07:05	12461	11390	-269	орт 8-9, центр	1,49E+01	1,17	
05.02.2017 12:07:16	12425	11467	-297	орт 11, центр	2,07E+02	2,32	2,2
05.02.2017 12:08:34	12498	11528	-346	орт 11-12, центр	1,04E+01	1,02	
05.02.2017 12:08:35	12377	11478	-299	орт 11-12, запад	5,41E+01	1,73	
05.02.2017 12:08:36	12435	11434	-307	орт 10, центр	6,62E+01	1,82	
05.02.2017 12:08:41	12476	11534	-314	восток, ств. 11-12	2,07E+01	1,32	4,5
				орт			
05.02.2017 12:08:41	12363	11469	-343	восток, ств. 11-12	2,92E+04	4,47	4,5
				орт			
05.02.2017 12:08:52	12384	11455	-421	запад, ств. 12-13 орт	7,24E+01	1,86	
05.02.2017 12:08:58	12357	11476	-318	орт 13-14. центр	1.55E+03	3.19	3.2
05.02.2017 12:09:02	12397	11433	-272	орт 11, запал	1,04E+01	1,02	,
05.02.2017 12:09:22	12374	11475	-396	запад. ств. 13 орт	4.60E+01	1.66	
05.02.2017 12:09:29	12380	11421	-337	запал. ств 11-12 орт	9.94E+02	3.00	3
05.02.2017 12:09:49	12376	11473	-349	запад ств 13 орт	5.97E+03	3.78	3.8
05 02 2017 12:09:52	12560	11410	-161	орт 7 восток	1.71E+01	1 23	
05.02.2017 12:07.32	12350	11499	_340	орт 14-15 центр	1,712+01 1 31F+02	2.12	2.1
05.02.2017 12:10:33	12372	11488	-375	орт 14 центр	7.80E+02	1.89	<i>2</i> ,1
02.02.2017 12.11.41	14514	11-100	515	орг гі, цонтр	7,000101	1,07	1

05.02.2017 12:12:09	12522	11362	-397	р-он 7 орт, центр	4,67E+01	1,67	
05.02.2017 12:12:10	12381	11482	-430	р-он 13 орт, запад	1,18E+02	2,07	2,1
05.02.2017 12:13:13	12507	11473	-375	р-он 9-10 орт, восток	1,28E+02	2,11	2,1
05.02.2017 12:13:16	12553	11398	-257	орт 6, восток	9,97E+00	1,00	
05.02.2017 12:13:57	12379	11492	-390	орт 14, центр	1,05E+02	2,02	2
05.02.2017 12:16:46	12455	11533	-426	р-он 12-13 орт,	9,48E+01	1,98	2
				восток			
05.02.2017 12:17:46	12364	11523	-404	орт 14-15, центр	7,97E+01	1,90	
05.02.2017 12:24:32	12483	11475	-342	орт 10-11, восток	1,20E+02	2,08	2
05.02.2017 12:25:37	12456	11487	-406	орт 11-12, центр	6,19E+01	1,79	
05.02.2017 12:29:33	12344	11460	-408	орт 14, запад	1,40E+03	3,15	3,1
05.02.2017 12:29:38	12345	11458	-355	орт 14, запад	3,14E+01	1,50	
05.02.2017 12:39:10	12380	11506	-410	орт 14, центр	5,61E+01	1,75	
05.02.2017 12:46:25	12395	11390	-337	запад, ств. 10-11 орт	4,52E+01	1,66	
05.02.2017 12:58:26	12437	11463	-309	орт 11, центр	4,69E+01	1,67	
05.02.2017 13:02:42	12417	11453	-340	запад, ств. 11-12 орт	3,46E+01	1,54	
05.02.2017 13:14:33	12388	11486	-333	орт 13, центр	7,35E+01	1,87	
05.02.2017 13:33:10	12450	11466	-325	орт 11, центр	5,25E+01	1,72	
05.02.2017 13:47:25	12405	11430	-361	орт 11, запад	2,68E+01	1,43	
05.02.2017 15:06:24	12448	11426	-258	орт 8-9, центр	1,82E+02	2,26	2,3
05.02.2017 15:25:16	12397	11453	-308	орт 12, запад	4,02E+03	3,60	3,6
05.02.2017 15:32:33	12430	11520	-377	р-он 12-13 орт,	7,97E+01	1,90	
				центр			
05.02.2017 16:01:10	12402	11368	-326	запад, ств. 10 орт	2,94E+01	1,47	
05.02.2017 16:01:11	12635	11674	-207	восток, ств. 10-11	9,97E+00	1,00	
05 02 2017 16:01:12	12579	11659	-212	восток ств 11-12	5 85F+01	1 77	
03.02.2017 10.01.12	12577	11057	212	орт	5,051101	1,77	
05.02.2017 16:17:42	12367	11399	-292	запад, ств. 11-12 орт	3,98E+06	6,60	6,6
05.02.2017 16:26:02	12626	10900	-357	СЗУ, р-он 15 орт, юг	1,65E+04	4,22	4,2
05.02.2017 16:42:27	12455	11441	-286	орт 10, центр	1,25E+02	2,10	
05.02.2017 16:45:32	12461	11492	-364	орт 11-12, центр	6,52E+01	1,81	
05.02.2017 16:59:45	12383	11457	-345	запад, ств. 12-13 орт	8,91E+01	1,95	
05.02.2017 18:33:05	12455	11434	-414	р-он 10 орт, запад	5,54E+01	1,74	
05.02.2017 18:49:24	12593	10860	-275	СЗУ, орт12-13, р-он СЗРШ№2	9,92E+02	3,00	3
05.02.2017 20:30:00	12450	11524	-309	орт 12. восток	5.54E+01	1.74	
05.02.2017 22:08:05					3.31E+04	4.52	4.5
05.02.2017 23:48:08	12451	11505	-384	орт 11-12, центр	7.63E+01	1.88	7-
06.02.2017 4:11:40	12465	11485	-339	орт 11, центр	2,89E+01	1,46	
06.02.2017 5:09:30	12259	11400	-311	орт 15, запад	7,77E+01	1,89	
06.02.2017 6:56:50	12307	11431	-325	орт 14-15, запад	2,87E+02	2,46	2,5
06.02.2017 7:10:07	12379	11560	-361	орт 15, центр	5,52E+03	3,74	3,7
06.02.2017 9:43:59	12376	11513	-371	орт 14, центр	4,46E+01	1,65	
06.02.2017 11:42:11	12558	11379	-235	орт 6, восток	4,73E+01	1,67	
06.02.2017 13:04:30	12564	11130	-141	запад, ств. 01-02 орт	4,15E+01	1,62	
06.02.2017 18:13:34	12394	11546	-379	орт 14, восток	2,92E+02	2,47	2,5
06.02.2017 18:13:42	12401	11545	-410	орт 14, восток	8,24E+01	1,92	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Копии диплома, патента и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ



<u> АИПЛОМ</u>

Конкурс ЗОЛОТАЯ МЕДАЛЬ Сибирской Ярмарки

ГЕО-СИБИРЬ 2005

ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, ГЕОДИНАМИКА И ГЕОМЕХАНИКА

МАЛОЙ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛЬЮ

награждается Томский политехнический университет, электротехнический институт, г.Томск

за разработку и внедрение комплекса для исследования напряженно-деформированного состояния горных пород в условиях шахт

Президент Сибирской Ярмарки

Chaylog

Якушин С.Б.

Председатель экори

ВА-ронсков В.Ф.

Ненашева Л.Ф.

Директор выставки

***KEAT** (383-2) 71-58-12





¹⁹⁾ RU⁽¹¹⁾ 80 557⁽¹³⁾ U[,]

(51) MITK *G01D 1/02* (2006.01) *G01H 11/08* (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ, ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ (титульный лист)

- (21), (22) Заявка: 2008134233/22, 20.08.2008
- (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 20.08.2008
- (45) Опубликовано: 10.02.2009 Бюл. № 4

Адрес для переписки:

634050, г.Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ, отдел интеллектуальной и промышленной собственности

(72) Автор(ы):

Беспалько Анатолий Алексеевич (RU), Хорсов Николай Николаевич (RU), Федотов Павел Иванович (RU), Кураков Сергей Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и): Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет (RU)

(54) РЕГИСТРАТОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

(57) Формула полезной модели

Регистратор электромагнитных и акустических сигналов, содержащий предварительный усилитель, фильтры верхних и нижних частот, отличающийся тем, что два емкостных и два индукционных приемника связаны со своими повторителями, соединенными соответственно с двумя дифференциальными усилителями, которые подключены к коммутатору, к которому подсоединены три полосовых фильтра и фильтр верхних и нижних частот, которые связаны со своими регулируемыми усилителями, к которым подключены усреднители, связанные с микроконтроллером, при этом четвертый регулируемый усилитель подключен к компаратору, который соединен с микроконтроллером и счетчиком, связанным с микроконтроллером, причем акустический приемник связан со своим повторителем, который подключен ко второму фильтру верхних и нижних частот, который связан со своим регулируемым усилителем, подключенным к усреднителю, соединенному с микроконтроллером, который связан с коммутатором, со всеми регулируемыми усилителями, с запоминающим устройством, интерфейсом связи, дисплеем, клавиатурой и блоком реального времени.

8 0 S **U**I

ᅍ



RU 80557 U1

1211

路路路路路路

密

密

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012616730

Программа для обнаружения предвестников геодинамических событий по временным рядам измерений электромагнитных сигналов

Правообладатель(ли): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)

Автор(ы): Мертвецов Александр Николаевич, Беспалько Анатолий Алексеевич, Букреев Виктор Григорьевич, Яворович Людмила Васильевна (RU)



密密路

Заявка № 2012614348

Дата поступления **30 мая 2012** г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ **26 июля 2012** г.

> Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

teen

密密路路路路路路路路路

Б.П. Симонов

路路路路路路

路路

密

斑

密

密

密

密

密

田

斑

田

路路

密

路

密

路路

密

路

斑

密

路

路路

密

密

路路

路路

密

田

密

密

斑

斑

斑

密

密

斑

密

密



资

资

密

密

密

密

密

器

路路

密

函

函

斑斑

密

密

密

璨

南

斑

斑

斑

密

斑

密

窗

密

斑

瀚

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012618354

Программа формирования набора характерных параметров электромагнитных сигналов на этапах изменения напряженнодеформированного состояния горных пород

Правообладатель(лн): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)

Автор(ы): Мертвецов Александр Николаевич, Беспалько Анатолий Алексеевич, Еременко Андрей Андреевич, Яворович Людмила Васильевна (RU)



Заявка № 2012616031

Дата поступления **17 июля 2012 г.** Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ **14 сентября 2012 г.**

> Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

teery

Б.П. Симонов

密密路路路

斑

斑

密

斑

密

密

密

崧

路路

密

密

崧

密密

斑

璨

密

密

斑

函

应

斑

斑

斑

密

斑

斑

斑

密

密

密

密

密

密

路

密

密

崧

密

密路

密

密



<u>路路路路路</u>

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

斑

密

密

密

密

密

密

密

斑

密

密

密

密

密

密

密

密

斑

斑

斑

密

密

密

斑

斑

斑

斑

斑

密

密

密

密

密

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015612564

Коммуникация с устройством РЭМС-1 по интерфейсу RS-232

Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)

Авторы: Федотов Павел Иванович (RU), Беспалько Анатолий Алексеевич (RU), Яворович Людмила Васильевна (RU)



Заявка № 2014663878 Дата поступления 29 декабря 2014 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20 февраля 2015 г.

> Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

路路路路路

POCCHINCKAN DELLEPAULIN



路路路路路 掇 密

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015612565

Сбор и накопление параметров электромагнитных сигналов при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород

Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)

Авторы: Федотов Павел Иванович (RU), Беспалько Анатолий Алексеевич (RU), Яворович Людмила Васильевна (RU)



Заявка № 2014663882

Дата поступления 29 декабря 2014 г. Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 февраля 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

路路路路路路

密

密

密 斑

密 密

密

密

斑

密

密

斑 斑

密

密

密

斑

安安

密

密

密

密

斑

斑

路

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑 斑

密

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑



<u>密路路路路</u>

密

斑

斑

斑

斑

斑斑

斑

斑

密

斑

斑

斑

密

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

密

斑

斑

斑

斑

斑

敬敬

斑

斑

密

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015662836

Программа обработки и визуализации данных мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния горных пород регистратором электромагнитных и акустических сигналов. Версия 0.7.0

Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)

Авторы: Бомбизов Александр Александрович (RU), Лощилов Антон Геннадьевич (RU), Беспалько Анатолий Алексеевич (RU)



Заявка № 2015618946 Дата поступления 28 сентября 2015 г. Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 декабря 2015 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев -1'elle

POCCHINCKASI DELEPAIIIISI

密路路路路

崧

密

崧

密

资

密

函

斑

斑

斑

盗

容

南南

密

路路

密

璨

斑

斑

密

资

密

密

斑

密路路路

F 路路

器

斑

嶽

쨞

斑

斑

斑

斑

斑

斑

斑

密路

密密路路路

寮

撥

斑

函

斑

斑

器

密

密

容

密

招

密

斑

斑斑

函

斑

斑

路路

密

密

密

器

巖

斑

發發路

斑

斑

密

密

密

斑

密

器

密

密

斑

密密

斑

斑

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016612022

Анализ электромагнитных откликов образцов горных пород с использованием преобразования Гильберта

Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)

Авторы: Беспалько Анатолий Алексеевич (RU), Федотов Павел Иванович (RU), Хорсов Николай Николаевич (RU)

> Заявка № 2015662917 Дата поступления 28 декабря 2015 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 февраля 2016 г.

> > Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев l lloc



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения

УТВЕРЖДАЮ Главный инженер Таштагольской шахты А.С. Куприянов larran EBPA3 MO ST 2018 r. AKT

внедрения регистраторов электромагнитных и акустических импульсных сигналов РЭМС1, используемых на Таштагольском железорудном месторождении АО «ЕвразРуда».

Акт внедрения выдан ведущему научному сотруднику Томского политехнического Беспалько Анатолию Алексеевичу. Настоящим актом к.ф.-м.н. университета, подтверждается использование на Таштагольском железорудном месторождении АО «ЕвразРуда» (Таштагол, Кемеровская область) двух регистраторов для измерения параметров электромагнитных и акустических импульсных сигналов РЭМС1. Приборы использовались с 2002 года по настоящее время. Регистраторы обеспечивают измерения характеристики электромагнитной эмиссии в полосах с центральными частотами 2.0, 15.0, и 100.0 кГц, в широкой полосе (1-100) кГц, интенсивности потока электромагнитных сигналов с частотой следования не более 30 кГц, а также акустических импульсов в интервале (1-100) кГц с усреднением 1.0 или 5.0 секунд. Каналы регистрации электромагнитных сигналов по электрической и магнитной Запись во внутреннюю память составляющим имеют дифференциальный вход. приборов может осуществляться в непрерывном и автономном режиме в течение не менее 7 суток. После вывода из внутренней памяти информации и подзарядки или смены внешнего аккумулятора приборы могут эксплуатироваться далее по своему Полная масса прибора с аккумуляторной батареей, проводами, назначению. электромагнитными и акустическим датчиками составляет не более 12 кг.

Регистраторы использовались для определения характеристик электромагнитной эмиссии до технологических взрывов, во время их проведения и в период релаксации возбужденного состояния массива горных пород. Результаты измерений использовались в шахте Таштагольского месторождения для выявления связей характеристик электромагнитной эмиссии и изменения напряженно-деформированного состояния горных пород, в том числе при развитии геодинамических явлений с разной энергией, включая микроудары и горные удары.

Сал. С.П. Колегов Начальник участка № 16 (ППГУ) _____ Инженер-геофизик участка № 16 ____

393

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер Таштагольской шахты inner А.С. Куприянов 2018 г.

об использовании на шахте Таштагольского железорудного месторождения Таштагольской шахты АО «ЕвразРуда» результатов исследований параметров и характеристик электромагнитной эмиссии.

Настоящий акт выдан ведущему научному сотруднику Томского политехнического университета, к.ф.-м.н. Анатолию Алексеевичу Беспалько в том, что результаты его исследований свечения в инфракрасном диапазоне скважинных отверстий разного назначения используются специализированным подразделением шахты, а именно Службой Прогноза и предупреждению горных ударов шахты (ППГУ), для определения участков массива горных пород, находящихся в напряженном состоянии, и для предупреждения аварийных ситуаций в забоях при проходке горных выработок и в районах ведения очистных работ.

Начальник участка № 16 (ППГУ) __ Инженер-геофизик участка № 16 __

В.А. Штирц С.П. Колегов

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер Таштагольской шахты

Внедрения программно-аппаратных устройств сля регистрации электромагнитных и акустических импульсных сигналов РЭМАС1, а также результатов исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии, проведенных с их использованием ведущим научным сотрудником Томского политехнического университета Беспалько Анатолием Алексеевичем на Таштагольском железорудном месторождении. Шахта Таштагольская АО «ЕвразРуда».

Настоящий акт подтверждает использование на Таштагольском железорудном месторождении АО «ЕвразРуда» (Таштагол, Кемеровская область) двух программноаппаратных опытных устройств для регистрации электромагнитных и акустических импульсных сигналов РЭМАС1. Приборы показали положительные технические качества при работе в шахтных условиях Таштагольского рудника. Регистраторы могут работать автономно и непрерывно в течение 72 часов, с последующим продолжением работы после смены аккумулятора, являющегося источником питания. При работе регистратор РЭМАС1 обеспечивает прием сигналов в диапазоне частот (1-100) кГц; чувствительность приема электромагнитных сигналов по входу не хуже 2·10 ⁶ B, а чувствительность приема акустических импульсов по входу не хуже 5·10⁻⁵ B. Динамический диапазон приема сигналов не менее 60 дБ. Период регистрации, усреднения спектральных характеристик и запуск нового цикла приема данных измерений не ниже 16·10⁻³ секунд с выборкой по частотам не менее 1 кГц. Масса прибора с аккумуляторной батареей составляет не более 8 кг. Защищенность от пыли и влаги на уровне IP64.

Аппаратно-программные устройства с соответствующим программным обеспечением используются в шахте Таштагольского рудника для проведения мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния и релаксации горных пород после массовых технологических взрывов. Мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния производится по спектрам электромагнитных сигналов породного массива в непрерывном режиме и в реальном времени. На шахте используются, полученные с помощью этих регистраторов модельные и реальные изменения во времени амплитуды электромагнитной эмиссии горных пород Таштагольского месторождения для прогноза развития геодинамических событий.

Начальник участка № 16 (ППГУ) _____ В.А. Штирц С.П. Колегов Инженер-геофизик участка № 16 _