

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
 «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт международного образования и языковой коммуникации
 Направление подготовки Приборостроение
 Кафедра физических методов и приборов контроля качества

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы			
Исследование механоэлектрических преобразований в образцах горных пород			
УДК 621.235.4:622.277			
Студент			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
151Б20	Чжан Жуйчжи		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. ФМПК	Гальцева О.В.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. МЕН	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент каф. ЭБЖ	Кырмакова О.С.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ФМПК	Суржиков А.П.	д. ф.-м. н.		

Томск – 2016 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества
P4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе
P6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции
	<i>Универсальные компетенции</i>
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной

Министерство образования и науки Российской Федерации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт международного образования и языковой коммуникации

Направление подготовки (профиль) Приборостроение (информационно – измерительная техника и технологии)

Кафедра физических методов и приборов контроля качества

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ФМПК ИНК

_____ (Подпись)

_____ (Дата)

_____ (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
151Б20	Чжан Жуйчжи

Тема работы:

Исследование механоэлектрических преобразований в образцах горных пород	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования являются методы и средства контроля образцов горных пород.
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1) Литературный обзор с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; 2) Постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; заключение по работе
Перечень графического материала	Презентация в Microsoft Office PowerPoint 2007

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Кырмакова О.С.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский В.Ю.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Гальцева О.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
151Б20	Чжан Жуйчжи		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
150Б20	Чжан Жуйчжи

Институт	ИМОЯК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): <i>материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	...
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	...

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, <i>перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	...
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	...
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), <i>финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	...

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Альтернативы проведения НИ 3. График проведения и бюджет НИ 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. МЕН	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б20	Чжан Жуйчжи		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
151Б20	Чжан Жуйчжи

Институт	ИМОЯК	Кафедра	ФМПК
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Прибор: паяльник, источник питания, компьютер, микроконтроллер и осциллограф рабочая зона: лабораторная аудитория Материал: ОУ, реле, резисторы, конденсаторы, индуктивности и т.д.</p>
---	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, 	<p>1.Техногенная безопасность:</p> <p>1.1.Анализ выявленных вредных факторов и методы защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) превышение уровней шума; б) повышение температуры окружающей среды; в) отклонение показателей микроклимата в помещении; г) превышение уровней электромагнитных и тепловых излучений; д) недостаточная освещенность рабочей зоны. <p>Анализ микроклимата</p> <p>1.2.Анализ выявленных опасных факторов и методы защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) электрический ток б) тепловой удар.
--	---

профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).	
2. Экологическая безопасность: <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	2. Региональная безопасность: <ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – методы решения
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях: 5.1. Средства избежания опасности пожара и взрыва; 5.2. План эвакуации людей.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	3. Организационные мероприятия обеспечения безопасности: 3.1. Инструментальная подготовка; 3.2. Контроль оборудования; 3.3. Организация рабочего места. 4. Особенности законодательного регулирования проектных решений.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Подпись	Дата
ассистент каф. ЭБЖ	Кырмакова О.С.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
151Б20	Чжан Жуйчжи		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 98 с., 21 рис., 11 табл., 58 источников.

Ключевые слова: механоэлектрические преобразования, горная порода, электромагнитный сигнал, пьезоакустическое возбуждение, кальцит, магнетит.

Объектом исследования являются образцы горных пород.

Цель работы – физическое моделирование механоэлектрических преобразований в образцах горных пород, выявление закономерностей параметров электромагнитного сигнала при пьезоакустическом воздействии на образцы горных пород.

В горной промышленности остро стоит проблема мониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород и контроля удароопасности. Это связано с тем, что при добыче полезных ископаемых возникают геодинамические события в форме горных ударов, что приводит к гибели людей, оборудования и разрушению горных выработок. В связи с этим необходимы методы, которые бы контролировали напряженное состояние массивов. Исследования, проведенные в Томском политехническом университете, а также в мировом научном сообществе, предполагают, что исследования характеристик механоэлектрических преобразований в горных породах позволят решить эту проблему.

Область применения: горная промышленность, геофизические исследования, дефектоскопия.

Работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2014 в ОС
Windows 7.

Определения

В данной работе применены следующие термины соответствующими определениями:

выпускная квалификационная работа бакалавра (ВКР бакалавра):

Работа на соискание квалификации “бакалавр”, содержащая системный анализ известных технических решений, технологических процессов, программных продуктов, выполняемая выпускником самостоятельно с использованием информации, усвоенной им в рамках дисциплин общетехнического и специального цикла.

механоэлектрические преобразования: преобразование механической энергии в энергию электромагнитного поля, приводящее к возникновению электромагнитных сигналов.

напряжённно-деформированное состояние: совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на материальное тело внешних нагрузок, температурных полей и других факторов.

горная порода: агрегат минералов более или менее постоянного состава, образующий самостоятельное геологическое тело.

руда: вид полезных ископаемых, природное минеральное образование, содержащее соединения полезных компонентов в концентрациях, делающих извлечение этих компонентов экономически целесообразным.

вмещающая порода: горная порода, в которой заключена рудная залежь, жила или иное геологическое тело с полезным ископаемым.

предел прочности: критическое значение соответствующих напряжений, при которых образец породы разрушается.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.045–84 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

ГОСТ 12.2.032-78(2001). Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

ГОСТ 12.1.038 – 82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

СНиП 23-05-95 (СП 52.13330.2011). Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.

ГОСТ 12.1.033 – 81. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Термины и определения.

ГОСТ 12.1.003 – 83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности.

Обозначение и сокращения

НДС – напряжённно-деформированное состояние

ЭМИ – электромагнитное излучение

ЭМЭ – электромагнитная эмиссия

ЭМО – электромагнитный отклик

АЭ – акустическая эмиссия

СИ – силоизмерительная система

ЭМД – электромагнитный датчик

РЭМС – регистратор электромагнитных сигналов

ЧС - чрезвычайная ситуация

Содержание

	С.
Введение	15
1 Литературный анализ исследований диагностических критериев разрушения на основе электромагнитного излучения	16
1.1 Модели разрушения горных пород, основные гипотезы об источниках и механизмах генерирования электромагнитного сигнала.	17
1.2 Анализ результатов лабораторных и натуральных исследований процесса разрушения горных пород на основании регистрации ЭМИ	21
1.3 Аналитический обзор зарубежной литературы	24
1.3.1 Механизмы электромагнитного излучения	25
1.3.2 Возможности прогноза землетрясения	26
1.3.3 Лабораторные исследования	27
1.3.4 Теоретические работы	29
1.3.5 Подземные работы	30
1.4 Постановка задачи исследования	33
2 Методика проводимых исследований	36
2.1 Методика квазистатического нагружения образцов горных пород	36
2.2 Описание экспериментальных образцов	37

3	Экспериментальные исследования	38
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	53
4.1	Составление перечня работ	53
4.2	Определение трудоемкости работ	54
4.3	Построение графика работ	58
4.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	60
4.5	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, социальной и экономической эффективности исследования.	65
5	Социальная ответственность	67
5.1	Техногенная безопасность	69
5.1.1	Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды	71
5.1.2	Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды	75
5.1.3	Охрана окружающей среды	81
5.1.4	Защита в чрезвычайных ситуациях	83
5.1.5	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	85
	Заключение	89
	Список использованных источников	91

Введение

В Томском политехническом институте в начале 70-х годов в лабораторных условиях под руководством профессора А.А. Воробьева при механическом воздействии на диэлектрические материалы были зарегистрированы электромагнитные сигналы [1]. Обнаруженное явление получило название механоэлектрических преобразований. Позже было установлено, что переход механической энергии в электромагнитную зависит от свойств исследуемых материалов. А.А. Воробьев указывал [2, 3], что все виды энергии могут переходить в механическую. Для такого перехода необходимо наличие заряженных частиц или свободных зарядов. Следовательно, причиной появления электромагнитных сигналов (ЭМС) является изменяющийся или появляющийся на поверхностях диэлектриков электрический заряд при их деформировании.

Первые исследования, проведенные в лабораторных условиях, показали, что электромагнитная эмиссия (ЭМЭ), возникающая при механоэлектрических преобразованиях (МЭП), зависит от прочности горных пород. В горных породах, являющейся сложной системой, следует ожидать закономерности изменения интенсивности ЭМС от строения и состава образцов, а также от деформации.

В проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДиП) Томского политехнического университета (ТПУ) ведутся разработки метода контроля напряженного состояния (НДС) горных пород в массиве и прогноза геодинамических

проявлений. Эти разработки основаны на изучении механоэлектрических преобразований (МЭП) [4, 5]. Горная порода имеет петрофизические особенности, поэтому горная порода в массиве, состоящем из разновидностей горных пород, достаточно сложный объект для исследований.

При разработке подземных рудных месторождений происходит изменение тектонических напряжений, которое сопровождается геодинамическими явлениями (горные удары и др.). В этом случае горных породах происходят активно МЭП. Главная задача, в этом случае, выявить признаки готовящегося геодинамического события по характеристикам ЭМЭ или параметрам ЭМС.

Лабораторными исследованиями установлено, что отклик на внешнее акустическое воздействие, появляющееся в процессе локальной динамической перестройки структуры горных пород, является одним из механизмов генерирования ЭМС. Поэтому, одним из доступных способов выявления закономерностей МЭП для разрабатываемого метода является физическое моделирование в натуральных и лабораторных условиях.

1 Литературный анализ исследований диагностических критериев разрушения на основе электромагнитного излучения

В связи с добычей руд на более глубоких горизонтах становится актуальной задача прогноза и контроля геодинамических событий в массиве. Ученые, Н.В. Мельников [7], Д.М. Бронников, К.Н. Трубецкой [8], Е.И. Шемякин [9] и др., рассматривающие вопросы, связанные с увеличением

глубины ведения горных работ, выдвигали главную проблему увеличения напряженного состояния горных пород в массиве и геодинамических проявлений горного давления. Геодинамические события, исходя из исследований П.В. Егорова, Б.Ш. Винокура, И.М. Петухова [10], связаны с величиной механических напряжений в массиве горных пород и со скоростью их изменения.

Авторы [11] указывают, что проведение новых горных выработок приводит к деформации горных пород в массиве, обрушению и сдвигению по тектоническим разломам. Такие работы вызывают перераспределение напряжений и к динамическим проявлениям: толчки, тектонические и горные удары, стрельание, интенсивные заколообразования и т.п. Однако, показано многочисленными исследованиями, подготовка геодинамического проявления – это сложный процесс, протекающий в горном массиве.

На сегодняшний день достаточно остро стоит проблема исследования подготовки геодинамических событий и их прогнозирования.

Решение этой проблемы осложнено тем, что рудные месторождения находятся в геологически сложных условиях. В связи с этим исследователи обращаются к математическому и физическому моделированию процессов, происходящих в массиве.

1.1 Модели разрушения горных пород. Основные гипотезы об источниках и механизмах генерирования электромагнитного сигнала

На процесс разрушения горных пород оказывают влияния:

1 – структурные особенности горных пород (от крупнокристаллического до скрытокристаллического) [12];

2 - различные масштабные уровни процесса разрушения [13-15]. Уровень субмикроскопический – при этом разрываются атомные и молекулярные связи; микроскопический – происходит развитие микротрещин, разрываются связи между зернами и кристаллами и происходит разрушение отдельных кристаллов; макроскопический - трещины [13].

Поскольку, разрушения является сложным и многостадийным процессом, то число стадий будет зависеть от временных и масштабных этапах рассматриваемого процесса. При подходах более общих можно выделить три стадии:

- зарождение начальных микротрещин,
- переход к формированию очага разрушения,
- макроразрыв [16].

Образуются микротрещины со скоростями, близкими к звуковым. Размеры их соотносятся с размерами элементов структуры. Энергии межатомных связей близки к энергии активации зарождения микротрещин[16]. Полученные закономерности позволяют зарождение начальной микротрещины рассматривать как сложный процесс, который развивается в несколько этапов.

Поскольку в горных породах имеется структурная неоднородность, то механическая нагрузка, приложенная к образцу, распределяется неравномерно. Микротрещины зарождаются в наиболее напряженных областях материала и тормозятся за счет протекания релаксационных процессов на границах

включений [16]. Стабилизируется микротрещина, дальнейший рост ее может наступить при условии, обеспечивающим новое состояние неустойчивости.

Следовательно, зародышевые микротрещины возникают в материале механически напряженном и останавливаются на границе неоднородностей. В дальнейшем разрушение проходит двумя путями: при неполной стабилизации зародышевых микротрещин некоторые подрастать будут. Это приводит к образованию магистральной трещины. При полной стабилизации начальных трещин следующим этапом будет процесс их накопления [17].

В ТПУ была высказана гипотеза, согласно которой возникновение и рост трещин сопровождается излучением электромагнитных импульсов. Это предположение дало толчок к исследованиям физики процесса МЭП.

К настоящему времени разработано порядка десяти гипотез возникновения ЭМИ. Основной из них является предположение, что импульсы ЭМИ возникают вследствие эмиссии электронов с берегов растущих трещин [21-23]. Неравномерное движение зарядовой мозаики по берегам растущих трещин [24, 25] также приводит к импульсному ЭМИ, а также нарушение связей двойных электрических слоев на границах неоднородности [31, 32]. Наиболее существенным при появлении ЭМИ является излучение зарядов, движущихся с вершиной прорастающих трещин [26, 27]. Вклад в ЭМИ оказывают также движущиеся дислокации в щелочно-галогидных кристаллах при их деформировании [28-30].

Теоретические обоснования возникновения ЭМИ рассматривались в [36-40]. Панасюк В. В. [36] установил, что время развития при возникновении трещины равно длительности сигнала ЭМИ.

Куксенко В.С. считает, что существует связь между длительностью ЭМС и размерами трещин, образующихся под нагрузкой [41]. Вследствие этого принято считать, что появление одиночного импульса, либо пакета импульсов ЭМИ сопровождается единичной трещиной. Авторы [42, 43] отмечают, что, исследуя кинетику трещин, можно исследовать процесс разрушения.

Общим для процессов генерирования импульсного ЭМС является то, что, они обусловлены изменением зарядового состояния, вследствие какого либо внешнего воздействия на диэлектрические материалы.

В связи с этим необходимо дальнейшее развитие теоретических и экспериментальных работ для выявления закономерностей и использования их для разрабатываемого метода контроля НДС. Для этого необходимо решение следующих задач:

- исследования, направленные на изучение распространения ЭМИ в реальных горных породах, имеющих различные электрические свойства;
- исследования возможностей регистрации ЭМИ в ближней, переходной и дальней зонах;
- исследования для выявления частот ЭМС, чувствительных при изменении НДС материала.

1.2 Анализ лабораторных и натурных исследований разрушения горных пород на основе регистрации ЭМИ

Работы [33, 34] являются одними из первых по одновременной регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) и ЭМИ. В них описывается эксперимент на бетонных блоках. При регистрации ЭМИ использовалась антенна с высокочастотным усилителем в диапазоне частот $10^4 - 0.8 \cdot 10^6$ Гц. Установлено, что сигналы имеют импульсный характер. Амплитуды этих сигналов отличаются более чем на порядок. Их количество увеличивается по мере роста прикладываемой нагрузки.

В работе [44] установлено, что:

- с увеличением прочности возрастает количество ЭМИ и их интенсивность;
- при увеличении нагрузки возрастают регистрируемые синхронно импульсы АЭ и ЭМИ;
- при нагружении образцов горных пород на стадии микропластической деформации появляются низкочастотные ЭМИ, которые сопровождают весь процесс деформирования, а высокочастотные ЭМИ генерируются только на начальной стадии нагружения и стадии разрушения;
- повышенные значения спектральных амплитуд в спектральном анализе ЭМИ соответствуют моменту разрушения;

В работе [44] указывается, что при проведении лабораторных исследований необходимо связать этапы механического воздействия с

анализом спектрально-временных параметров ЭМИ. В этом случае необходимо провести достаточное количество испытаний по синхронной регистрации исследуемых параметров. Повторяемость экспериментов позволит выявить устойчивые закономерности в параметрах ЭМИ. В дальнейшем это потребует разработки новой многоканальной системы регистрации механических и ЭМС, с использованием современных методов и средств.

За последнее время проводимые работы по применению метода МЭП в науках о Земле существенно расширились. Активные исследования в области физики МЭП и в области применения метода МЭП для прогнозирования геодинамических явлений в массиве горных пород положило начало систематическим работам по поиску прогностических признаков разрушения горных пород на подземных горных предприятиях в различных странах мира.

Так, например, в Китае интерес проявился к использованию метода ЭМИ для прогноза внезапных выбросов породы, угля и газа в шахтах [58]. Основываясь на изучении физики данного явления была предположена оценка возможности прогнозирования [52,53,54,57,58]. Эти работы находятся на начальных стадиях исследований. На основе оценки количества ЭМ импульсов приведены результаты изучения механизма влияния газа на электромагнитную эмиссию (ЭМЭ) и закономерности принципа прогнозирования выброса угля и газа. Предполагается, что с процессом деформирования и трещинообразования тесно связана ЭМЭ, а также с нагрузкой на угольный пласт и массив пород. Наличие газа в угольном пласте усиливает интенсивность ЭМЭ. Амплитуда ЭМЭ и коэффициент пульсации пакета электромагнитных волн отражают

опасность выброса угля и газа. В тоже время, несмотря на большое количество исследований МЭП надежных критериев геодинамических событий не разработано. Исследуя процессы, происходящие в шахтах, исследователи считают, что возможны два вида разрушения:

- с постепенным нарастанием интенсивности сопутствующих сигналов ЭМИ в момент разрушения угля;

- ускоренным нарастанием интенсивности сопутствующих сигналов ЭМИ в момент разрушения угля.

На Таштагольском железорудном месторождении для прогноза удароопасности используется методика, основанная на регистрации амплитуды суммарного поля ЭМИ за определенный интервал времени. Эта методика использовалась с применением прибора РВИНДС (радиоволновой индикатор напряженно-деформированного состояния, разработанной в ПНИЛ ЭДиП ТПУ) [47, 56]. Расширение частотного диапазона при регистрации ЭМИ до 200 кГц была опробована с использованием макета прибора, разработанного ЦНИЛ ВГСЧ Урала [56]. Этот макет работает с набором узкополосных электрических и магнитных антенн и прошел испытания на месторождениях СУБРа. В данной аппаратуре реализованы критерии:

- количество импульсов ЭМИ или счет импульсов;

- скорость счета или скорость следования импульсов в единицу времени.

Таким образом, в ОИФЗ РАН, в качестве преобразователя механической энергии в электрическую при геодинамических явлениях принят механизм дипольного излучения зарядовой мозаики на бортах раскрывающихся трещин.

Так как генерация ЭМИ является процессом динамическим, то деформирование горного массива перед геодинамическим событием или поверхностного слоя перед землетрясениями увеличивается. Однако, здесь важны скорости нарастания или спада изменений напряжений или деформаций, а не их абсолютные значения.

Основные недостатки метода, основанного на регистрации сигналов ЭМИ, заключаются в том, что используемый счет и скорость ЭМИ, затрудняют применение критерия, т.к. именно в диапазоне частот (до 30 кГц) присутствуют промышленные помехи наибольшего уровня, которые могут быть зарегистрированы как полезный сигнал и тем самым внести ошибки в результаты измерений. Кроме того, регистрация низкочастотной огибающей высокочастотного сигнала производится в низкочастотной части частотного диапазона, что не позволяет анализировать, во-первых, процесс возникновения мелких трещин, соответствующих высокочастотным сигналам, и, во-вторых, переход от высокочастотных составляющих сигналов к низкочастотным, предваряющим, по мнению авторов [18,45,46] процесс нарушения сплошности.

1.3 Аналитический обзор зарубежной литературы

Об электромагнитном излучении и его низкой частоте, связанной с сейсмичностью в подземных шахтах и землетрясениях, сообщалось в течение столетия (Брэди и Рауэлл, 1986). Большая часть этой работы включила идентификацию электромагнитной эмиссии, как индикатора землетрясений.

ЭМ частоты, как в землетрясениях, так и в лабораторных испытаниях, колебались от 0.01 Гц до 30 МГц [59].

1.3.1 Механизмы электромагнитного излучения

•Брэди и Рауэлл (1986) суммировали четыре механизма, которые являются источниками ЭМИ при разрушении горной породы: (1) горные фрагменты, фрикционным образом нагретые до накала, (2) электростатический выброс, производимый деформацией пьезоэлектрических полезных ископаемых или разделением заряда на разрушенных поверхностях, (3) плазмы, произведенные быстрым и интенсивным нагреванием горных пород, и (4) возбуждение бомбардировкой заряженными частицами из окружающей среды (электронам, или положительными или отрицательными ионами). Брэди и Рауэлл пришли к заключению, что излучение, зафиксированное от экспериментальных образцов в лаборатории, было вызвано возбуждением окружающей среды бомбардировкой заряженных частиц.

•Цзы-цян и др. (1988) исследовали три источника света: (1) тепловая радиация от трения, (2) электростатические выбросы, произведённые пьезоэлектрическими эффектами или разделением заряда на разрушенных поверхностях, и (3) возбуждение окружающей среды бомбардировкой частицы. Поскольку электромагнитное излучение наблюдалось только в тот момент времени, когда электроны ударяли воздушные молекулы, авторы пришли к заключению, что наиболее вероятный источником ЭМЭ была, возбуждённая бомбардировкой частицей, окружающая среда.

•Брэди (1996) обнаружил электрические сигналы в диапазоне частот 900 - 5,000 Гц, используя катушку, и монопольные антенны. ЭМ эмиссия совпала с заключительным разрушением неограниченного горного образца. Брэди тогда пришел к заключению, что низкая частота сигналов (900 - 5,000 Гц), зарегистрированных после горного разрушения, была вызвана поворотом и вибрацией заряженных горных фрагментов. Его наблюдение было совместимо с гипотезой, что низкая частота ЭМ эмиссии не должна была произойти, если бы произошло разрушение (таким образом создав невозможное движение частиц). Он отметил, что никакая эмиссия не была очевидна в частотах, больше, чем 10 кГц и, что эмиссия была очевидна только в низких частотах, а не в высоких.

1.3.2 Возможности прогноза землетрясения

•Martner и Sparks (1959) отметили электрический потенциал до прибытия сейсмических волн на поверхность земли. Приблизительно за 30 минут до прибытия главных шоков землетрясения, Гохберг и Моргунов (1982) зарегистрировали ЭМЭ в частотах 27, 81, и 1.5 кГц и 1.63 МГц. Позже, Мигунов и др. (1984) зарегистрировали ЭМЭ в частотном диапазоне от 0.5 до 50 кГц, которые были связаны с сейсмичностью от землетрясений. Fujinawa и Takahashi (1990) наблюдали ЭМ эмиссию в диапазонах частот 0.01-12 Гц и 1-9 кГц за часы до появления землетрясения в Японии. Fujinawa и Kumagai (1992) наблюдали ультранизкую частоту (0.01-0.6 Hz) к очень низкой частоте электрической эмиссии (1-3 кГц) до, во время, и после извержений вулкана.

1.3.3 Лабораторные исследования

- Tuck и др. (1976), исследовали куб кварцита вместе с кварцевым кристаллом, чтобы оценить пьезоэлектрическую эмиссию. Молоток весом 0.5 килограмм использовался в качестве сейсмического источника. Они пришли к заключению, что если нет пьезоэлектрического слоя, то трудно использовать ЭМ эмиссия для исследования рудных тел.

- Nitsan (1977) разрушил кварцевые кристаллы, кристаллы турмалина и кварцсодержащие породы и зарегистрировал ЭМ эмиссию в частотном диапазоне 1-10 МГц. Его интерпретация источника эмиссии было пьезоэлектричество.

- Гончаров и др. (1980) проверил несколько крупных (от 0.55 до 0.65 м) бетонных блоков с включениями гранита, применив статическую нагрузку, при этом делая запись ЭМ и акустической эмиссии до разрушения. При одновременной записи ЭМ и сейсмической эмиссии количество ЭМ эмиссии уменьшается, при этом амплитуда увеличивается. Они также выявили, что отношение ЭМ эмиссии к акустической после разрушения было в соотношении 20:1, когда как до разрушения (при начальной нагрузке), отношение было 7:1.

- В 1981 Bishop изучил пьезоэлектрические эффекты в породах, содержащих большое количество кварца. Используя разработанную в лаборатории систему, он попытался доказать, что ось кристаллов кварца является причиной ЭМ эмиссии. Он заключил, что существует зависимость между ЭМ эмиссией и ориентацией оси в кристаллах кварца.

•Хэнсон и Рауэлл (1982) проверили кварцит с Шахты Галенита. ЭМ эмиссия достигала резко максимума ниже 40 кГц на трех антеннах. Было выявлено, что (1) формирование разрушения совпало с ЭМ эмиссией, (2) ЭМ эмиссия находится в частотном диапазоне ниже 40 кГц, (3) ЭМ эмиссия имеет направленность и (4) амплитуда ЭМ эмиссии не зависит от напряжения, но зависит от снижения напряжения.

•Хатиашвили (1984) показал, что при увеличении количества трещин в кристалле, электрический потенциал увеличивается.

•Ogawa и др. (1985) использовали шаровидные антенны, охватывающие частотный диапазон от 10 Гц до 100 кГц, для измерения ЭМ эмиссии при разрушении кристаллических пород в лаборатории. Выяснили, что осадочные породы, содержащие меньше кварца, генерируют меньше электромагнитной эмиссии. Сделан вывод о том, что источником ЭМ эмиссии был любой контакт или пьезоэлектричество.

•Zi-qiang и др. (1988) разрушили гранит в лаборатории и выяснили, что самый интенсивные импульсы излучения и акустической эмиссии были зарегистрированы одновременно в момент разрушения породы.

•Yamada и др. (1989) также разрушили гранит в лаборатории и зарегистрировали ЭМ эмиссию в частотном диапазоне от 80 кГц до 1.2 МГц. Они пришли к заключению, что источником ЭМ эмиссии не был пьезоэлектрический эффект, но источник как-то связан с поверхностями, созданными трещинами.

- Weimin и др. (1991) разрушили кварц, известняк и гранитные образцы и выявили, что зарегистрированная ЭМ эмиссия была результатом разрушения породы.

- Рабинович и др. (1995) протестировали гранит и зарегистрировали ЭМ эмиссию в диапазоне 100 кГц. Они также зарегистрировали ЭМ частоты до 10 МГц, в кварцевом порфире. Были отмечены два типа ЭМ импульсов: “короткий” импульс 1–3 микросекунды и “длинный” импульс больше 400 микросекунд.

1.3.4 Теоретические работы

- Рабинович и др. (2000) попытались объяснить механизм ЭМ эмиссии и пришли к заключению, что после раннего закрытия поры, микротрещины возможно соединялись до тех пор, пока пиковое напряжение не было достигнуто, и порода не разрушилась. Анализ информации о частоте и длине волны ЭМ эмиссии показал, что их частотный диапазон составлял от 1 кГц (с длиной волны 300 км) до 10 МГц (с длиной волны 30 м).

- Goldbaum и др. (2001) определили четыре различных форм волн ЭМ эмиссии: короткие единственные импульсы, короткая цепь единственных импульсов, расширенная цепь импульсов, и новая группа, импульсы вдоль базовых изменений напряжений. Важным в их работе были ЭМ частоты, достигающие 25 МГц (раньше значения доходили только до 10 МГц).

- Рабинович и др. (2001) продолжили исследование механизмов ЭМ эмиссии и пришли к заключению, что механизмы ЭМ эмиссии землетрясений совпали с механизмами микроразрушений в лабораторных испытаниях. Они

изучили закон Гутенберга-Рихтера и соотношение Benioff strain-release для землетрясений и нашли, что соотношение простиралось к микроуровню.

1.3.5 Подземные работы

•Соболев и др. (1984) протестировали ценность сбора данных ЭМ эмиссии, как метод разведки кварцевых жил и сульфидов благородных металлов. Были взорваны заряды взрывчатого вещества и измерена ЭМ эмиссия, зарегистрированная возбужденными минералами. Их эксперименты показали, что ЭМ сигналы, генерированные кварцевыми жилами в Гигантской Шахте Йеллоунайфа (Канада) были в диапазоне приблизительно 8 кГц, и были подобны ЭМ эмиссии кварца, разрушенного в лаборатории. Дальнейшие эксперименты с жилами сульфида в Шахте Салливана (Канада), также показали генерацию ЭМ эмиссии с частотой до 350 кГц. Выявлено, что кварц и сульфиды, такие как галенит, сфалерит и пирротин испускают ЭМ волны вдоль границ зерен.

•Nesbitt и Austin (1988) сделали запись сейсмической и ЭМ эмиссии на глубине 2.5 км в подземной шахте. Они выяснили, что ЭМ эмиссия предшествовала сейсмической волне.

•O'Keefe и Thiel (1991) сделали запись ЭМ эмиссий, связанных с разрушениями в каменоломнях в Австралии, и зарегистрировали сигналы в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц.

•Russell и Barker (1991) исследовали ожидаемые амплитуды ЭМ эмиссии и выяснили, что определение истинных пьезоэлектрических импульсов затруднительно, т.к. их система получения и накопления данных записывает и

акустические и пьезоэлектрические сигналы, как части одной и той же формы волны. В лучшем случае они предположили, что часть собранного сигнала была пьезоэлектрической.

- Butler и др. (1994) успешно отобразили стратиграфические границы, используя реакцию эмиссии. Они установили, что они могут обозначить границу между ледниковым и органически-богатым заполнениями, путем анализа формы волны эмиссии, произведенные любым сейсмическим источником, кувалдой или капсуль-детонатором. Их работа показала, что граница или интерфейс ледникового и органически-богатого заполнений, были ответственны за эмиссионные преобразования, а не горизонт грунтовых вод.

- Wolfe и др. (1996) использовали исследования эмиссии в попытке определить глубину горизонта грунтовых вод. Используя, как основание, сейсмические исследования преломления и исследования удельного сопротивления в двух буровых скважинах, они показали соответствующую глубину горизонта грунтовых вод, как сравнение с базовыми данными. Таким образом, их исследование продемонстрировало, что данные об эмиссии могли быть приобретены с других зон.

- Russell и др. (1997) использовали методы эмиссии, чтобы найти жилы кварца и сульфида в трех подземных шахтах. Они были успешны в обнаружении кварцевых жил, жил сульфида и границ между пластами с отличающейся проходимостью, используя данные от ЭМ эмиссий.

- Frid (1997b) пришел к заключению, что ЭМ эмиссия в угольных шахтах лежит в узком диапазоне частот от 30 до 150 кГц. Он использовал 100 кГц в

качестве самой удобной частоты исследуя ЭМ эмиссию (1997). Он также заметил, что высокое напряжение в породах около горных выработок, увеличивает естественную ЭМ эмиссию.

- Frid (1999) использовал ЭМ эмиссию, чтобы очертить напряжение в угольных пластах. Он измерил ЭМ интенсивность во время бурения скважины и выяснил, что отверстие, приближающееся к месту пика напряжения возбуждает резкое увеличение ЭМ излучения.

- Frid и др. (2000) продолжили свою работу в лаборатории и попытались коррелировать ЭМ эмиссия с размерами трещин. Они установили, что амплитуды ЭМ эмиссий и их изменения с нагрузкой были независимы от разрушений растяжения и сдвигов, и, что они зависели, только от площади всей трещины.

- Frid (2001) признали ценность использования критерий ЭМ эмиссии, в качестве предвестника опасности обвала пород в угольных шахтах при использовании предельных значений разрушаемого угольного пространства, ширины горных выработок, толщины угольного пласта и упругие свойства угля.

- Sines и Knoll (лекция, 2000) использовали систему измерения и обработки данных, чтобы обнаружить сейсмическую и ЭМ эмиссии на 4600 уровне Шахты Галенита. Они испытали около 7,200 образцов в секунду (частота Найквиста 3,500 Гц) используя две монопольные антенны 12.5 и 15.2 м длиной. Они не использовали фильтров, чтобы устранить низкочастотную эмиссию и обнаружили многочисленные спусковые механизмы на ЭМ антенне,

которые, как изначально думали, совпадали с сейсмической активностью. Однако, когда ЭМ и сейсмические формы волн были проанализированы, они выяснили, что большая часть сейсмической эмиссии фактически предшествовала ЭМ эмиссии, которая физически невозможна. Дальнейший анализ полученных форм волны показали, что большинство ЭМ эмиссии было вызвано шумом, включая открытие и закрытие вентиляционных дверей (соленоид на 60 Гц), деятельность локомотива и погрузка линии.

- Butler и др. (2001) провели учебно-производственные практики в Шахте Брансуика № 12 в Канаде в попытке связать ЭМ эмиссию с сейсмической активностью, а также очертить руду сульфида. Они использовали различные антенны с диапазоном частот от 1 Гц до 4.5 МГц. Они установили, что широкополосная ЭМ эмиссия с частотой до 800 кГц могла быть сгенерирована сейсмичностью и разрушением. Однако результаты не подтвердили, что сейсмичность является источником ЭМ эмиссии.

- Vozoff (2002) попытался продемонстрировать использование ЭМ контроля, как систему оповещения обвалов в угольном пласте в Австралии. Он снял три полные группы данных и выяснил, что из трех, одна группа совпала с обвалом и была коррелирована с ЭМ интенсивностью, у другой группы, возможно, была “слабая корреляция”, а у последней группы вообще не было ЭМ корреляции.

1.4 Постановка задачи исследования

Анализируя литературные данные, следует отметить, что к настоящему времени проведено большое количество исследований явления механоэлектрических преобразований энергии не только в горных породах, но и в различных диэлектрических материалах. Определены источники, ответственные за появление электромагнитного сигнала, разработаны механизмы механоэлектрических преобразований и выявлены их основные закономерности. Все эти исследования позволили сделать вывод о применимости явления механоэлектрических преобразований для контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогноза геодинамических явлений, таких как горные удары, землетрясения, для контроля сдвижения экзогенных геологических процессов. Широкое использование явления получило также для целей дефектоскопии. На протяжении всего времени изучения явления механоэлектрических преобразований разрабатывается и совершенствуется аппаратура, регистрирующая различные параметры электромагнитного сигнала, предложены критерии оценки состояния исследуемого объекта по регистрируемым параметрам. Однако, несмотря на то, что в основном разработаны физические основы изучаемого явления, в настоящее время нет надежных критериев прогноза геодинамических событий. Прогноз любого события это установление места его локализации, времени проявления и оценка выделившейся энергии.

Одним из доступных способов разработки методов прогноза геодинамических событий и контроля за процессом разрушения является моделирование в лабораторных и натурных условиях. Это позволит выявить связь между механоэлектрическими преобразованиями и объектом исследований. Сам процесс разрушения горных пород не внезапный акт, а заключительный этап процесса, характеризующегося определенной длительностью и проходящий в своем развитии несколько стадий.

Сложная иерархическая структура горных пород приводит к тому, что на протяжении всего процесса деформирования изменяются параметры регистрируемого ЭМС. Вследствие этого, основной задачей прогноза является оценка взаимосвязи параметров ЭМС на определенных этапах напряженно-деформированного состояния и выявление параметра, являющегося прогностическим признаком разрушения.

Поэтому целью настоящей работы является физическое моделирование механоэлектрических преобразований в горных породах, а именно выявление закономерностей параметров электромагнитного сигнала при пьезоакустическом воздействии на образцы горных пород. Это внесет свой вклад в разрабатываемый метод мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород и контроля удароопасности.

2. Методика исследования параметров электромагнитных сигналов при пьезоакустическом возбуждении образцов

2.1 Методика пьезоакустического возбуждения образцов горных пород

При пьезоакустическом воздействии на образцы горных пород использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой представлена на рисунке 1.

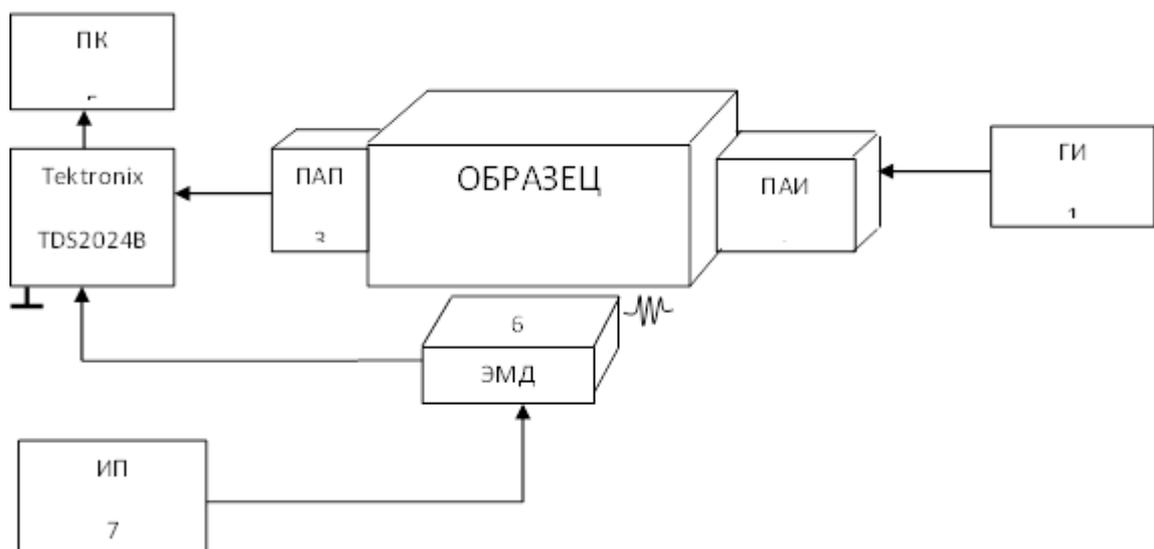


Рисунок 1-Блок-схема экспериментальной установки для регистрации ЭМС при пьезоакустическом возбуждении.

На рисунке 1 показано: 1 – генератор высоковольтных импульсов для возбуждения пьезоакустического излучателя. Длительность вырабатываемых импульсов: 10^{-6} - 10^{-4} с. Амплитуда импульсов: 100-800 В; 2 – ПАИ – пьезоакустический излучатель; 3 – ПАП – пьезоакустический приемник; 4 – цифровой двухканальный осциллограф Tektronix TDS2024B с возможностью запоминания сигналов и передачи их на компьютер. Полоса пропускания прибора равна 60 МГц, чувствительность 2 мВ/дел; 5 – ПК – персональный

компьютер; 6 – ЭМД – электромагнитный дифференциальный датчик, со встроенным усилителем мощности для согласования входного сопротивления емкостного датчика и принимающего сигнал электронного усилителя с коэффициентом усиления 100; 7 – источник питания электронной схемы ЭМД.

Для возбуждения ЭМС к образцу через акустический контакт (минеральное масло) с помощью пьезоизлучателя (2) вводился акустический сигнал, распространяющийся по образцу с продольной скоростью звука. Акустический сигнал, проходя через образец, возбуждал ЭМС и регистрировался с помощью пьезоакустического приемника (3) на экране осциллографа (4). Для приема ЭМС служит емкостной датчик (6), который принимал электрическую составляющую ЭМС. Датчик имеет согласованный дифференциальный вход. Усиленный ЭМС с датчика (6) поступал на другой вход осциллографа TektronixTDS2024B (4).

С осциллографа (4) ЭМС через интерфейс записывался в память компьютера (5), где затем производилась его дальнейшая обработка.

Анализ ЭМС производился с помощью графической программы Origin 7.

2.2 Описание экспериментальных образцов

Исследования проводились на образцах горной породы Гаштагольского железорудного месторождения. Образцы имели форму цилиндра. Вырезались из керна, торцевые поверхности шлифовались до плоскопараллельности. Размеры образцов составляли 8x4 см. На рисунке 2 приведены фотографии одного из исследуемых образцов горной породы с четырех сторон. На рисунке

2 видим, что образец сложный по структуре, состоящий из минерала магнетита (темный цвет на рисунке) и кальцита (светлый цвет). Пьезоакустическое возбуждение такого образца производилось по 10 раз сначала с противоположных торцов, а затем перпендикулярно основной оси образца и также с четырех сторон.

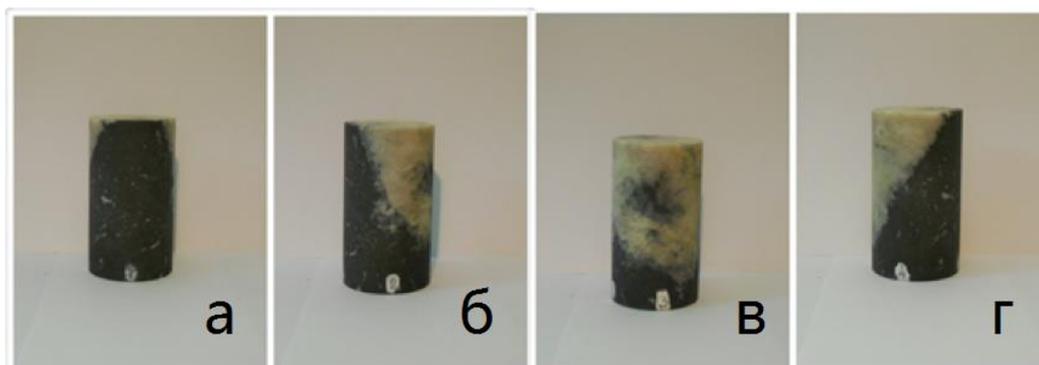


Рисунок 2 - Фотографии исследуемого образца горной породы с четырех сторон.

3. Экспериментальные исследования

На рисунках 3-5 приведены аналоговые ЭМС и их амплитудно-частотные спектры (АЧС), полученные с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) для 1, 7 и 10 пьезовозбуждения.

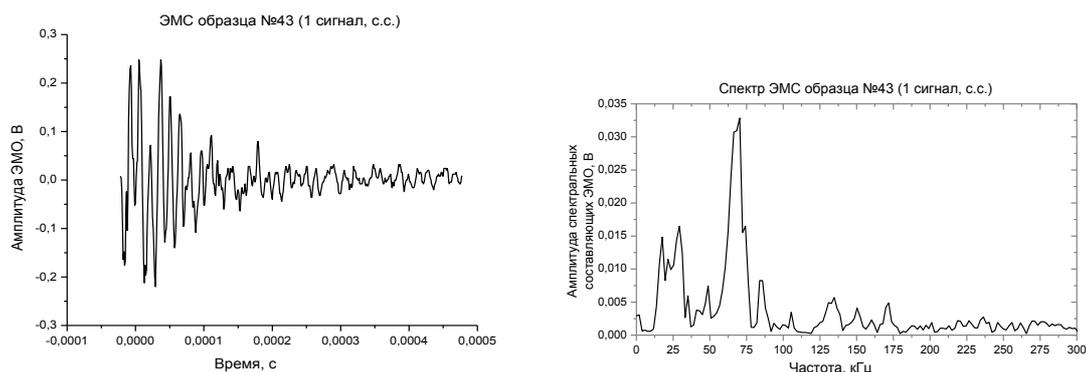


Рисунок 3 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при первом пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита.

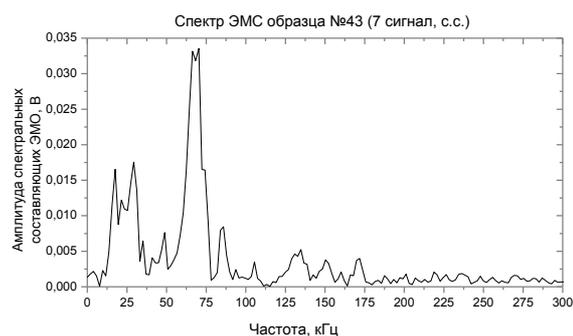
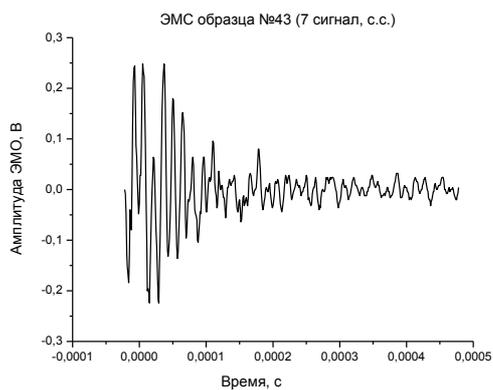


Рисунок 4 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при седьмом пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита.

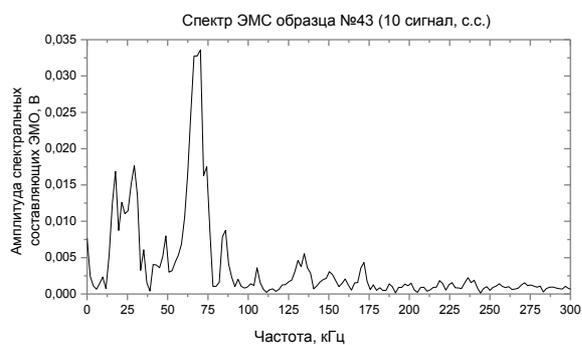
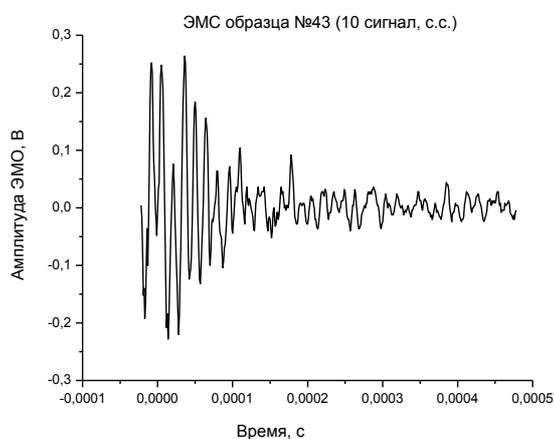


Рисунок 5 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при десятом пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита.

На рисунке 6 приведен усредненный АЧС из 10 пьезовозбуждений со стороны кальцита. На рисунке числами указана частота спектральных составляющих.

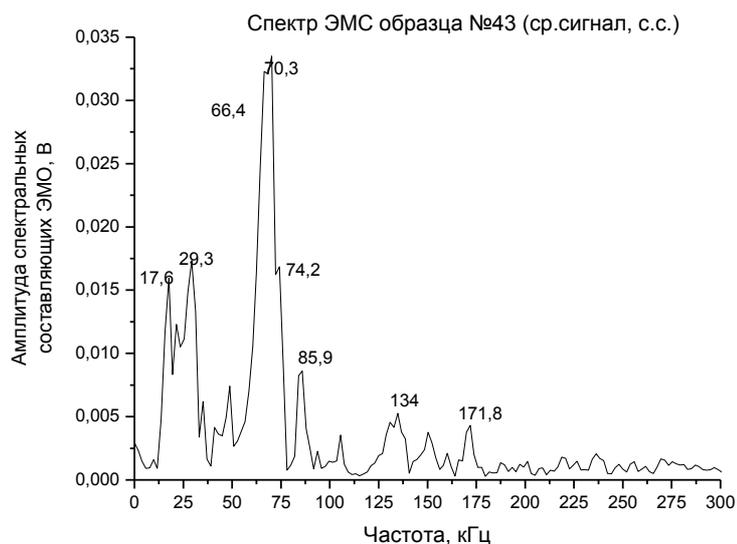
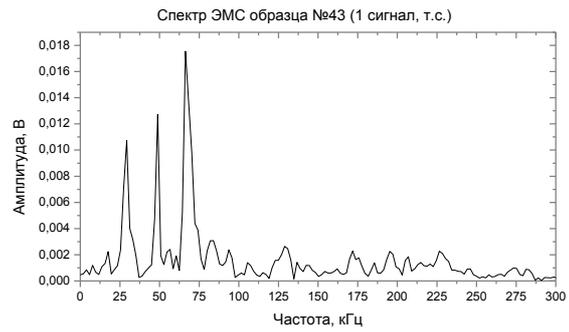
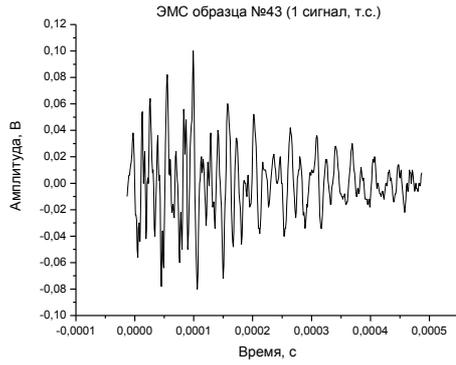


Рисунок 6 – Усредненный из 10 возбуждений амплитудно-частотный спектр ЭМО образца горной породы со стороны кальцита.

Из рисунков видно, что спектры ЭМС для всех пьезовозбуждений одинаковые. Усредненный спектр (рисунок 6) показал, что на спектре выделяются основные частотные полосы в диапазоне 17-29 кГц, 70 кГц, 86 кГц и высокочастотные 134 и 171 кГц.

Прозвучивание со стороны магнетита также проводилось 10 раз.

На рисунках 7-9 приведены аналоговые ЭМС и их амплитудно-частотные спектры (АЧС), полученные с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) для 1, 2 и 3 пьезовозбуждения.



Рисунок

7 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при первом пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита.

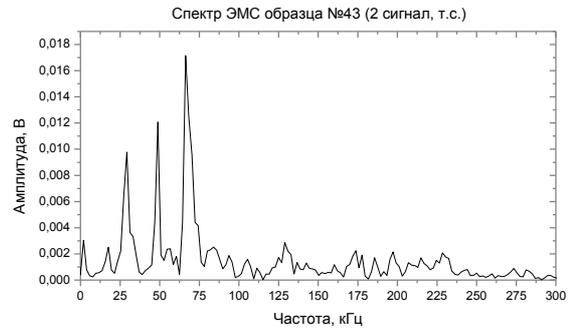
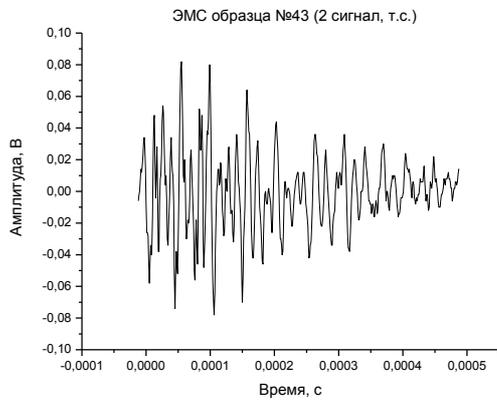


Рисунок 8 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при втором пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита.

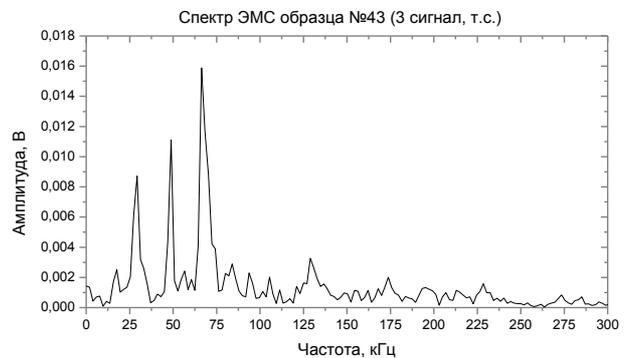
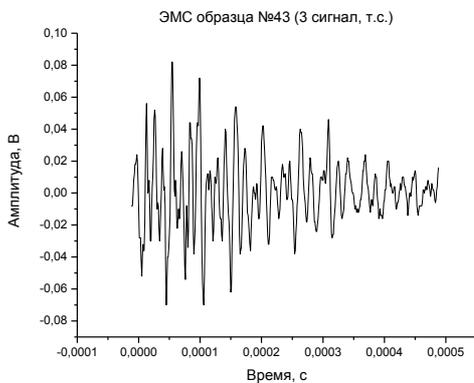


Рисунок 9 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при третьем пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита.

На рисунке 10 приведен усредненный АЧС из 10 пьезовозбуждений со стороны магнетита. На рисунке также указана частота спектральных составляющих.

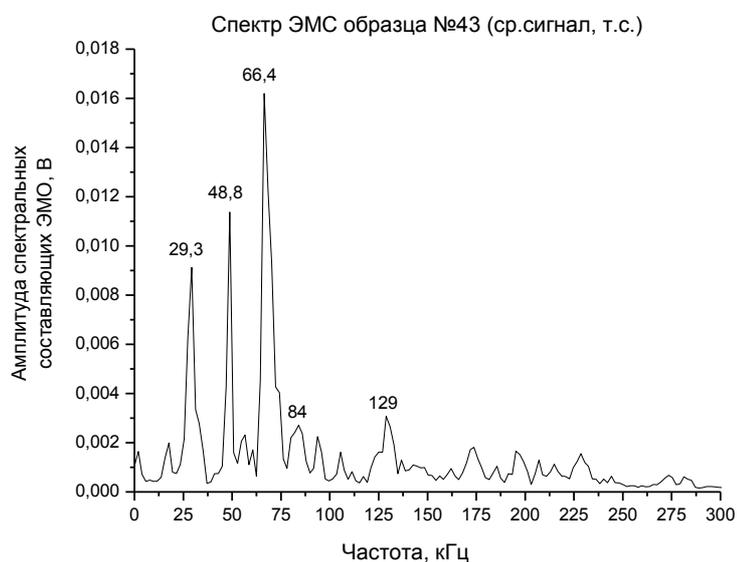


Рисунок 10 – Усредненный из 10 возбуждений амплитудно-частотный спектр ЭМО при образце горной породы со стороны магнетита.

Из рисунков видно, что спектры ЭМС для всех пьезовозбуждений со стороны магнетита одинаковые. Усредненный спектр (рисунок 10) показал, что на спектре выделяются основные частотные полосы в диапазоне 29.3 кГц, 48.8 кГц, 66.4 кГц и высокочастотные 129 кГц.

На рисунке 11 приведены совместные АЧС из 10 пьезовозбуждений со стороны кальцита и магнетита.

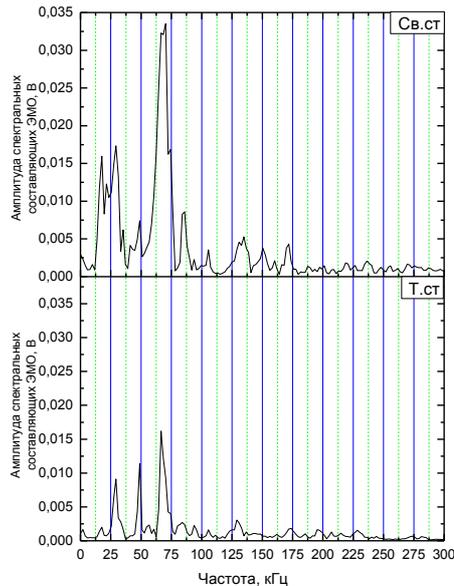


Рисунок 11 – Амплитудно-частотные спектры ЭМО при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита и магнетита.

Мы видим, что спектры ЭМО при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита и магнетита имеют отличия. Так, амплитуда спектральных составляющих ЭМС при пьезовозбуждении со стороны кальцита почти в два раза больше амплитуды спектральных составляющих ЭМС возбуждаемого со стороны магнетита. Анализируя спектральные составляющие, представленные на рисунке 11 видим, что при возбуждении со стороны кальцита спектр ЭМС расширяется как в сторону низких частот (спектральная составляющая 17 кГц), так и в сторону высоких частот (спектральная составляющая 171 кГц).

Поскольку обнаружены отличия в АЧС ЭМС при возбуждении образца с разных торцевых поверхностях, было сделано предположение, что при возбуждении образца также со стороны кальцита и магнетита, но вращая образец вокруг своей оси, мы также обнаружим отличия в АЧС ЭМС. При проведении исследований электромагнитный датчик устанавливался на

четырёх сторонах (рисунок 2). В соответствии с рисунком 2а при возбуждении электромагнитный датчик располагался параллельно стороне образца сложенного магнетитом. Со стороны 2 (рис. 2б) электромагнитный датчик располагался на границе магнетита и кальцита. Со стороны 3 (рис.2в) электромагнитный датчик располагался на стороне образца сложенного включения магнетита и кальцита. И со стороны 4 (рис.2г) электромагнитный датчик располагался также на границе кальцита и магнетита.

Со стороны 1 (рис. 2а) ЭМС не был обнаружен. Это возможно связано с недостаточной чувствительностью нашей аппаратуры.

На рис. 12 приведен аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита. Электромагнитный датчик располагался со 2 стороны (рис. 2б).

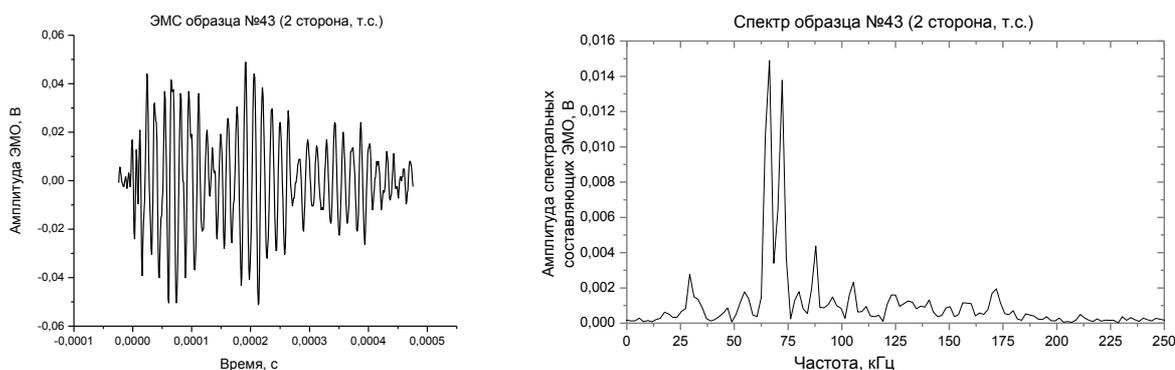


Рисунок 12 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита. Сторона образца 2 (рис.2б).

На рисунке 13 приведен аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита. Электромагнитный датчик располагался со стороны 3 (рис. 2в).

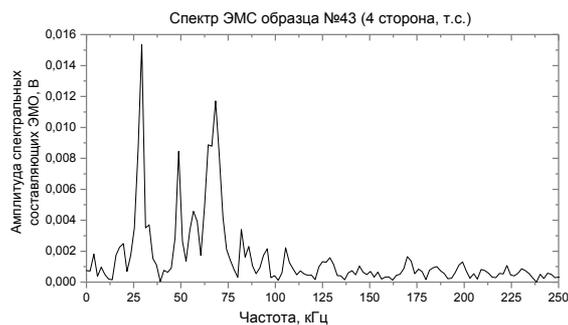
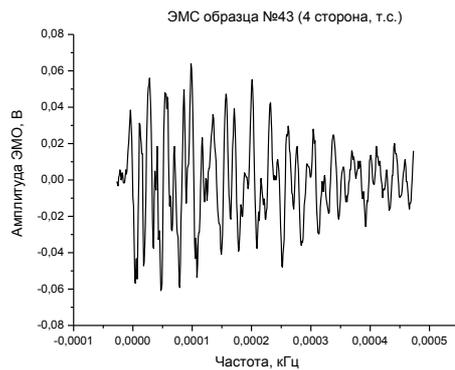


Рисунок 13 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита. Сторона образца 3 (рис.2).

На рисунке 14 приведен аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита. Электромагнитный датчик располагался со стороны 4 (рис. 2г).

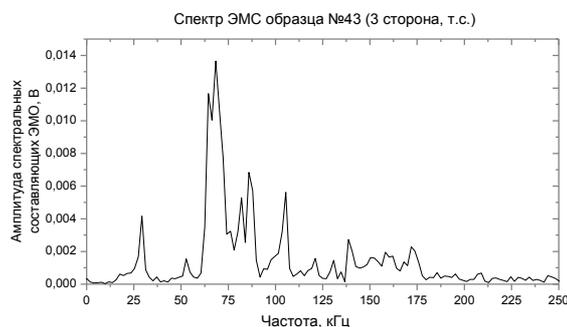
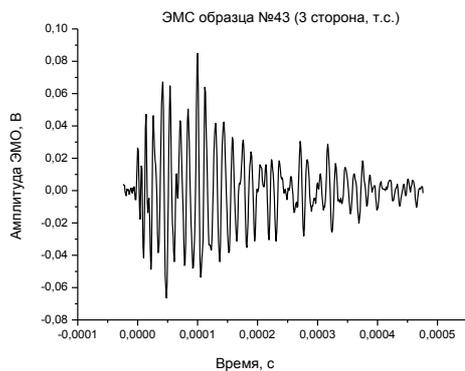


Рисунок 14 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита. Сторона образца 4 (рис.2г).

Анализируя результаты, представленные на рисунках 12-14 мы видим, что при регистрации ЭМС с разных сторон образца, сложенного минералами отличающиеся своими электрическими свойствами, наблюдаются отличия. На рис. 15 приведены спектры ЭМС при возбуждении со стороны магнетита, при расположении датчика со всех трех сторон образца.

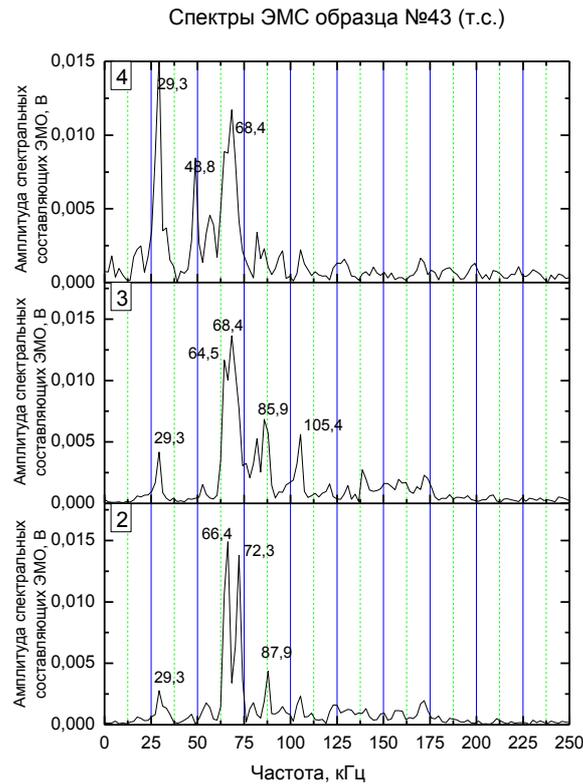


Рисунок 15 – Амплитудно-частотные спектры при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита, при расположении электромагнитного датчика с трех сторон образца.

Анализируя результаты, представленные на рис.15 мы видим, что спектры ЭМО при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита, при расположении электромагнитного датчика с трех сторон образца имеют отличия. Так, максимальная амплитуда спектральных составляющих ЭМС при расположении электромагнитного датчика со всех трех сторон одинаковая, и составляет 0,015 В. Отличие наблюдаются для амплитуд спектральной составляющей 29,3 кГц. При расположении электромагнитного датчика со стороны 4 (рис.2г) амплитуда составила примерно 0,015 В. А при расположении электромагнитного датчика со стороны 3 и 2 (рис.2в и рис.2б) амплитуда уменьшилась почти в три раза. Анализируя спектральные составляющие, представленные на рисунке 15, видим, что при

расположении электромагнитного датчика со стороны 2 спектр ЭМС расширяется как в сторону низких частот (спектральная составляющая 29.3 кГц), так и в сторону высоких частот (спектральная составляющая 105 кГц). При анализе аналоговых электромагнитных сигналов обращает на себя внимание ЭМС, зарегистрированный со стороны 2. На рис. 12 прослеживаются биения, обусловленные сложением близких частот спектра. При этом на спектре четко выделяются близкие спектральные полосы на частоте 66 и 72 кГц. Такая же форма аналогового сигнала прослеживается и при расположении электромагнитного датчика со стороны 4. Однако, для этой стороны образца на спектре ЭМС выделяются спектральные полосы 49 и 68 кГц.

Такие же исследования были проведены и при пьезовозбуждении со стороны кальцита.

На рисунках 16–19 приведены аналоговые ЭМС и их амплитудно-частотные спектры при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита. Электромагнитный датчик располагался с четырех сторон образца (рис.2а,б,в,г).

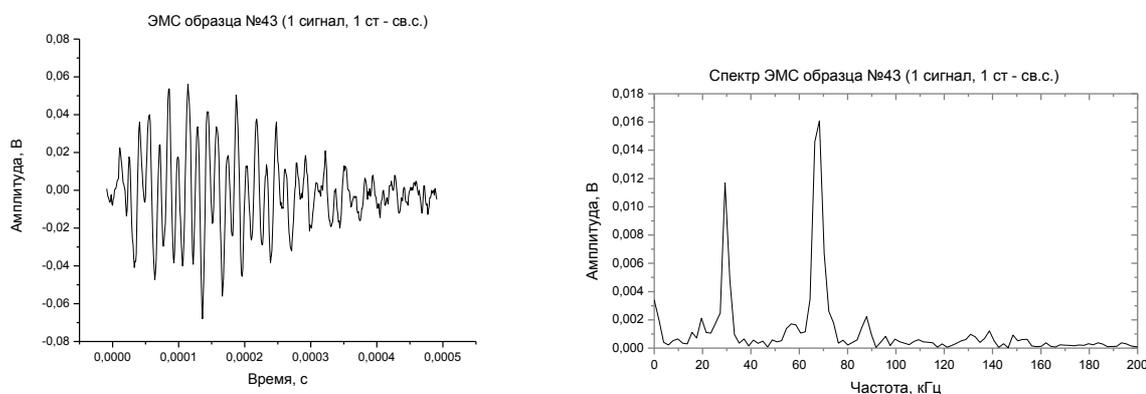


Рисунок 16 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита. Сторона образца 1.

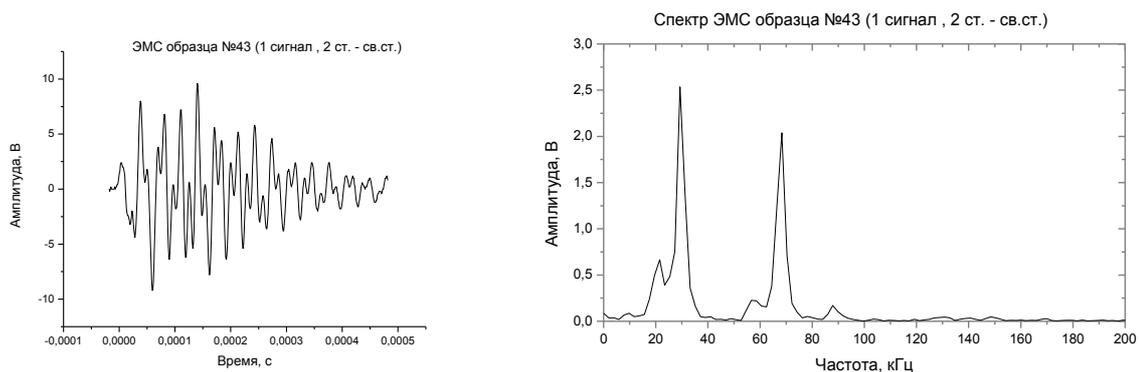


Рисунок 17 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита. Сторона образца 2.

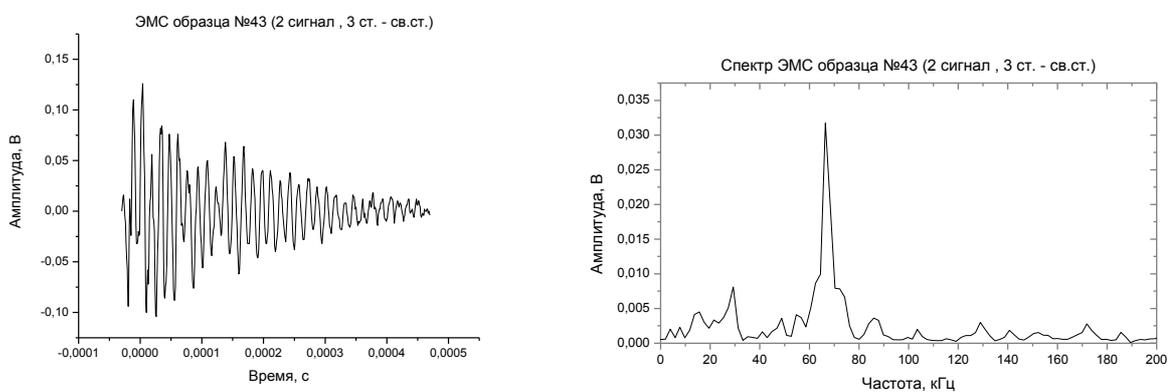


Рисунок 18 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита. Сторона образца 3.

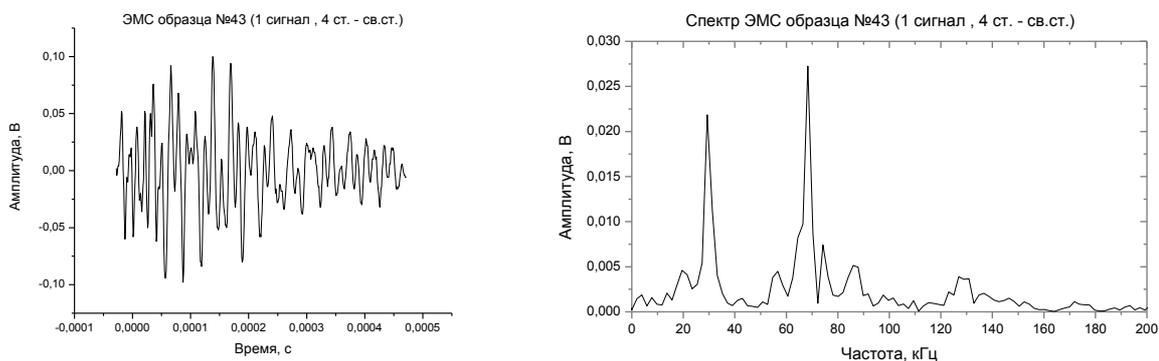


Рисунок 19 – Аналоговый ЭМС и его амплитудно-частотный спектр при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита. Сторона образца 4.

Анализируя результаты, представленные на рис. 16-19 мы видим, что при регистрации ЭМС с разных сторон образца, сложенного минералами отличающиеся своими электрическими свойствами, наблюдаются отличия.

Для удобства сопоставления спектров ЭМС при возбуждении со стороны кальцита на рисунке 20 приведены их спектры. Электромагнитный датчик располагался со всех четырех сторон образца.

Анализируя результаты, представленные на рис. 20 мы видим, что спектры ЭМО при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита, при расположении электромагнитного датчика с четырех сторон образца имеют отличия. На всех четырех спектрах четко выделяются две спектральные полосы 29,3 и 68,4 кГц. В зависимости от того, на какой стороне располагался электромагнитный датчик, мы наблюдаем изменение амплитуды этих спектральных полос. Так, наименьшее значение амплитуды спектральной составляющей 68,4 кГц наблюдается при регистрации со стороны 1 (рис.20а) и равна порядка 0,015 В.

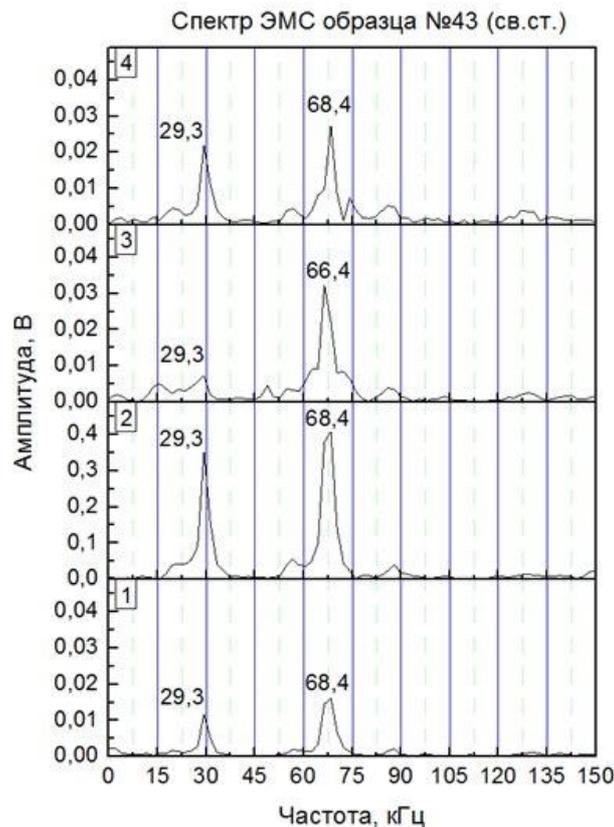


Рисунок 20 – Амплитудно-частотные спектры при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита, при расположении электромагнитного датчика с четырех сторон образца.

Это можно объяснить тем, что с этой стороны образец сложен магнетитом. Известно, что минерал магнетит имеет удельное сопротивление порядка 10^{-2} - 10^{-3} Ом•м. Удельное сопротивление кальцита $5 \cdot 10^{13}$ Ом•м. Таким образом, проводимость магнетита на несколько порядков выше, чем у кальцита. Этим и объясняется наименьшее значение спектральных составляющих. Максимальная амплитуда спектральных составляющих ЭМС при расположении электромагнитного датчика со сторон 2 составляет 0,04 В и это значение амплитуды является максимальным для этих измерений. Этот полученный результат объясняется тем, что датчик располагался на границе кальцита и магнетита (рис.20б).

Анализируя спектральную полосу 29.3 кГц, мы также наблюдаем, что минимальные значения амплитуды зарегистрированы со стороны 1 (рис.20а) и со стороны 3 (рис.20в). Эти значения составили порядка 0,005-0,01 В.

Максимальное значение амплитуды этой спектральной полосы наблюдалось также со стороны 2 (рис. 20б). Амплитуда составила примерно 0,35 В.

Таким образом, проведенные наблюдения изменения спектральных составляющих ЭМС при возбуждении со стороны кальцита показало, что спектры отличаются только величиной амплитуды спектральных составляющих.

Выводы

1. Сравнив амплитудно-частотные спектры ЭМО при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита и магнетита, мы видим, что спектры ЭМО при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита и магнетита имеют отличия. Так, амплитуда спектральных составляющих ЭМС при пьезовозбуждении со стороны кальцита больше амплитуды спектральных составляющих ЭМС возбуждаемого со стороны магнетита. И при возбуждении со стороны кальцита спектр ЭМС расширяется как в сторону низких частот (спектральная составляющая 17 кГц), так и в сторону высоких частот (спектральная составляющая 171 кГц).

2. Сравнив амплитудно-частотных спектров при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита, при расположении электромагнитного датчика с четырех сторон образца, мы видим, что спектры

ЭМО при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны магнетита, при расположении электромагнитного датчика с четырех сторон образца имеют отличия. Со стороны 1 (рис. 2а) ЭМС не был обнаружен. Это возможно связано с недостаточной чувствительностью нашей аппаратуры. Максимальная амплитуда спектральных составляющих ЭМС при расположении электромагнитного датчика со всех трех сторон одинаковая, и составляет 0,015В. Отличие наблюдается для амплитуд спектральной составляющей 29,3 кГц. При расположении электромагнитного датчика со сторон амплитуды отличаются максимально почти в три раза. Анализируя спектральные составляющие, представленные, при расположении электромагнитного датчика со стороны 2 спектр ЭМС расширяется как в сторону низких частот (спектральная составляющая 29.3 кГц), так и в сторону высоких частот (спектральная составляющая 105 кГц). При анализе аналоговых электромагнитных сигналов обращает на себя внимание ЭМС, зарегистрированный со стороны 2. Прослеживаются биения, обусловленные сложением близких частот спектра. При этом на спектре четко выделяются близкие спектральные полосы на частоте 66 и 72 кГц. Такая же форма аналогового сигнала прослеживается и при расположении электромагнитного датчика со стороны 4. Однако, для этой стороны образца на спектре ЭМС выделяются спектральные полосы 49 и 68 кГц.

3. Сравнив амплитудно-частотных спектров при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита, при расположении электромагнитного датчика с четырех сторон образца, видим, что спектры

ЭМО при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы со стороны кальцита, при расположении электромагнитного датчика с четырех сторон образца имеют отличия. На всех четырех спектрах четко выделяются две спектральные полосы 29,3 и 68,4 кГц. В зависимости от того, на какой стороне располагался электромагнитный датчик, мы наблюдаем изменение амплитуды этих спектральных полос. Проведенные наблюдения изменения спектральных составляющих ЭМС при возбуждении со стороны кальцита показало, что спектры отличаются только величиной амплитуды спектральных составляющих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалифицированной работы изучена и проанализирована литература по теме механоэлектрических преобразований в горных породах, как отечественных, так и зарубежных исследователей.

Изучены и освоены методики квазистатического, динамического и акустического воздействия на образцы горных пород.

Проведены экспериментальные исследования характеристик механоэлектрических преобразований в горных породах при квазистатическом воздействии.

Проанализированы зарегистрированные сигналы и проведен расчет их амплитудно-частотных спектров, с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье.

По результатам экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

Проведенные исследования параметров ЭМС при пьезоакустическом возбуждении образца горной породы, имеющего сложную структуры, а именно состоящую из минерала кальцита и минерала магнетита показали, что:

- Параметры АЧ характеристик ЭМС, зарегистрированного при возбуждении со стороны кальцита и со стороны магнетита имеют отличия. Амплитуда спектральных составляющих ЭМС при пьезовозбуждении со стороны кальцита превышает амплитуду спектральных составляющих ЭМС возбуждаемого со стороны магнетита почти в два раза. При этом

наблюдается расширение спектра ЭМС как в сторону низких частот, так и в сторону высоких частот.

- Сравнение АЧС ЭМС при расположении электромагнитного датчика с четырех сторон образца показало, что максимальная амплитуда спектральных составляющих ЭМС при возбуждении со стороны кальцита также превышает амплитуду спектральных составляющих ЭМС при возбуждении со стороны магнетита.

- АЧС ЭМС при возбуждении со стороны кальцита более простые и имеют два четко выделенных пика на частоте 29 и 68 кГц, тогда как при возбуждении со стороны магнетита АЧС ЭМС более насыщенный спектральными полосами как, со сторону низких частот, так и в сторону высоких частот.

В разделе социальная ответственность был проведен анализ вредных и опасных факторов производственной среды. Предложены средства коллективной и индивидуальной защиты. Также были рассмотрены вопросы по обеспечению безопасности работы в лабораторных условиях.

В ходе выполнения научно-технического исследования определили перспективность и успешность работы. В данном разделе были рассчитаны основные показатели на каждом этапе проектирования, рассмотрены эффективности выполненного продукта с точки зрения финансовой и ресурсной эффективности.

Список литературы

1. Воробьев А.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика. – 1970. – N 12. – С.3.-13.
2. Воробьев А.А. Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. – Томск: Изд-во Том. Ун-та.-1980.- 211с.
3. Воробьев А.А., Заводовская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов // ДАН. – 1975. – т.220, №1.- С.82-85.
4. Беспалько А.А., Суржиков А.П., Яворович Л.В. Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах при динамических воздействиях // Горный журнал. – 2006. - №4. – С. 32-34.
5. Беспалько А.А., Суржиков А.П., Яворович Л.В., Хорсов Н.Н., Клишко В.К., Штирц В.А., Шипеев О.В. Наблюдения изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам электромагнитной эмиссии // Физическая мезомеханика. – 2004. – т. 7, спец. в.– ч.2. – С. 253-256.
6. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Суржиков А.П. Связь петрофизических свойств горных пород с изменением параметров электромагнитных сигналов при акустическом воздействии: монография; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 120 с.
7. Мельников Н.В. К участникам симпозиума «Подземная разработка руд на больших глубинах»: Тез. докл. симп. по проблеме разработки рудных

- месторождений на больших глубинах / ИПКОН АН СССР. М.- 1979. – С. 5 – 6.
8. Трубецкой К.Н., Бронников Д.М., Кузнецов С. В., Трофимов В.А. Механизм горных ударов и расчет нагрузок на разделительные целики при разработке пластообразных залежей // ФТПРПИ. – 1995.–№ 5. – С. 3–16.
 9. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Кулаков Г.И. К вопросу о классификации горных ударов // ФТПРПИ. –1986. –№ 5. –С.3–11.
 10. Петухов И.М., Егоров П.В., Винокур Б.Ш. Предотвращение горных ударов на рудниках. – М.: Недра, 1984. – 239 с.
 11. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, склонных к горным ударам / ВНИМИ. – Л., 1980. – 1148 с.
 12. Разрушение. / Подред. Г. Либовица. Т. 2. – М.: Мир, 1975.– 763 с.
 13. Разрушение / Под ред. Г. Либовица. Т. 7, ч. 1. – М.: Мир, 1975.– 763 с.
 14. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
 15. Курленя М.В., Опарин В.Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. – Новосибирск: Наука, 1999. – 335 с.
 16. Куксенко В.С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности. – Л.: Наука, 1986. – С. 36– 41.
 17. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // Докл. АН СССР. – 1981. – Т.

259, № 6. –С. 1350–1353.

18. Гор А.Ю., Куксенко В.С., Томилин Н.Г, Фролов Д.И. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов // ФТПРПИ. –1989. –№3. – С, 54– 60.
19. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. - М.: Наука, 1993. – 314 с.
20. Воробьев А.А., Завадовская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводимости и радиоизлучения горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 220, № 1. – С. 82– 85.
21. Воллбрандт М., Хрусталев Ю.А., Линке Э.И. и др. Генерирование электронов высоких энергий при разрушении твердых тел // Там же. – 1975. – Т. 225, № 2. – С. 342– 344.
22. Корнфельд М.Н. Электризация ионного кристалла при расщеплении // ФТТ. – 1974. – Т. 16, вып. 11. – С. 3385– 3387.
23. Кротова Н.А., Карасев В.В. Исследование электронной эмиссии при раскалывании твердых тел в вакууме // Докл. АН СССР. – 1953. – Т. 92, № 3. – С. 607– 610.
24. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков //Там же. – 1981.– Т. 256, № 4.–С.824– 826.
25. Молоцкий М.И. Дислокационный механизм электризации ионных кристаллов при расщеплении // ФТТ. – 1986. – Т. 18, вып. 6. – С. 1763 –1764.
26. Гершензон Н.И., Зилпимиани Д.О., Маджгаладзе П.В. и др. Электромагнитное излучение вершины трещины при разрушении ионных

- кристаллов // Докл. АН СССР. –1986. – Т. 228, № 1. –С. 75– 78.
27. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Герасимович Е.А., Матвеев И.В. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. – М.: Наука, 1985. –115 с.
28. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления.– М.: Наука, 1988. – 175с.
29. Головин Ю.И., Дьячек Т.П., Усков В.И., Шибков А.А. Электромагнитное излучение деформированных щелочно-галлоидных кристаллов // ФТТ. – 1985. – Т. 27, вып. 2.– С. 555 – 557.
30. Хатиашвили Н.Г. Об электромагнитном: эффекте при трещинообразовании в щелочно-галлоидных кристаллах и горных породах // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1984. – № 9. – С. 13 – 19.
31. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. Генерация электромагнитного излучения при колебаниях двойных электрических слоев и его проявления при землетрясениях // Докл. АН СССР. – 1983.– Т. 271, № 1. – С. 80– 83.
32. Карабутов А.А., Марков В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л. Лазерно-ультрасветовая спектроскопия горных пород.–М.: Изд. Моск. гос. горного ун-та, 2008. – 175 с.
33. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М.А. Садовского. — М.: Наука, 1982. – 89 с.

34. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / Под ред. М.Б. Гохберга / Институт физики Земли АН СССР. –М., 1988. — 243 с.
35. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1975. – 255 с.
36. Панасюк В.В., Колодий Б.И. Теоретическое исследование электромагнитного излучения при развитии круговой трещины в диэлектрике // Физико-химическая механика материалов. – 1983. – № 5. – С. 72 – 75.
37. Корнейчиков В.П. Исследование механизма формирования электромагнитного излучения горных пород в связи с прогнозированием землетрясений: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – М., 1984. – 17 с.
38. Мастов Ш.Р., Нурмагамбетов С.Б. Электромагнитное поле системы трещин хрупкого разрушения // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1988. – № 3. – С.107 – 111.
39. Мастов Ш.Р., Ласуков В.В. Теоретическая модель генерации электромагнитного сигнала в процессе хрупкого разрушения // Там же. – 1989. – № 6. – С.38 – 48.
40. Алексеев Д.В., Егоров П.В. Механизм формирования квазистационарного электрического поля в нагруженных горных породах // ФТПРПИ. – 1993. – №2. – С.3 – 6.
41. Куксенко В.С., Ляшков А.И., Мирзоев К.М. и др. Связь между размерами образующихся под нагрузкой трещин и длительностью выделения упругой энергии // Докл. АН СССР. – 1982, – Т. 264, № 4. – С. 846 – 848.
42. Егоров П.В., Иванов В.В., Колпакова Л.А.О некоторых закономерностях

- импульсного электромагнитного излучения щелочно-галогидных кристаллов и горных пород // ФТПРПИ. – 1988. – № 1. – С. 67 – 70.
43. Егоров П.В., Иванов В.В., Колпакова Л.А., Лимонов А.Г. Динамика трещин и электромагнитное излучение горных пород // Там же.–1988.–№ 5.–С.20– 27.
44. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 315 с.
45. Садовский М.А., Соболев Г.А., Мигунов М.И. Изменение естественного излучения радиоволн при сильном землетрясении в Карпатах // Докл. АН СССР. – 1979. –Т. 224, №2.– С. 316– 319.
46. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.П. Источники электромагнитных предвестников землетрясений // Там же. –1980. –Т. 250, № 1. – С. 323 – 326.
47. Гредина Н.Г., Климко В.К., Кручинин В.А., Машковцев Е.А. Результаты наблюдений за изменением естественного электромагнитного излучения по мере отработки очистного блока // Разработка удароопасных месторождений: Межвуз. сб. науч. тр. / Кузбасс.политехн. ин-т. – Кемерово, 1986. – С. 84 – 86.
48. Скитович В.П., Лазаревич Л.М. Оценка НДС массива методом регистрации естественного электромагнитного излучения // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций: Сб. науч. тр. / ИГД СО АН СССР. - Новосибирск, 1985. –С. 65– 67.

49. Курленя М.В., Кулаков Г.И., Опарин В.Н и др. Методика исследования электромагнитного излучения при разрушении образцов горных пород / Ин-т горного дела СО АН СССР. – Новосибирск, 1989. – 24 с.
50. Егоров П.В, Колпакова Л.А., Мальшин А.А., Бабенко А.В. Изучение зависимости параметров импульсного электромагнитного излучения от размера структурной неоднородности твердого материала // Вест. Кузбасского гос. тех. ун-та. – 2002. – № 2. – С. 8 –12.
51. Касьян М.В., Робсман В.А., Никогосян Г.Н. Изменение спектров эмиссионных сигналов при развитии трещин и разрушении горных пород // Там же. –1989. – Т. 306, №4. – С. 826 – 830.
52. Chi-Yu Electromagnetic emission before earthquakes // Nature. – 1983. – Vol. 301, No. 5899. – P. 337.
53. Wang En-yuan, He Xue-qin, Nie Bai-sheng et.al. Zhongguokuangyedaхuехuebao// Journ. China Univ. Mining and Technol. – 2000. –Vol. 29, No. 3. – P. 225 –229.
54. Куксенко В.С., Ляшков А.И., Мирзоев С.Х. и др. Связь между размерами образующихся под нагрузкой трещин и длительностью выделения упругой энергии // Докл. АН СССР. –1982. – Т. 264, № 4 – С. 846 – 848.
55. Кузнецов С.В. Совместная регистрация электромагнитных и сейсмоакустических сигналов // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций: Сб. науч. тр. / Ин-т горного дела СО АН СССР. – Новосибирск.-1985.–С. 31 – 34.
56. Курленя М.В., Кулаков Г.И., Вострецов А.Г. и др. Фоновое электро-

магнитное излучение горных пород, регистрируемое в подземных выработках // ФТПРПИ. – 2002. – № 2. – С. 10 – 17.

57. Ma Ping-bo, Feng Xia-ting, Zhang Zhi-giangetal. Dongbeidaxuexuebao // Journ. Northeast. Univ. Natur. Sci. –2000. – Vol. 21, No. 6. –P. 630– 633.

58. Wang Xiang-qiu, Chen Qiu-nan, Wang Wen-xing. Xiangttandaxueziranke Xuexuebao // Natur. Sci. Journ. Xiangtan Univ. – 2001. – Vol. 23, No. 2. – P. 106–112.