

На правах рукописи

ФЕДОТОВ ПАВЕЛ ИВАНОВИЧ

**РЕГИСТРАТОР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ
СИГНАЛОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ТОМСК-2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Суржиков Анатолий Петрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
доктор технических наук

Люкшин Борис Александрович
Гольдштейн Александр Ефремович

Ведущая организация:

Московский государственный
технический университет
радиотехники, электроники
и автоматики

Защита состоится « 27 » декабря 2011 г. в 17 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, дом 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, дом 55.

Автореферат разослан « » ноября 2011 г.

Ученый секретарь Совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
к.т.н., доцент

Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В тектонически и сейсмически активных горнодобывающих регионах ведутся разработки ряда крупных железорудных месторождений. При горных работах в отрабатываемых массивах горных пород возникают катастрофические сейсмические и динамические явления в форме техногенных землетрясений, горных ударов, ударов горно-тектонического типа, обрушения больших масс горных пород и др. Освоение глубоких горизонтов обострило проблему прогноза и предотвращения горных ударов, наносящих значительный материальный ущерб промышленным предприятиям и гражданским объектам, находящимся в зонах влияния очистных пространств. Крупные технологические взрывы по обрушению рудных блоков на железорудных месторождениях также сопровождаются мощными динамическими явлениями. Проводка 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 крупных 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 наиболее перспективным методом контроля изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива и прогноза геодинамических событий, в том числе в шахтном поле рудников, является метод, основанный на механоэлектрических преобразованиях 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 аппаратная оснащенность разрабатываемого метода. Поэтому тема «Регистратор электромагнитных и акустических сигналов для мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния горных пород» является актуальной.

Цель работы: разработать автономный полевой аналого-цифровой регистратор электромагнитных и акустических сигналов; провести проверку работы регистратора в лабораторных и натурных условиях Таштагольского железорудного месторождения при исследовании изменений напряженно-деформированного состояния образцов горных пород и породных массивов.

Идея работы состоит: в осуществлении комплексной регистрации характеристик электромагнитной и акустической эмиссий горных пород; в их предварительной обработке операционной системой регистратора с последующим уменьшением количества выходных данных для их оперативного анализа; в демонстрации возможностей разрабатываемого регистратора при исследовании

и мониторинге изменений напряженно-деформированного состояния образцов горных пород при одноосном сжатии и породного массива при проведении технологических взрывов в руднике по характеристикам электромагнитной эмиссии.

Задачи исследований:

- обобщить теоретические и экспериментальные исследования механо-электрических преобразований в образцах диэлектрических материалов, горных пород и породного массива для выбора входных параметров электромагнитных и акустических сигналов и архитектурного построения регистратора;
- разработать структуру автономного аналого-цифрового регистратора;
- исследовать амплитудно-частотные характеристики регистратора;
- апробировать разработанный регистратор при исследовании характеристик электромагнитной эмиссии образцов горных пород при подготовке и развитии разрушения в процессе одноосного сжатия;
- используя разработанный регистратор, провести исследования характеристик электромагнитной эмиссии породного массива во время и после проведения массовых технологических взрывов в шахтном поле Таштагольского рудника;
- определить возможность использования характеристик электромагнитной эмиссии для мониторинга изменений НДС горных пород.

Методы исследования: метод механоэлектрических преобразований в диэлектрических структурах; электрические измерения силы и деформации; измерения токов поляризации; измерения аналоговых электромагнитных сигналов горных пород и их спектральный анализ с помощью программы быстрого преобразования Фурье; измерения характеристик электромагнитной эмиссии при изменении НДС горных пород; возбуждения и регистрации акустических сигналов с помощью пьезоэлектрических преобразователей, а также возбуждения акустических импульсов детерминированным ударом; регистрации сейсмической активности шахтного поля Таштагольского рудника; лицензионные программы Mathcad и Origin Lab.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Технические условия, позволяющие разработать и изготовить регистратор электромагнитных и акустических сигналов РЕМС-1 для определения изменений напряженно-деформированного состояния гетерогенных материалов и горных пород.
2. Принцип действия и характеристики экспериментального образца РЕМС-1 для регистрации электромагнитных и акустических сигналов при изменении напряженно-деформированного состояния гетерогенных материалов и горных пород.
3. Изменения амплитудно-частотных параметров электромагнитной эмиссии при подготовке разрушения в процессе одноосного сжатия образцов горных пород и при мониторинге изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород во время проведения и после технологических взрывов.

Достоверность научных результатов подтверждается применением современной техники и методов измерения электрических величин, а также электрических измерений неэлектрических величин; достаточным объемом экспериментальных данных, полученных при разработке аналого-цифрового регистратора электромагнитных сигналов и при проведении лабораторных и натуральных исследований; применением современной элементной базы при создании регистратора, современной аппаратуры и методов исследования явления механоэлектрических преобразований в горных породах; 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:

- разработан аналого-цифровой регистратор РЭМС-1, при создании которого использован комплексный подход для расширения его возможностей при регистрации электромагнитной и акустической эмиссий в условиях подземных сооружений, а совокупность решений при реализации такого подхода обеспечивает новизну регистратора: произведена совместная регистрация и синхронизация измерений характеристик электромагнитной и акустических эмиссий; для отстройки от электромагнитных помех применена дифференциальная схема приема ЭМС; выделены частотные полосы с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц, позволяющие судить о стадиях подготовки разрушения горных пород; осуществлен прием ЭМС в широкой полосе частот 1÷100 кГц и интенсивности потока ЭМС при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород; применена предварительная обработка регистрируемых ЭМС путем 1 или 5 секундного усреднения результатов измерений, уменьшающее поток данных и обеспечивающее оперативность дальнейшей обработки и анализа этих измерений;

- по характеристикам электромагнитной эмиссии, полученным при их измерении регистратором РЭМС-1, определяются этапы подготовки и развития разрушения, в том числе образование и развитие деструктивных зон при одноосном сжатии образцов горных пород;

- по изменениям характеристик электромагнитной эмиссии, измеренных регистратором РЭМС-1 в шахтном поле после технологических взрывов, достоверно определяется время и амплитуда возбужденного состояния массива горных пород.

Личный вклад автора. Автор принимал участие в формулировании целей и задач исследований, разрабатывал регистратор электромагнитной и акустической эмиссий РЭМС-1, разрабатывал методики для проведения измерений, проводил эксперименты и обработку данных измерений, обобщал полученные результаты.

Практическая ценность работы состоит в создании действующего регистратора РЭМС-1, способного вести в течение не менее 180 часов непрерывный мониторинг электромагнитной и акустической эмиссий в условиях рудников при проведении взрывных воздействий на породный массив. Создание регистратора и полученные с помощью него результаты исследований изменения

ЭМЭ и АЭ в лабораторных и натурных условиях внесли существенный вклад в разработку и развитие метода мониторинга и краткосрочного прогноза разрушения гетерогенных материалов и геодинамических событий в породных массивах по параметрам механоэлектрических преобразований.

Реализация работы в промышленности. Результаты работы внедрены в Таштагольском филиале ОАО «Евразруда». Регистратор РЭМС-1 использовался при наблюдении за изменениями ЭМЭ и АЭ при проведении массовых технологических взрывов и в период релаксации напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива в подземных выработках 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 научной конференции с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», 2005 и 2011 г.г., Новосибирск; на V Международной конференции студентов и молодых ученых, 2008 г., Томск; на Всероссийской конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». 2008 г., Москва; на VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», 2009 г., Юрга, Кемеровской обл.; на Международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева, 2009 г., Томск; на XI Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация», 2010 г., Барнаул; на Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 2011 г., Томск; на Научно-практической конференции «Геодинамика и современные технологии отработки удароопасных месторождений», 2011 г., Таштагол, Кемеровской обл.; на I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 2011 г., г. Катунь, Горный Алтай.

Результаты работы апробировались и использовались при выполнении фундаментальных работ по грантам РФФИ 06-08-00693-а, 06-08-02100-э_к, 10-08-02100-э_к, а также используются при выполнении действующих грантов РФФИ 11-07-00666-а и 11-07-98000р_сибирь_а.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 22 печатных работах, в том числе в 10 работах, опубликованных в рецензируемых научных журналах. Полученные результаты закреплены в 1 патенте.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 142 страницах и состоит из введения, четырех глав, основных выводов по работе и списка используемой при написании диссертации литературы из 134 наименований. Диссертация содержит 49 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель работы, научная новизна и практическая ценность, а также научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор литературных данных исследований, проведенных Воробьевым А.А., Сальниковым В.Н., Гохбергом М.Б., Егоровым П.В., Финкелем В.М., Молоцким М.И., Гершензоном Н.И., Головиным Ю.А., Хатиашвили Н.Г. об источниках и механизмах генерирования электромагнитных сигналов. Обобщены высказанные к настоящему времени типы источников и механизмы формирования электромагнитных сигналов (ЭМС), которые можно объединить в следующие группы процессов, приводящих к разделению зарядов и формированию электрического диполя: а) неравномерное распределение зарядов на противоположных бортах трещин при разрыве ионных или других видов связи; б) миграция заряженных дефектов в неоднородном поле механических напряжений, возникающих в области формирования трещин; в) электризация при трении в том случае, когда имеет место перемещение элементов структуры. Изменения дипольного момента в основном определяются: а) пробоем пространства между заряженными бортами трещины; б) релаксацией заряда при протекании тока по материалу не затронутой трещиной; в) колебанием заряженных поверхностей; г) эмиссией электронов. Закономерности генерирования электромагнитных сигналов в горных породах рассматривались в работах Воробьева А.А., Сальникова В.Н., Гольда Р.М., Беспалько А.А., Яворович Л.В., Защинского Л.А., Вишневской Н.Л., Корнейчикова В.П., Булата А.Ф., Хохолева В.К., Приходченко В.Л., Иванова В.В., Соболева Г.А. и других. Авторы, исследуя закономерности генерирования электромагнитных сигналов диэлектрическими материалами, в том числе горными породами, в лабораторных условиях при механическом воздействии на них и в условиях естественного залегания отметили, что наряду с интенсивностью электромагнитной эмиссии изменяются и параметры электромагнитного сигнала. Это отмечается в работах Воробьева А.А. с соавторами, Ямщикова В.С., Шкуратника В.Л., Лыкова Г.К., Кузнецова С.В., Курлени М.В., Опарина В.Н., Вострецова А.Г., Кулакова Г.И., Яковицкой Г.Е., Касьяна М.В., Робсмана В.А., Никогосяна Г.Н., Хатиашвили Н.Г., Егорова П.В., Иванова В.В., Колпаковой Л.А., Гершензона Н.И., Зилпимиани Д.О., Манджгаладзе П.В., Беспалько А.А., Яворович Л.В. В четвертом параграфе 1 главы приведен обзор литературы по аппаратуре для измерения параметров ЭМС при механоэлектрических преобразованиях в горных породах. На основе анализа литературных данных сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе приводятся исследования закономерностей изменения параметров механоэлектрических преобразований в образцах горных пород. Эти исследования проведены с целью выявления входных параметров ЭМС горных пород, требующихся для разработки автономного аналого-цифрового регистратора электромагнитных сигналов, способного работать в природных условиях рудников.

Для исследования связей параметров акустического воздействия и электромагнитного отклика образцов диэлектрических материалов, минералов и горных пород использовались установки, разработанные и изготовленные в ПНИЛ ЭДиП. Ввод детерминированных акустических импульсов в исследуемые образцы осуществлялся с помощью пьезоэлектрического излучателя или ударом стального шарика. Приведены измерительные системы определения скорости звука и скорости пролета шарика для определения энергии удара. Акустический сигнал, проходя через образец, возбуждал ЭМС и регистрировался с помощью пьезопреобразователя на экране осциллографа. Для приема ЭМС служил емкостной электромагнитный датчик (ЭМД), который принимал электрическую составляющую ЭМС. Датчик имел согласованный дифференциальный вход со встроенным усилителем, с которого усиленный в 100 раз ЭМС поступал на другой вход осциллографа Tektronix TDS2024B. С осциллографа через интерфейс RS 232 акустический и электромагнитный сигналы записывались в память компьютера. В последующем производился их анализ, который выполнялся с помощью программ Mathcad и Origin Lab. Для выявления погрешностей экспериментальных измерений скорости распространения акустических волн по образцам, амплитуды и длительности акустических и электромагнитных сигналов, энергии удара шариком производили не менее 10 измерений. В результате расчетная погрешность составила не более 1,5%.

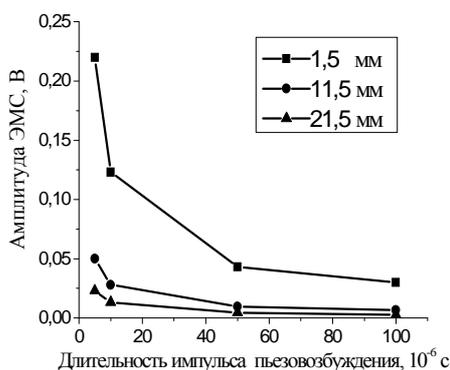


Рис. 1. Зависимость амплитуды ЭМС от длительности возбуждающего импульса и расстояния ЭМД от грани образца на частоте 60 кГц.

С использованием описанных методик проведены исследования закономерностей изменения параметров ЭМС от длительности и амплитуды акустического возбуждения и геометрических размеров образцов. На первом этапе объектом исследования являлись модельные образцы, представленные прямоугольными кристаллами искусственного кварца и образцами природного кварцита. Для экспериментально регистрируемых аналоговых ЭМС рассчитывался амплитудно-частотный спектр с использованием операции быстрого преобразования Фурье. Проведено исследование влияния на амплитудные и спектральные характеристики ЭМС длительности и амплитуды возбуждающего АС, а также пространственного расположения ЭМД по отношению к источнику ЭМС. Длительность и амплитуда АС устанавливалась посредством задания параметров импульса напряжения с высоковольтного генератора, которое изменялось ступенчато по длительности в пределах $10^{-6} \div 10^{-4}$ с, а по амплитуде в интервале $100 \div 800$ В. Параметры электрического импульса на обкладках пьезокерамики акустического излучателя и параметры акустического импульса возбуждения измерялись осциллографом Tektronix TDS2024B. На рис. 1 приведены зависимости амплитуды ЭМС от длительности возбуждающего акустического импульса и расстояния электродов ЭМД от грани образца. Анализ полученных зависимостей показал, что с увеличением длительности импульса напряжений,

прикладываемого к обкладкам пьезоэлектрической керамики, уменьшается амплитуда частотных полос во всем регистрируемом частотном диапазоне. При длительности возбуждающего импульса $5 \cdot 10^{-5}$ с амплитуда частотной полосы ЭМС существенно возрастает при любом положении образца и носит резонансный характер, связанный с размером образца. Следует заметить, что при удалении принимающего емкостного датчика от поверхности образца амплитуда ЭМС падает и нивелируется по величине.

Проведено исследование влияния амплитуды акустического импульса на величину ЭМС. На рис.2 приведена зависимость амплитуд основных спектральных гармоник (60, 70 и 88 кГц) электромагнитного отклика образца кварца от величины импульсов напряжения на обкладках пьезокерамики излучателя АС возбуждения. На рисунке видно, что амплитуды гармоник ЭМС линейно возрастают с увеличением напряжения возбуждения пьезокерамики излучателя и, соответственно, амплитуды АС. Это дает основание утверждать, что входные амплитуды частотных полос ЭМС в интервале от десятков микровольт до вольт в килогерцовом диапазоне частот линейны от величины возбуждающих акустических сигналов.

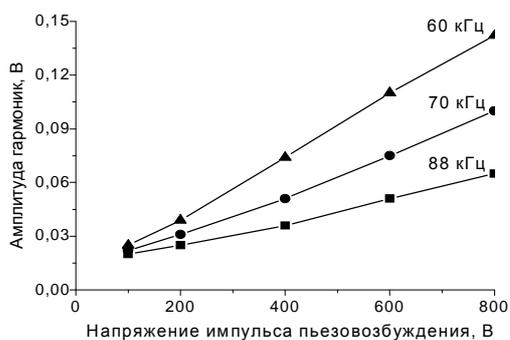


Рис. 2. Зависимость амплитуды гармоник ЭМС от импульса напряжения на электродах пьезоэлектрической керамики, излучающей возбуждающий акустический импульс.

Проведенный анализ частотных характеристик ЭМС при акустическом возбуждении образцов кварцита, показал, что максимальные амплитуды имеют частотные полосы, соответствующие размерам образцов, а также размеров блоков, из которых состоит горная порода при наличии протяженных пространственных дефектов. Таким образом, в спектре ЭМС при акустическом возбуждении горных пород всегда присутствуют спектральные полосы, обусловленные собственной резонансной частотой образца. Этот вывод значим для определения диапа-

зона частот измерительной аппаратуры, проектируемой и используемой в лабораторных и природных условиях, в частности для разрабатываемого автономного регистратора ЭМС. Экспериментально в природных условиях установлено, что этот диапазон лежит в интервале от десятков герц до сотен килогерц. Исходя из наших исследований, это с большой вероятностью связано с размерами блоков, минеральных включений, трещин и пустот составляющих массивы горных пород.

Исследование влияния электрофизических и магнитных свойств горных пород на амплитуду ЭМС при акустическом возбуждении проведено на образцах Таштагольского железорудного месторождения. Показано, что электрические и магнитные свойства горных пород и минеральных включений в них оказывают существенное влияние на амплитудно-частотные параметры ЭМС при акустическом воздействии. Полученные данные важны для понимания влияния электрофизических и магнитных свойств горных пород на амплитуду электромагнитного отклика, возникающего при прохождении через них акустических

сигналов. Большое влияние на амплитуду ЭМС оказывает содержание кварца и присутствие упорядоченных контактов минералов в горных породах. В работе проведено исследование ЭМС природных слоистых структур, представленных серпентинитом, имеющим полосчатую текстуру и состоящий из слоев серпентина и хризотил-асбеста, которые образуют двойные электрические слои.

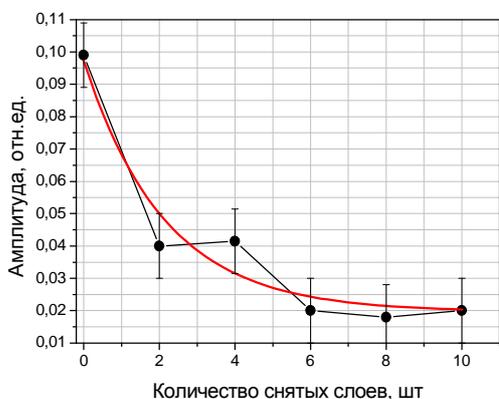


Рис. 3. Зависимость амплитуды ЭМС на частоте 32 кГц от количества убранных контактных слоев серпентина и хризотил-асбеста.

близка по величине амплитуде ЭМС из кристалла кварца такого же размера.

Основываясь на данных экспериментальных исследований, результатах расчетов и их анализа, приведенных в главе 2, а также используя результаты анализа публикаций по методам контроля напряженно-деформированного состояния и аппаратуры для их реализации, отраженные в главе 1 настоящей диссертационной работы, были разработаны технические условия на разработку и изготовление регистратора электромагнитных и акустических сигналов гетерогенных материалов.

В третьей главе приведено описание разработанного автономного аналого-цифрового регистратора электромагнитных и акустических сигналов.

Принцип работы регистратора РЭМС-1 основан на преобразовании ЭМС и АС в аналоговые электрические сигналы с помощью емкостного или индукционного приемников и пьезоэлектрического приемника, соответственно, на их предварительной обработке и оцифровке с последующим запоминанием во встроенной памяти и выводом массива данных на персональный компьютер (ПК). Для уменьшения влияния электромагнитных помех прием аналоговых ЭМС осуществляется по дифференциальной схеме. Амплитуды регистрируемых ЭМС и АС оцифровывались в широкой полосе частот 1÷100 кГц. Кроме того, ЭМС дополнительно фильтровались в трех полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц. Для уменьшения массива данных и улучшения их оперативного анализа производится усреднение амплитуд ЭМС и АС в задаваемом временном интервале 1 или 5 секунд. Полученные усредненные значения амплитуд ЭМС $A(t)$ характеризуют временные закономерности изменения электромагнитной (ЭМЭ) и акустической (АЭ) эмиссий в процессе силового или акустического воздействия на гетерогенные материалы и горные породы. По-

лученные закономерности пропорциональны изменению напряженности электрической $E(t)$ или магнитной $H(t)$ составляющей электромагнитного поля в широкой полосе частот ($\Phi_{ШП}$) и в полосах с центральными частотами 2 кГц (Φ_2), 15 кГц (Φ_{15}) и 100 кГц (Φ_{100}). Амплитуды АЭ отображают процесс трещинообразования, протекающий при подготовке и протекании разрушения в исследуемом объекте или при акустическом воздействии на него. Кроме того, регистрируется изменение количества ЭМС в заданном интервале усреднения, что характеризует изменение интенсивности импульсного потока электромагнитных сигналов.

Регистратор имеет блочное исполнение, это: блок сбора информации (БИС); выносные емкостные (ДЕП) и индукционные приемники (ДИП), выборочно подключаемые к дифференциальному входу БИС; акустический приемник (АП); внутренний и дополнительный аккумуляторные блоки питания (БДА) и блок питания (БП) для зарядки аккумуляторов. Связь приемников с БИС осуществляется с помощью унифицированных кабелей, имеющих разъем с усилителем тока для согласования сопротивлений датчиков и входных сопротивлений усилителей БИС.

На рис. 4 приведена блок-схема регистратора РЭМС-1. Электромагнитные сигналы принимаются емкостными или индукционными приемниками,

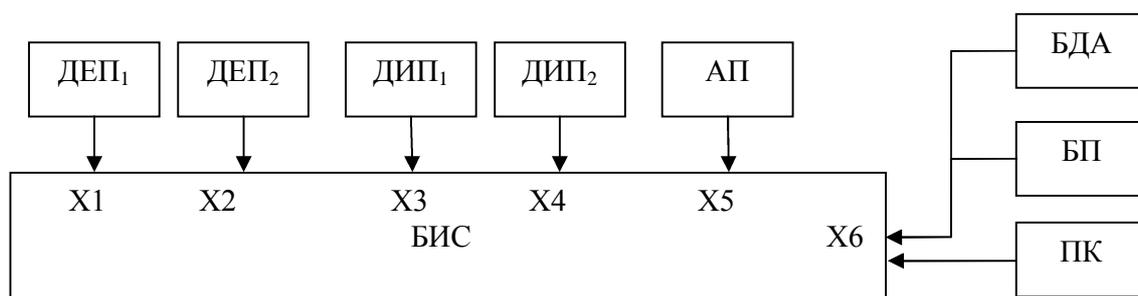


Рис.4. Блок-схема регистратора РЭМС-1, где X1и X2 - разъемы для подключения емкостных приемников ДЕП₁ и ДЕП₂, X3 и X4 - разъемы для подключения индукционных приемников ДИП₁ и ДИП₂, X5 – разъем для подключения пьезоэлектрического приемника акустических сигналов АП, X6 – разъем для поочередного подключения дополнительного источника питания БДА, зарядного устройства встроенных в регистратор аккумуляторов или персонального компьютера ПК.

преобразуются в электрические сигналы, усиливаются и поступают на входы дифференциальных усилителей. Сигналы с дифференциальных усилителей поступают на входы программно управляемого узла коммутации и усиления. К выходу усилителя подключены три узкополосных и один широкополосный фильтры с регулируемым коэффициентом усиления. Усиленные сигналы поступают на узел усреднения и с его выходов подаются на входы АЦП микроконтроллера. Электрический сигнал с регулируемого усилителя подается также на вход компаратора с программируемым уровнем. Импульсы с компаратора поступают на счетчик, а затем на микроконтроллер. Акустические сигналы принимаются пьезоэлектрическим приемником, преобразуются в электрический сигнал, который усиливается и поступает на вход усилителя с программируемым коэффициентом усиления. Регистратор работает под управлением программ, хранящихся в программной памяти блока БИС. Режимы работы выби-

раются оператором с помощью клавиатуры. Питание элементов электронных схем блоков производится стабилизированным напряжением +5В, которое снимается с выходов стабилизатора, +3В используется для подсветки ЖКИ. На вход стабилизатора подается нестабилизированное напряжение +(6÷7)В с батареи аккумуляторов. Зарядка аккумуляторов производится через элементы под управлением микроконтроллера.

Блок сбора информации обеспечивает: ввод и предварительную обработку аналоговых сигналов с электромагнитных и пьезоэлектрического акустического приемников; оцифровку аналоговых сигналов по шести каналам; подсчет импульсов; накопление и хранение информации; оперативный просмотр вводимой информации на ЖК дисплее; работу на встроенных аккумуляторах в течение не менее 40 ч; вывод накопленной информации в ПК; подзарядку аккумуляторов. Оперативное запоминающее устройство ОЗУ имеет объем 512 килобайт, и обеспечивает запись цифровой информации для временного хранения с максимальной частотой оцифровки микроконтроллера 200 кГц.

Программное обеспечение БИС позволяет производить: выбор приемника ДЕП или ДИП, коэффициентов усиления, время усреднения, уровень компарации; отображение на экране ЖКИ, устанавливаемых параметров, рабочего времени, объема свободной памяти и величин принимаемых сигналов; установку режимов (настройки, мониторинга, передачи массивов информации в ЭВМ, зарядки аккумуляторов).

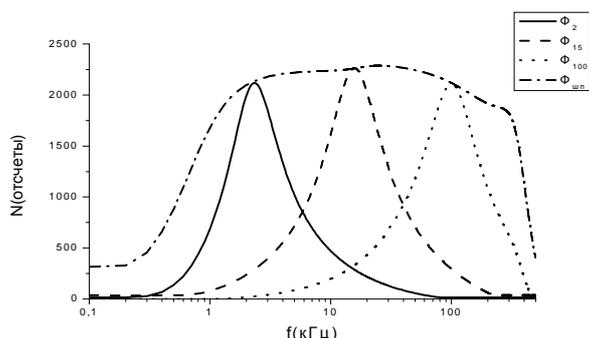


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики приемного тракта регистратора: Φ_2 , Φ_{15} , Φ_{100} – усредненные сигналы с узкополосных фильтров; $\Phi_{\text{ШП}}$ – усредненный сигнал с широкополосного фильтра.

В режиме мониторинга информация сохраняется «страницами» в памяти регистратора по 256 усредненных значений амплитуд Φ_2 , Φ_{15} , Φ_{100} , $\Phi_{\text{ШП}}$, АЭ и «счет». В каждом блоке содержится информация об установленных параметрах ЭМЭ и АЭ и времени начала работы. Максимальное количество накапливаемых «страниц» данных мониторинга - 512. Конструкция блока БИС выполнена, исходя из требований его герметичности (IP53), защиты от

внешних электромагнитных помех и механических повреждений. Корпус блока выполнен в виде металлической коробки с уплотняющими прокладками со стороны разъемов и на крышке клавиатуры и индикатора. На лицевой поверхности БИС выведены кнопочная панель управления для задания режимов работы регистратора.

В этой же главе приведена калибровка приемного тракта канала измерения электромагнитного поля (ЭМП), включающая определение амплитудно-частотных характеристик приемного тракта канала измерения электромагнитного поля (ЭМП), полосы пропускания, уровня собственных шумов, коэффициента подавления синфазного сигнала усилительного тракта. На рис. 5 приведены амплитудно-частотные характеристики приемного тракта регистратора: Φ_2 ,

Φ_{15} , Φ_{100} – усредненные сигналы с узкополосных фильтров; $\Phi_{ШП}$ – усредненный сигнал с широкополосного фильтра. Приведены калибровки канала измерения магнитной и электрической составляющих ЭМП.

В связи с тем, что регистратор должен работать в условиях подземных рудников, блок сбора информации, датчики ДЕП, ДИП и АП, дополнительный блок аккумуляторов имеют следующие общие рабочие условия: температура окружающей среды - $(-10 \div + 40)^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха - до 100% при $+ 35^\circ\text{C}$; атмосферное давление - $60 \div 106$ кПа; питание - 6 В / 50 мА.

Блок питания может работать от электрической сети 220В при следующих условиях эксплуатации: температура окружающей среды - $(-20 \div +40)^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха - до 95% при $+ 30^\circ\text{C}$; атмосферное давление - $(60 \div 106)$ кПа; питание от сети - (220 ± 22) В с частотой $(50 \pm 0,5)$ Гц, потребляемый ток - 300 мА.

Основные технические характеристики регистратора: автономное встроенное питание $(6+1)$ В от батареи из 5 аккумуляторов АА с общей емкостью 2,5 А·ч; время работы при питании от встроенных аккумуляторов – не менее 40 часов; дополнительный блок питания емкостью 9,0 А·ч; время работы с дополнительными аккумуляторами не менее 180 часов; потребляемый ток в режиме мониторинга и записи в ОЗУ не более 50 мА; центральные частоты в выделенных полосах – 2, 15, 100 кГц; количество интеграторов аналогового сигнала – 5шт; объем ППЗУ FLASH - 4 Мбайт.

Перезапись информации с регистратора РЭМС-1 в компьютер осуществляется с помощью специальной

```

;Дата 11/6/22 11:57:26 Прибор:2 Стр.:0 Датчик:ДИП
Усил.:16 Усил.АП:4 Уров.:410 Усред.:5сек.
;Индекс   ф1    ф2    ф3    ШП    АП    СЧЕТ    АКК
43046     628   121   185   2549  0     0       700
43051     629   121   190   2562  0     0       700
43056     628   121   194   2557  0     0       700
43061     638   124   196   2522  0     0       700
43066     636   123   182   2520  0     0       700
43071     647   125   189   2517  0     0       700
43076     650   125   203   2518  0     0       700
43081     651   125   196   2524  0     0       700

```

службы с помощью специальной сервисной программы, дальнейшая обработка и анализ стандартными программами MathCAD и Origin. Разработан протокол представления результатов проведенных измерений ЭМЭ и АЭ. В протоколе, который формируется после запуска РЭМС-1 в работу, фиксируется дата и время начала измерений, номер

Рис. 6. Протокол данных РЭМС-1

регистратора, начальная «страница» записи данных измерений, тип датчика, усиление ЭМС и АС в условных единицах, уровень амплитуд для измерения импульсного потока ЭМС и время усреднения записываемых в память данных. На рис.6 представлен протокол измеряемых величин с записью данных через каждые 5 секунд. В первой колонке записывается текущее время в секундах, в последней – напряжение на клеммах питающих аккумуляторов.

В четвертой главе приведены результаты апробирования регистратора электромагнитных сигналов РЭМС-1 при исследовании электромагнитной эмиссии образцов и массива горных пород Таштагольского железорудного месторождения.

Горные породы изначально представляют собой сложную иерархически организованную систему. В процессе механического воздействия эта система

эволюционирует по законам синергетики, образуя иерархию элементов разных масштабов. Разнообразие физических механизмов на определенных этапах механического воздействия обеспечивает развитие этого процесса, при котором горная порода накапливает дефекты разных масштабов, пока этот процесс не проявит себя на макроуровне в виде магистральных трещин, что и приводит к разделению горной породы на части. Высокая чувствительность механоэлектрических преобразований к структурно-текстурным изменениям горных пород при деформировании, вследствие возникновения деструктивных зон с последующим их развитием до стадии разрушения, обуславливает пространственно-временное распределение электромагнитных сигналов. Сложная иерархическая структура горных пород приводит к тому, что на протяжении всего процесса деформирования изменяются параметры регистрируемого ЭМС. В связи с этим, важной задачей является установление амплитудно-частотных параметров ЭМС, которые характеризуют определенные этапы напряженно-деформированного состояния горных пород и могут служить прогностическими признаками образования деструктивных зон и разрушения образцов горных пород.

Исследования параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при одноосном сжатии образцов горных пород проводилось на гидравлическом прессе ИП-500. При проведении экспериментов по апробированию работы регистратора РЭМС-1 в процессе одноосного сжатия измерялись усилие, прикладываемое к образцу, деформация и предельная нагрузка разрушения. Это позволяло оценивать изменения механических напряжений на каждом этапе силового нагружения. Одноосное сжатие производилось вдоль наибольшей оси образцов линейно до разрушающих значений. Параметры механоэлектрических преобразований измерялись с использованием двух емкостных дифференциальных датчиков. Один из датчиков обеспечивал прием аналоговых электромагнитных сигналов из одноосно сжимаемых образцов с последующей оцифровкой данных измерений посредством осциллографической приставки PCS-500 Velleman, работающей в режиме самописца. С помощью второго датчика, подключенного к регистратору РЭМС-1 производилась регистрация усредненной за 1 секунду интенсивности электромагнитной эмиссии и средних значений амплитуд ЭМС по трем частотным полосам с центральными частотами 2 кГц, 15 кГц, 100 кГц, а также в широкой полосе (1÷100 кГц) и интенсивность генерации ЭМС. Информация с регистратора РЭМС-1 передавалась на компьютер для дальнейшей обработки и анализа.

Эксперименты, как и в главе 2, проводились на образцах горных пород, отобранных на месторождении Таштагольском в Кемеровской обл. Исследуемые образцы вырезались из кернов и имели форму цилиндра высотой $8 \cdot 10^{-2}$ м и диаметром $4 \cdot 10^{-2}$ м.

При одноосном сжатии образцов горных пород на основании протокола, выведенного на компьютер, строились закономерности изменения параметров ЭМЭ по 5 каналам, отображающие изменения амплитуд ЭМЭ в относительных единицах отсчетов по полосам с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц, в широкой полосе в интервале 1-100 кГц, а также интенсивность ЭМЭ (счет) от

относительной нагрузки $P/P_{\text{пред}}$. Сравнение амплитуд ЭМЭ на каналах 2, 15, 100 кГц и в интервале 1-100 кГц позволяет судить об изменении спектра частот, не проводя спектрального анализа.

На основании экспериментально измеренных характеристик ЭМЭ для каждого образца определялись этапы уплотнения, этап формирования очага разрушения и этап предразрушения. В начале нагружения, когда реализуется этап уплотнения, поверхностный слой образца, контактирующий с плитами пресса, имеет наименьшую сдвиговую устойчивость, обусловленную специфической структурой поверхностного слоя. На этом этапе происходят локальные разрушения при неупругом сжатии, вызванные шероховатостью поверхности торцов образца и смыканием открытых трещин и пор. Следующим этапом в подготовке разрушению является формирование очага (очагов) разрушения. В процессе непрерывно увеличивающейся нагрузки на этом этапе происходит формирование областей или кластеров повреждений, представляющих собой совокупность микротрещин различных размеров. Образующиеся кластеры повреждений распределяются по объему не случайным образом, а в зависимости от структурно-текстурных особенностей конкретного образца и действующих

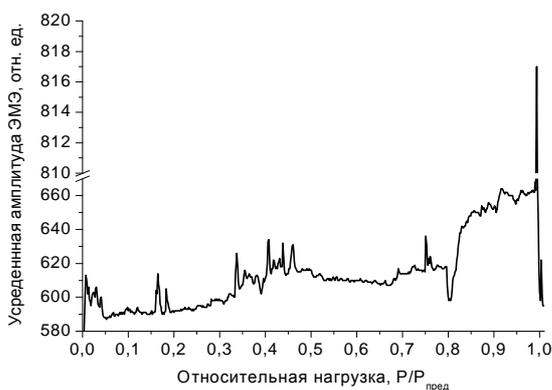


Рис. 7. Изменение усредненной амплитуды ЭМЭ в полосе частот 1-100 кГц для образца вмещающей породы.

механических напряжений, возникающих в процессе его деформирования. Этот этап можно охарактеризовать еще и как начало разрушения. На третьем этапе, с приближением к пределу прочности, происходит быстрое увеличение концентрации микротрещин, слияние кластеров повреждений и образование магистральных трещин.

На рис. 7, в качестве примера, приведено изменение усредненной амплитуды электромагнитной эмиссии в широкой полосе частот $1 \div 100$ кГц для образца вмещающей породы, предельная прочность при сжатии которого составила 184 кН. Как было уже сказано, ЭМЭ является следствием механоэлектрических преобразований в процессе деформирования горной породы. Одним из побуждающих фактором таких преобразований является акустическая эмиссия, возникающая при раскрытии трещин разных размеров, а также поверхность образца. В зависимости от этапа НДС наблюдаются особенности ЭМЭ. Для данного образца отчетливо выделяются этапы: уплотнения до $0,2 P/P_{\text{пред}}$, формирования очага разрушения в области $0,3-0,5 P/P_{\text{пред}}$, предшествующий разрушению от $0,75$ до $0,99 P/P_{\text{пред}}$, образования трещин отрыва или разрушения образца. На других образцах вмещающих пород также выделяются все перечисленные выше этапы, но для каждого образца свойственен свои диапазоны $P/P_{\text{пред}}$.

Проведенные исследования на образцах горных пород с использованием РЕМС-1, позволили выявить закономерности в изменениях амплитудно-частотных параметров ЭМС при одноосном сжатии образцов горных пород, заключающиеся в том, что на этапе формирования очага разрушения в спектре

ЭМС присутствуют частотные полосы во всем частотном диапазоне и возможно появление сигналов, обусловленных биением. При приближении к предельной прочности спектр ЭМС смещается в низкочастотную область, и происходит увеличение амплитуды спектральных полос. По характеристикам электромагнитной эмиссии образцов вмещающих пород и магнетитовой руды Таштагольского рудника, измеренных с помощью регистратора РЭМС-1, можно достоверно судить об этапах подготовки их разрушения, а сам регистратор может быть успешно использован при разработке метода мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических событий на рудных месторождениях.

Для выявления возможностей регистратора РЭМС-1 при контроле изменений НДС горного массива и краткосрочного прогноза геодинамических событий апробирование работы автономного аналого-цифрового регистратора РЭМС-1 проводилось в руднике Таштагольского железорудного месторождения, имеющего глубины до 800 м. Это позволяло исключить влияние атмосферного электричества на измеряемые параметры ЭМС. Выбор этого рудника в качестве полигона для апробирования обусловлен взрывной технологией отработки рудного тела с закладкой взрывчатых веществ до 300 тонн. Возбуждение горного массива рудника взрывами, проведение очистных работ, прокладка штреков и ортов сопровождается геодинамическими событиями разного класса до энергий в несколько мегаджоулей. Регистратор РЭМС-1 позволял проводить измерения электромагнитных сигналов до взрывов, во время их проведения и в период релаксации горного массива в относительно устойчивое состояние. Запись амплитуд электромагнитных сигналов по электрической или магнитной составляющим осуществлялась с усреднением за 1 или 5 секунд. Усредненные амплитуды ЭМС являются одной из характеристик электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) горных пород. Вариации амплитуды ЭМЭ во времени пропорциональны напряженности электрического поля, изменяющегося в процессе прохождения механоэлектрических преобразований в породном массиве. Электромагнитные сигналы регистрировались РЭМС-1 по пяти каналам: в широкой полосе частот от 1 до 100 кГц; в выделенных полосах с добротностью в пределах $4 \div 7$ с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц, а также фиксировалась интенсивность ЭМС. Интенсивность ЭМС пропорциональна среднему значению потока напряженности электромагнитного поля в единицу времени. По шестому каналу регистрировались амплитуды АЭ горных пород, которые отображают факт возникновения и прохождения геодинамического события и пропорциональны его энергии.

Прежде чем приступить к исследованиям характеристик ЭМЭ при взрывах путем профилирования борта проходки орта -210 были определены участки шахтного поля с наибольшей амплитудой ЭМЭ и интенсивностью ЭМС. Было установлено, что наибольшая амплитуда ЭМЭ и интенсивность ЭМС свойственна контактам магнетитовой руды и вмещающих пород с дайками и залеченными трещинами, распространяющимися в область взрыва или в область развития деструктивных зон в горном массиве. На этих участках проявляется также высокая нестационарность характеристик ЭМЭ.

Для анализа связи характеристик ЭМЭ с изменениями НДС и геодинамической обстановкой использовали, наряду с измерениями амплитуды АЭ, сейсмические данные Таштагольской сейсмостанции. На рис. 8 приведен график

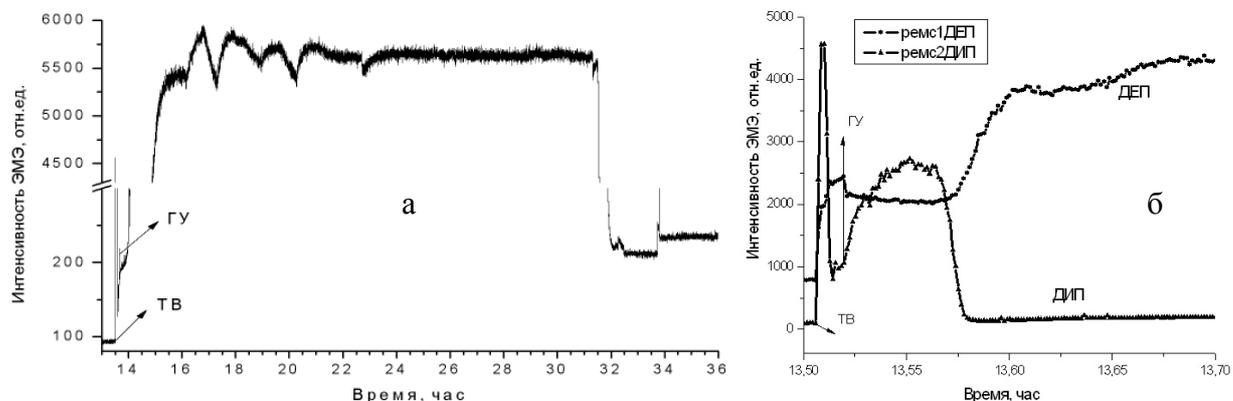


Рис. 8. Усредненные значения интенсивности ЭМЭ при проведении технологического взрыва блока №11 между горизонтами (-210) и (-280) за временной интервал 22 часа после технологического взрыва (а). Развернутый ход интенсивности ЭМЭ в период взрыва и «горного удара», отмеченные стрелками ТВ и ГУ, соответственно (б).

изменения интенсивности ЭМЭ за отрезок времени 22 часа с прохождением горного удара (ГУ) в течение десятков секунд после проведения технологического взрыва (ТВ). Технологический взрыв блока №11 проводился между горизонтами (-210) и (-280). Было взорвано 285 тонн ВВ. По наблюдениям сейсмостанции г. Таштагол энергия взрыва соответствовала величине $3.51 \cdot 10^8$ Дж. Два регистратора РЭМС-1 были установлены в орте 8 горизонта -280 м. Расстояние до взрываемого блока составляло около 80 м. Все датчики были установлены в направлении к взрываемому блоку. Два датчика регистраторов ДЕП и ДИП находились в 1 м от дайкообразного тела. Через 50 секунд после технологического взрыва произошел горный удар с энергией $1.1 \cdot 10^8$ Дж. Эпицентр горного удара находился в 50 м на Ю-З от места взрыва на отметке (-240) м, что соответствует глубине 690 м. На рис. 8а и 8б указан ГУ и виден релаксационный период после его прохождения в течение 4 минут. Затем массив перешел в возбужденное состояние, которое продолжалось около 17 часов, с возвратом на новый уровень состояния. Такое возбуждение характерно для сдвижения больших масс породы по активным разломам горного массива, которые имеются на Таштагольском руднике. В результате было выявлено 3 основных временных процесса: взрывное 15 секундное возбуждение горного массива и последующий горный удар спустя 50 секунд после взрыва; 4-х минутная релаксация горного массива после горного удара; 17 часовое возбуждение массива с возвратом в относительно устойчивое состояние. На рис. 8б приведен развернутый вид интенсивности ЭМЭ, полученной в течение 12 минут двумя регистраторами РЭМС-1 с использованием емкостных датчиков ДЕП и индукционных ДИП. Ход зависимостей интенсивности ЭМС от времени по электрической и магнитной составляющим несколько отличается, что обусловлен, вероятно, структурой горных пород, слагающих массив в местах взрыва и измерений ЭМЭ. При этом общие закономерности изменения интенсивности ЭМС, а также измене-

ний амплитуд ЭМЭ в широкой полосе частот и в полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц сохранялись для обоих типов принимающих датчиков. На рис. 9 приведен пример изменения интенсивности ЭМЭ и амплитуды АЭ, записанные регистратором РЭМС-1 в шахтном поле Таштагольского рудника

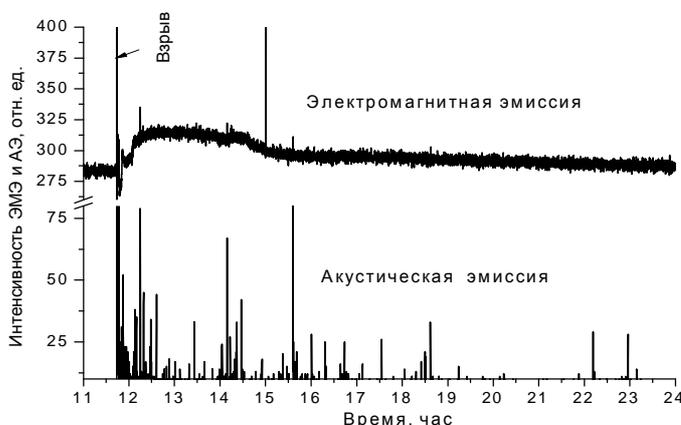


Рис. 9. Электромагнитная и акустическая эмиссии массива горных пород Таштагольского рудника до технологического взрыва, во время и после него в блоке №6 между горизонтами – 140 и – 210.

при технологическом взрыве блока №6 между горизонтами - 140 и -210 без протекания горного удара. Видно, что после взрыва в горном массиве изменяется НДС, которое постепенно возвращается в первоначальное состояние, что подтверждалось и сейсмическими данными.

Таким образом, регистратор РЭМС-1 может успешно использоваться для дальнейшего развития метода контроля НДС горных пород в наземных и подземных сооружениях по параметрам механоэлектрических преобразований.

параметрам механоэлектрических преобразований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

При выполнении диссертационной работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработан и изготовлен аналого-цифровой регистратор электромагнитной и акустической эмиссий для лабораторных и натурных исследований, обеспечивающий мониторинг электромагнитных и акустических сигналов при изменении напряженно-деформированного состояния гетерогенных материалов и горных пород.

2. Регистратор РЭМС-1 обеспечивает в условиях подземных сооружений уверенный прием ЭМС и АС и отображает изменения амплитуд ЭМС в широкой полосе частот $1 \div 100$ кГц и в выделенных полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц, а также изменения интенсивности потока ЭМС, производит предварительную обработку полученной информации путем усреднения амплитуд ЭМС и АС в течение 1 или 5 секунд, обеспечивает вывод информации на ПК в виде протокола для графического построения результатов измерений во времени.

3. Регистратор имеет низкое энергопотребление, что обеспечивает его работу в течение не менее 7 суток, а малые весогабаритные размеры создают необходимые условия для использования его при стационарных и маршрутных измерениях ЭМЭ и АЭ.

4. Разработанный регистратор электромагнитной и акустической эмиссий РЭМС-1 обеспечивает мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и геодинамических проявлений в условиях рудников.

5. Установлено, что максимальные амплитуды спектра ЭМС имеют частотные полосы, соответствующие размерам образцов, а также размерам блоков массива горных пород, ограниченных пространственными дефектами в виде минеральных включений и трещин. Уменьшение количества контактных слоев минералов, составляющих горную породу, приводит к снижению амплитуды ЭМС при их акустическом возбуждении.

6. Электрические и магнитные свойства горных пород оказывают существенное влияние на амплитудно-частотные параметры ЭМС. Полученные данные важны для понимания влияния электрофизических и магнитных свойств горных пород на амплитуду электромагнитного отклика, возникающего при прохождении через горную породу акустических сигналов.

7. Параметры и интенсивность 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.

8. Диапазон амплитуд ЭМС в горных породах Таштагольского рудника лежит в интервале от десятков микровольт до сотен милливольт, частотный спектр – в интервале от единиц герц до единиц мегагерц, но наиболее значимыми являются частоты $1 \div 80$ кГц.

9. Выявлены закономерности в изменениях амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород, заключающиеся в том, что на этапе формирования очага разрушения в спектре электромагнитных сигналов присутствуют частотные полосы во всем частотном диапазоне и возможно появление сигналов, обусловленных биением. При приближении к предельной прочности горных пород спектр электромагнитных сигналов смещается в низкочастотную область с увеличением амплитуды спектральных полос.

10. Показано, что мониторинг изменения НДС горных массивов целесообразно вести на дайках и контактах пород, имеющих выход на разломы, в зоны смещения и смятия, а также в места проведения технологических взрывов.

11. Изменения напряженно-деформированного состояния породного массива влекут за собой и изменения характеристик электромагнитной эмиссии, возникающей вследствие механоэлектрических преобразований в горных породах. Увеличение или уменьшение интенсивности и амплитуды электромагнитной эмиссии горных пород в натуральных условиях рудников позволяет выявлять этапы подготовки и проявления геодинамических событий, определять характер перераспределения напряженно-деформированного состояния массива.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях// Известия Томского политехнического университета. -№ 7, т.308.- 2005.- с.18-23;

2. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Механоэлектрические преобразования в кварце и кварцсодержащих горных породах в процессе акустического возбуждения//ФТПРПИ, 2007, №5, с. 22-27;
3. Беспалько А.А., Федотов П.И., Яворович Л.В. Регистратор электромагнитных и акустических сигналов для контроля прочности и разрушения материалов и массивов горных пород// Известия Томского политехнического университета.- №2, т. 312.-2008.-с.255-258;
4. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И., Виитман Е.В. Механоэлектрические преобразования в горных породах Таштагольского железорудного месторождения// Геодинамика. -2008.-№1(7).-с. 54-60;
5. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Виитман Е.В., Федотов П.И., Штирц В.А. Механоэлектрические преобразования в массиве горных пород Таштагольского рудника при взрывных воздействиях // ФТПРПИ.- 2010.- №2.-с.53-62;
6. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Диагностика развития деструктивных зон в образцах горных пород при одноосном сжатии по спектральным характеристикам электромагнитных сигналов//Дефектоскопия.-2011.- №10.- с. 41-49;
7. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Исследование параметров электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении горных пород, контактирующих с жидкостью//Контроль. Диагностика.- 2011.- №11/1.- с. 9-17.
8. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Колесникова С.И., Букреев В.Г., Мертецов А.Н., Федотов П.И. Исследование изменений характеристик электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород Таштагольского рудника // Известия ВУЗов. Физика.- 2011.-т.54, №1/2.- 2011.- с. 78-85.
9. Bepal'ko A.A., Yavorovich L.V., Fedotov P.I. Mechanoelectrical transformations in quartz and quartz-bearing rocks under acoustic action// Journal of mining Science.- 2007.-v. 43, №5.-pp.472-476.
10. Bepal'ko A.A., Yavorovich L.V., Viitman E.E., Fedotov P.I., Shtirts V.A. Dynamoelectric energy transfers in a rock mass under explosion load in terms of the Tashtagol mine // Journal of Mining Science.-2010.-Vol.46.- No. 2.- pp.136-142.
11. Патент на полезную модель № 80557. – Приоритет от 20.08.2008. Беспалько А.А., Хорсов Н.Н., Федотов П.И., Кураков С.А. Регистратор электромагнитных и акустических сигналов.
12. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И., Штирц В.А. Электромагнитный мониторинг геодинамических процессов на Таштагольском железорудном месторождении// Сборник докладов I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 25-29 июля 2011 г., г. Катунь, горный Алтай.- с.135-139.
13. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Федотов П.И. Контроль прочности горных пород при одноосном сжатии по параметрам электромагнитных сигналов // Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 5–9 сентября 2011 г., Томск. - с. 434-436.