

На правах рукописи

Беспалько Анатолий Алексеевич

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

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск 2019

Работа выполнена в Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный консультант:

Суржиков Анатолий Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ

Официальные оппоненты:

Опарин Виктор Николаевич,
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор.
ФГБУН «Институт горного дела» СО РАН, г. Новосибирск, заведующий отделом экспериментальной геомеханики

Вострецов Алексей Геннадьевич,
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ.

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, проректор по научной работе, заведующий лабораторией квантовой криогенной лаборатории

Панин Сергей Викторович,
Доктор технических наук, профессор.
ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения» СО РАН, г. Томск, заведующий лабораторией механики композиционных материалов.

Защита состоится «18» июня 2019 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Диссертация и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ФГАОУ ВО «НИ ТПУ»: <http://dis.tpu.ru>

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Шевелева Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В горном деле величина и распределение напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород относится к основополагающим факторам, определяющим закономерности развития геомеханических процессов, таких как геодинамические явления, сдвигание и деформирование горных пород и земной поверхности в области влияния разработки месторождения. Проявления горного давления в динамической форме вызываются комплексным влиянием целого ряда природных и техногенных факторов, среди которых в разной степени присутствуют как способствующие, так и локализующие. Превалирующее влияние неблагоприятных факторов вызывает горные удары, толчки и другие геодинамические проявления.

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

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

По данным Алтай - Саянского филиала Геофизической службы СО РАН за последние 15 лет возросло количество геодинамических проявлений по мере увеличения в районах разработки и добычи полезных ископаемых. Это обстоятельство влечет за собой существенные экономические затраты на восстановление шахт и техники, а также человеческие жертвы. В большей мере геодинамические проявления обусловлены техногенной сейсмичностью, так как в шахтах и на разрезах производят массовые технологические взрывы с зарядом до 300 тонн взрывчатого вещества. Крупные технологические взрывы по обрушению рудных блоков на железорудных месторождениях также сопровождаются мощными динамическими явлениями. Взрывы вызывают индуцированную и триггерную сейсмичность в зонах отработки полезных ископаемых. Так, например, в 2017 году по данным того же фи-

лиала Геофизической службы СО РАН на территории Кемеровской области за 11 месяцев произошло 8349 сейсмических событий, в том числе произведено 7264 промышленных взрыва. По сравнению с 2016 годом это на 1080 сейсмических событий больше, а количество промышленных взрывов увеличилось на 489. На Таштагольском месторождении динамическая активность массива изменялась следующим образом: 2016 году - 2694, в 2017 году – 3352 и в 2018 году – 1869 событий 1-9 класса.

В последнее время в связи с увеличением глубины добычи руды даже меньшие по мощности технологические взрывы могут иметь неблагоприятные последствия за счет высвобождения накопленной в породном массиве энергии. Для исключения этих явлений и, как следствие, травматизма и человеческих жертв необходим надежный прогноз горно-геологических и геомеханических условий ведения горных работ, разработка новых методов и способов отработки рудных месторождений, снижающих риск геодинамических явлений.

В настоящее время одним из перспективных методов мониторинга и контроля изменений НДС горного массива и прогноза геодинамических событий, в том числе в шахтном поле рудников, являются методы, основанные на механоэлектрических преобразованиях (МЭП) в горных породах, бетонах и других диэлектрических структурах. При механоэлектрических преобразованиях параметры возникающих электромагнитных сигналов (ЭМС) и характеристики электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) несут информацию о процессах образования деструктивных зон и об изменении НДС в шахтном поле. И здесь главным является, с одной стороны, понимание физических процессов, приводящих к возникновению электромагнитных сигналов, выявление закономерностей вариаций параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при изменениях НДС и образцов, и массива горных пород. С другой стороны, важным является аппаратная оснащенность разрабатываемых методов, которая поможет обеспечить выявление амплитудно-частотных и амплитудно-временных связей изменения НДС горных пород с изменениями параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при МЭП в породном массиве. Кроме того, при создании полевых аппаратно-программных комплексов необходимо учитывать возможность использования регистраторов ЭМС в качестве первичного сетевого оборудования сбора и предварительной обработки информации об изменениях параметров и характеристик ЭМЭ горных пород для передачи на удаленный компьютер диспетчера.

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

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

Цели работы:

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

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

Задачи исследований:

1. Разработать приборы и средства мониторинга для исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии гетерогенных материалов и горных пород: в лабораторных условиях при акустическом возбуждении и одноосном сжатии, в том числе при приложении электрических или магнитных полей; в натурных условиях шахты Таштагольского рудника при возбуждении взрывом массива горных пород.
2. На основании лабораторных и натурных исследований с применением созданных регистраторов электромагнитной и акустической эмиссий разработать метод для мониторинга и контроля развития деструктивных зон и геодинамических процессов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массива горных пород.
3. Математически смоделировать и экспериментально определить амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом воздействии на образцы с различными структурными особенностями, электрическими, сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами, при поляризации образцов и приложении электрического и магнитного полей, а также образцов, контактирующих с солевыми водными растворами.
4. Экспериментально выявить закономерные связи амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии образцов горных пород на разных этапах подготовки и развития разрушения одноосным сжатием.
5. Разработать способы выявления наиболее эффективных мест установки приборов электромагнитного мониторинга геодинамической обстановки в натурных условиях шахтного поля рудников.
6. Разработать феноменологию возникновения и развития геодинамических явлений в массивах горных пород при взрывных воздействиях. Для чего установить закономерные связи изменений напряженно-деформированного состояния горных

пород с амплитудно-частотными параметрами электромагнитных сигналов и характеристиками электромагнитной эмиссии породного массива. На основании полученных закономерностей определить диапазоны наиболее эффективных частот ЭМС для мониторинга образования и развития геодинамических проявлений различного характера.

Методы исследований: математическое и физическое моделирование МЭП в гетерогенных диэлектрических структурах; метод измерения заряда на контактах минералов на поверхности образцов горных пород; измерения токов поляризации; измерения силы и деформации при нагружении образцов горных пород; спектральный анализ аналоговых ЭМС с использованием процедуры быстрого преобразования Фурье, а также расчет математического ожидания и дисперсии амплитуд ЭМЭ; электрические и индукционные методы измерения характеристик электромагнитной эмиссии при изменении напряженно-деформированного состояния горных пород, в том числе в натурных условиях шахты Таштагольского рудника; методы пьезоэлектрического и ударного акустического возбуждения образцов горных пород; возбуждение изменений напряженно-деформированного состояния породного массива и геодинамических проявлений в натурных условиях шахты Таштагольского рудника взрывами 30-300 тонн взрывчатого вещества; методы измерения акустических сигналов с помощью пьезоэлектрических преобразователей в лабораторных и натурных условиях; данные измерений сейсмической активности шахтного поля Таштагольского рудника; метод инфракрасной радиометрии; метод контроля отшелушивания микрочастиц при развитии разрушения горных пород; математическое моделирование обнаружения предвестников разрушения горных пород с использованием временных рядов; лицензионные программы Mathcad и Origin Lab.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Регистраторы электромагнитных и акустических сигналов для работы в лабораторных и шахтных условиях подземных рудников, в том числе в информационной системе мониторинга развития геодинамических событий.
2. Определяющее влияние электрофизических свойств, структурного строения и влажности горных пород на амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов при любом типе механического воздействия.
3. Контроль формирования и наличия зоны деструкции горных пород осуществляется по амплитудно-частотным параметрам электромагнитных сигналов и по характеристикам электромагнитной эмиссии.
4. Развитие разрушения массива горных пород после взрывных воздействий сопровождается изменениями характеристик электромагнитной эмиссии во времени от секунд до десятков часов, в зависимости от значения наведенных механических напряжений и структуры горного массива.
5. Действующие механические напряжения, контакты и прочность структурных составляющих породы определяют температуру инфракрасного свечения в окрестностях скважин и отверстий в горных породах. Инфракрасное свечение скважин и электромагнитное профилирование являются оптимальными методами выбора наиболее эффективных мест установки приборов для электромагнитного мониторинга геодинамической обстановки в натурных условиях шахтного поля рудников.

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

Достоверность научных результатов подтверждается: математическим моделированием электромагнитных откликов слоистых и дефектных структур; необходимым и достаточным объемом экспериментальных измерений и полученных закономерностей в лабораторных, а также в натурных условиях шахты Таштагольского рудника; применением современной техники и методов исследования механикоэлектрических преобразований в гетерогенных диэлектрических структурах; применением калиброванных современных приборов для измерения электрических величин, а также электрических измерений неэлектрических величин; использованием созданных аналогово-цифровых программно-аппаратных регистраторов электромагнитных и акустических сигналов; корректностью постановки задач и их обоснованности; обработкой экспериментальных данных с использованием методов статистики и специальных компьютерных программ; получением результатов, не противоречащих физике исследуемых процессов.

Новизна научных положений.

- Амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов и характеристики электромагнитной эмиссии определяются структурным и текстурным строением горных пород и их зарядовым состоянием, влажностью и амплитудно-частотными параметрами возбуждающего акустического импульса при механическом воздействии.
- Внешние постоянные электрические и магнитные поля оказывают существенное влияние на параметры электромагнитного отклика горных пород при импульсном акустическом возбуждении.
- Формирование и развитие зон деструкции горных пород определяется по амплитудно-частотным параметрам электромагнитных сигналов, а также по характеристикам электромагнитной эмиссии.
- По характеристикам электромагнитной эмиссии, измеряемой в шахтном поле рудника после технологических взрывов, достоверно определяются временные интервалы и выделившаяся энергия при развитии разрушения массива горных пород. При этом развитие разрушений после взрывных воздействий обусловлены наведенными механическими напряжениями и структурой массива в районе их действия.
- Температура инфракрасного свечения скважин, отверстий и контактов горных пород определяется действующими механическими напряжениями и прочностью структурных составляющих породы.
- Новый тип аналого-цифровых регистраторов РЭМС1 и РЭМАС1, при создании которых использован комплексный подход, расширяющий возможности при регистрации электромагнитной и акустической эмиссий в условиях подземных сооружений, а совокупность решений при реализации такого подхода обеспечивает новизну регистраторов.
- Электромагнитная и ИК радиометрическая схемы выбора места установки регистраторов электромагнитных и акустических сигналов обеспечивают эффективный

прием электромагнитной эмиссии из зон развития деструктивных и геодинамических процессов.

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

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

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработанный, изготовленный и апробированный в течение пятнадцатилетнего периода исследований программно-аппаратный регистратор типа РЭМАС1 способен вести без смены и подзарядки аккумулятора в течение не менее 180 часов непрерывный мониторинг электромагнитной и акустической эмиссий в условиях рудников при проведении взрывных воздействий на породный массив и в период релаксации горных пород. Создание регистратора и полученные при его использовании результаты исследований изменения ЭМЭ и АЭ в лабораторных и натурных условиях Таштагольского месторождения внесли существенный вклад в разработку и развитие метода мониторинга и контроля развития разрушения гетерогенных материалов, а также геодинамических событий в породных массивах по параметрам механоэлектрических преобразований.
2. Разработанный, изготовленный и апробированный программно-аппаратный регистратор характеристик ЭМЭ РЭМАС1 позволяет проводить в заданном интервале времени от $8 \cdot 10^{-3}$ до $128 \cdot 10^{-3}$ секунд автоматический анализ записанных данных путем расчета математического ожидания амплитуд ЭМЭ и АЭ, а также дисперсии амплитуд ЭМЭ. Регистратор использован при разработке практической информационной системы. В информационной системе регистратор РЭМАС1 используется

в качестве прибора, предназначенного для сбора, предварительной обработки и передачи данных на удаленный компьютер диспетчера.

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

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

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

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

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на научных семинарах Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДиП) Томского политехнического университета, на Международных конференциях и симпозиумах: «Неклассическая геофизика», Саратов, 2000 г.; «Физика твердого тела», Усть-Каменогорск, Казахстан, 2002 г.; «Контроль и реабилитация окружающей среды», Томск, 2002 г.; «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» Москва, 2003 г.; «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений», Паратунка, Камчатский край, 2004 г.; «Горные науки Республики Казахстан – итоги и перспективы», Алматы, 2004 г.; «Физическая мезомеханика и компьютерное конструированию при разработке новых материалов», Томск, 2004, 2009, 2011 г.г.; «Проблемы и перспективы развития горных наук», Новосибирск, 2004 г.; «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева, Томск, 2009 г.; на Всероссийской конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле», Москва, 2008 г.; на XX Международной научной школе имени академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках», Крым, Алушта, 2010 г.; на I и II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, Горно-Алтайск, 2011 и 2013 г.г.; на International Forums on Strategic Technology (IFOST), Ulsan Republic of Korea 2003г., Tomsk, 2011 г.; на 2-ой Российско-Китайской научной конференции «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах», Новосибирск, 2012 г.; на International Conference on Environmental Science and

Sustainable Development (ICESSD2015); на International Scientific Conference on "Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials" Tomsk, Russia 2014 и 2015; на Information-measuring equipment and technologies «Scientific conference with international participation 2016 (IME&T 2016)» Tomsk, Russia; на IV International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing, 2016; на 10th International Conference on Instrumental Methods of Analysis, IMA-2017, Greece»; на Всероссийских конференциях с международным участием «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Новосибирск, 2001, 2003, 2005, 2007, 2011, 2013, 2017 г.г.

Результаты работы апробировались и использовались в шахте Таштагольского месторождения при выполнении фундаментальных работ по грантам РФФИ: 06-08-00693-а, 06-08-02100-э_к, 10-08-02100-э_к, 11-07-00666-а и 11-07-98000р_сибирь_а, 14-08-00395-а; по Федеральным целевым программам: «Интеграция» 2001, «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по теме «Технология снижения риска и уменьшения последствий техногенных катастроф с обеспечением эффективного недропользования и безопасности освоения месторождений с повышением извлечения богатой руды в условиях больших глубин и аномально высокого напряженного состояния горного массива» (шифр заявки «2011-1.5-515-062-005»); по Государственному контракту ГК № 16.515.11.5085/01.11 от «21» октября 2011 года с Институтом горного дела СО РАН, выполняемого по теме «Исследования параметров электромагнитных и акустических сигналов при изменениях напряженно-деформированного состояния горных пород и разработка аппаратуры для их мониторинга и транспорта»; по проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 5.2012.2014/К «Моделирование процессов механоэлектрических преобразований в диэлектрических гетерогенных структурах и горных породах для создания информационных технологий мониторинга процессов возникновения и развития деструктивных зон и геодинамических явлений».

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

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

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены апробация результатов исследования и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ изученности механизмов и разработанных моделей генерации электромагнитных сигналов диэлектрическими твердотельными материалами и горными породами, механизмов разрушения горных пород и связей характеристик акустической и электромагнитной эмиссий при механическом воздействии, условий формирования горного удара, направлений применения инфракрасной радиометрии для целей мониторинга развития деструктивных процессов в образцах и массивах горных пород.

В результате проведенного анализа показана недостаточность теоретических и экспериментальных исследований для формирования физических основ электромагнитного метода контроля и мониторинга подготовки и развития разрушения горных пород по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии; а также ограниченность применения метода и отсутствие программно-аппаратных средств мониторинга развития геодинамических событий по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии горных пород с привлечением акустических измерений фактического прохождения геодинамических явлений. Исходя из этого, определена область исследования, поставлены задачи и определены пути их решения.

Во второй главе рассмотрены горно-геологическая и гидрологическая характеристики Таштагольского железорудного месторождения, на котором проводились натурные исследования. Приведены физико-механические, электрические и магнитные свойства горных пород этого месторождения, на образцах которого проводилось большинство лабораторных экспериментов.

В третьей главе проведен анализ применяемых методов и аппаратуры исследования электромагнитной эмиссии горных пород в лабораторных и натурных условиях. Описан разработанный стенд для исследования электромагнитной активности образцов горных пород при акустическом возбуждении, для определения скорости звука и его затухания в исследуемых твердотельных материалах. Показаны пьезоэлектрический и ударный способы детерминированного возбуждения акустических импульсов, а также используемые схемы электромагнитного приемника и усилителя мощности. Описан созданный на базе автоматизированного прессы ИП 500 стенд для комплексных исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии при развитии процесса разрушения образцов горных пород как при линейном нагружении, так и при ступенчатом. На стенде возможно измерение параметров силового нагружения и деформации образцов, параметров ЭМС и АС, а также характеристик ЭМЭ, токов поляризации, инфракрасное свечение и размеров субмикронных частиц при развитии деструктивных зон в образцах до разрушающих значений нагружения. Приведен вибрационный метод и параметры применяемой аппаратуры для измерения поверхностного заряда на образцах гетерогенных диэлектрических материалов. Описан состав разработанного автономного программно-аппаратного комплексного регистратора электромагнитных и акустических сигналов РЭМС1, емкостных, индукционных и пьезоэлектрических датчиков, используемых в регистраторе. Функциональная схема регистратора РЭМС1 приведена на рисунке 1. Работа регистратора основана на принципах преобразования энергии электромагнитных сигналов посредством емкостного или индукционного датчиков в аналоговые сигналы с последующим усилением, оцифровкой, усреднением в установленный промежуток времени и запо-

минанием конечных данных на встроенном носителе памяти. Такая же последовательность операций предусмотрена при регистрации акустических сигналов с пьезоэлектрического аperiодического приемника. В дальнейшем, с помощью программы ввода-вывода, информация передавалась на ПК для графического построения и анализа.

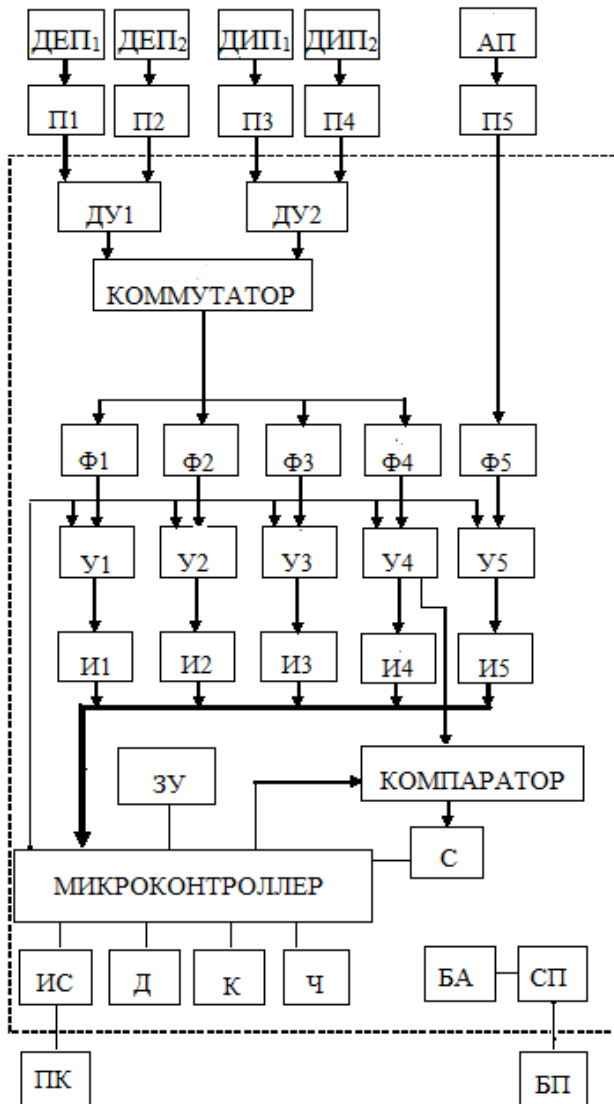


Рисунок 1 – Функциональная схема регистратора электромагнитных и акустических сигналов РЭМС1: ДЕП₁ и ДЕП₂ – емкостные датчики; ДИП₁ и ДИП₂ – индукционные датчики; АП – пьезоэлектрический акустический датчик; П1–П5 – унифицированные согласующие усилители тока; ДУ1 и ДУ2 – дифференциальные усилители; Ф1 – Ф5 – частотные фильтры; У1 – У5 – амплитудные усредняющие схемы; И1 – И5 – индикаторы на дисплее регистратора; ЗУ – запоминающее устройство; С – счетчик; ИС – интерфейс связи; Д – дисплей; К – клавиатура; Ч – блок реального времени; ПК – персональный компьютер; БА – блок аккумуляторов; СП – стабилизатор питания; БП – блок для зарядки аккумуляторов от сети 220 В

В приемном тракте автономного регистратора РЭМС1 по электрической и магнитной составляющим электромагнитных сигналов реализована дифференциальная схема для подавления электромагнитных помех. Чувствительность принимающих трактов регистратора составляла 10^{-5} В для ЭМС и $5 \cdot 10^{-5}$ В для импульсных АС в интервале частот (1-100) кГц при частоте дискретизации 200 кГц. В приборе предусмотрена возможность получения информации в полосах с добротностью не более 8 на выделенных центральных частотах 2, 15 и 100 кГц, а также измерение интенсивности импульсного потока ЭМС. Для уменьшения количества данных измерений РЭМС1 производит их усреднение за 1 или 5 с. Измерительный комплекс РЭМС1 имеет удовлетворительные весовые и габаритные характеристики. Общий вес комплекса РЭМС1 составляют не более 12 кг. Время работы регистратора в автономном режиме без замены или подзарядки аккумуляторов составляет не менее 78 часов. Предусмотрена замена блока питания. Защита от пыли и влажности не хуже IP53. На регистратор РЭМС1 получен один патент и два свидетельства на программное обеспечение, а также Золотая медаль Сибирской ярмарки «Гео-Сибирь 2005» (г. Новосибирск).

На базе опытных работ по измерению ЭМЭ с помощью РЭМС1 в лабораторных и натурных условиях шахты до технологических взрывов массива горных пород, во время их проведения и в период релаксации НДС массива разработан автономный программно-аппаратный комплекс РЭМАС1 (рисунок 2) для измерения параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ с повышенной чувствительностью и детализируемым частотным спектром, с возмож-

ностью передачи информации на удаленный компьютер. Чувствительность по входу электромагнитного канала составляла не менее $2 \cdot 10^{-6}$ В, а акустического – не менее $50 \cdot 10^{-6}$ В. Вход канала регистрации ЭМС дифференциальный, а его динамический диапазон находится в интервале 60 дБ для частот (1-100) кГц. Максимальное входное напряжение на электромагнитных каналах регистратора – 0,5 В. Вычисление через 1 кГц ста амплитуд ЭМС производится за дискретно устанавливаемые периоды $(8-128) \cdot 10^{-3}$ с. Время записи информации на сменный носитель или на удаленном ПК за каждый период вычисления амплитудных спектров ЭМС производится в течение 10^{-2} с. Время работы РЭ-МАС1 со встроенным блоком аккумуляторов составляет 70 часов, а от сети переменного тока регистратор осуществляет измерения ЭМС и АС в непрерывном режиме до заполнения сменного носителя памяти. Используемые для работы электромагнитные и акустические датчики такие же, как и для РЭМАС1. Исполнение РЭМАС1 и датчиков обеспечивает пыле- и влагозащищенность IP64. На рисунке 3 представлен алгоритм работы математического блока регистратора.

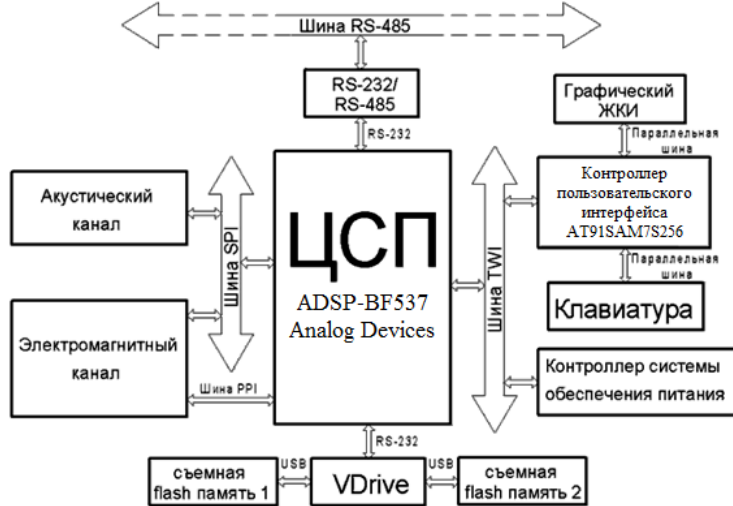


Рисунок 2 – Структурная блок-схема автономного амплитудно-частотного регистратора электромагнитных и акустических сигналов РЭМАС1.

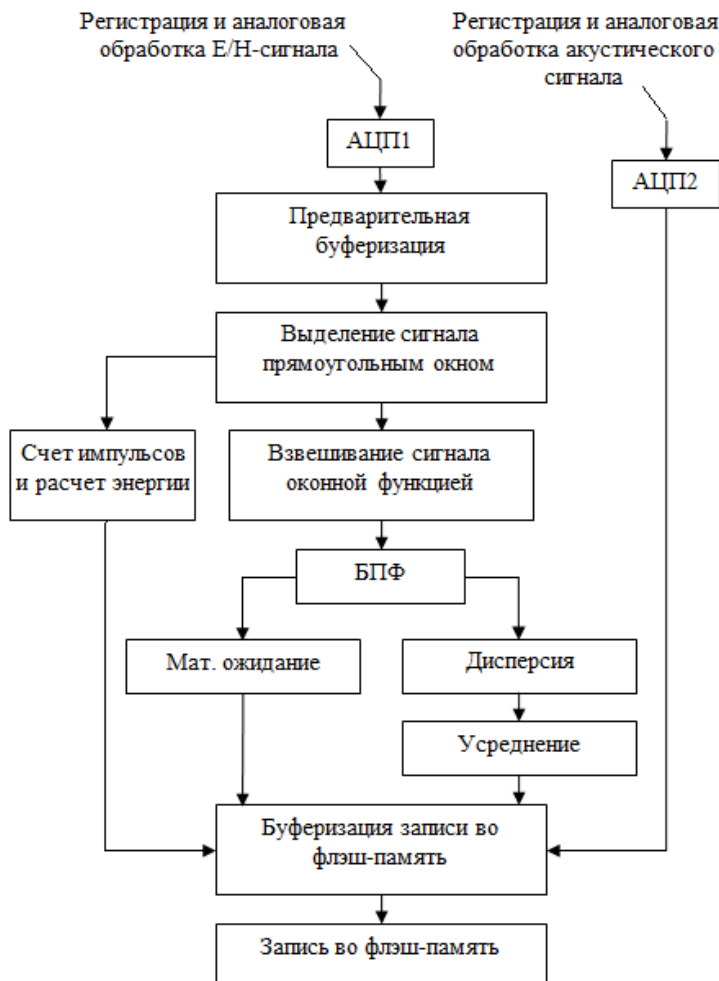


Рисунок 3 – Алгоритм работы математического блока регистратора РЭМАС1

лено 50% наложением и удвоением частотно – временного потока путем расчета математического ожидания, а также квадрата СКО спектральных составляющих

Вход канала регистрации ЭМС дифференциальный, а его динамический диапазон находится в интервале 60 дБ для частот (1-100) кГц. Максимальное входное напряжение на электромагнитных каналах регистратора – 0,5 В. Вычисление через 1 кГц ста амплитуд ЭМС производится за дискретно устанавливаемые периоды $(8-128) \cdot 10^{-3}$ с. Время записи информации на сменный носитель или на удаленном ПК за каждый период вычисления амплитудных спектров ЭМС производится в течение 10^{-2} с. Время работы РЭ-МАС1 со встроенным блоком аккумуляторов составляет 70 часов, а от сети переменного тока регистратор осуществляет измерения ЭМС и АС в непрерывном режиме до заполнения сменного носителя памяти. Используемые для работы электромагнитные и акустические датчики такие же, как и для РЭМАС1. Исполнение РЭМАС1 и датчиков обеспечивает пыле- и влагозащищенность IP64. На рисунке 3 представлен алгоритм работы математического блока регистратора. Выходными данными являются математическое ожидание и квадрат среднеквадратичного отклонения (СКО) амплитуд спектральных составляющих, рассчитанные на выборке конечной длины, содержащей N выборок. Это позволяет уменьшить выходной объем данных измерения по сравнению с исходным в $10 \cdot N/4$ раз. Уменьшение в 10 раз обусловлено преобразованием сигнала в частотную область и выделением необходимой полосы частот 1-100 кГц. Число 4 обуслов-

сигнала. На рисунках 4 приведена итоговая схема используемых в работе теоретических и экспериментальных методов. Эти методы применялись для определения акустических и прочностных свойств образцов горных пород, а также для выявления природы и закономерностей механоэлектрических преобразований (МЭП) в



Рисунок 4 – Применяемые методы для исследования свойств и электромагнитной эмиссии образцов горных пород и гетерогенных диэлектрических материалов при акустическом возбуждении и силовом нагружении

свое описание образцов горных пород, данные о геологическом строении массива, полученные при разведочном бурении и схемы горизонтов Таштагольского рудника.

Приборы и стенды успешно использовались для исследования параметров и характеристик электромагнитной и акустической эмиссий горных пород, для выявления их связей, в том числе при внешнем детерминированном акустическом возбуждении, а также для выявления параметров и характеристик ЭМЭ на этапах развития разрушения в лабораторных экспериментах и в натурных условиях Таштагольского железорудного месторождения.

В четвертой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований электромагнитной эмиссии модельных образцов гетерогенных диэлектрических структур и горных пород. Эти исследования являлись обоснованием для разработки и применения методов мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород в естествен-

горных породах. Кроме того, эти методы были направлены на выявление связей амплитудно-частотных параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ с параметрами импульсного акустического возбуждения и с развитием разрушения при одноосном сжатии или сдвиговом нагружении.

На рисунке 5 представлена схема методов, используемых для исследования механоэлектрических преобразований в массиве горных пород в шахтных условиях, а также для выявления связей с сейсмическими проявлениями и инфракрасной радиометрией.

Таким образом, в 3 главе приведен практически полный комплекс разработанных специализированных универсальных стендов, методик и регистраторов РЭМС1 и РЭМАС1 с программным обеспечением и предварительной амплитудно-частотной обработкой данных измерений ЭМС, применяемых при исследованиях параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ горных пород. Использовались также петрофизиче-

ном их залегании по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии.

Горные породы это сложные гетерогенные образования, в которых всегда имеются объемные дефекты различного содержания и структуры: газовые, жидкостные, твердотельные или их общность. При развитии разрушения горных пород появляются дополнительные протяженные нарушения в виде микротрещин. При прорастании трещин часть высвободившейся энергии переходит в энергию акустического импульса, параметры которого определяются размерами и скоростью раскрытия такого дефекта. Распространяясь по горной породе или другому твердому телу, акустические импульсы взаимодействуют с имеющимися или вновь возникшими дефектами. Результатом такого воздействия в диэлектрических материалах, какими являются в своем большинстве горные породы, возникают колебания зарядов или двойных электрических слоев на бортах трещин, на границах включений и блоков, на границах раздела сред и пород или на других поляризованных структурах горных пород. Возникшие колебания сопровождаются генерацией электромагнитных сигналов. Поэтому для разработки метода мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических событий важным являлись исследования параметров и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород при импульсном акустическом воздействии. В начале главы 4 приведены данные измерений распределения зарядов на поверхности образцов горных пород сиенитового скарна, известняка, магнетитовой руды из Таштагольского месторождения и на поверхности кальцитового сталактита, взятого в качестве сравнительного образца. Погрешность измерения заряда составляла 15%.



Рисунок 5 – Применяемые методы для исследования электромагнитной эмиссии горных пород при изменениях напряженно-деформированного состояния породного массива

ных пород при импульсном акустическом воздействии. В начале главы 4 приведены данные измерений распределения зарядов на поверхности образцов горных пород сиенитового скарна, известняка, магнетитовой руды из Таштагольского месторождения и на поверхности кальцитового сталактита, взятого в качестве сравнительного образца. Погрешность измерения заряда составляла 15%.

На рисунке 6б показано, что величина заряда находится на минеральных включениях горной породы, имеющих наибольшее удельное сопротивление. Причем такие максимальные значения заряда возникают как в горных породах с высоким удельным сопротивлением, имеющим низкоомные включения, так и на высокоомных включениях, имеющих низкоомное окружение минералами, содержащимися в образце. Измерения поверхностного распределения заряда на сталактите с залеченной трещиной подтвердили этот вывод, так как сопротивление залеченной трещины на четыре порядка ниже, чем основной материал, из которого состоит сталактит.

пульса, параметры которого определяются размерами и скоростью раскрытия такого дефекта. Распространяясь по горной породе или другому твердому телу, акустические импульсы взаимодействуют с имеющимися или вновь возникшими дефектами. Результатом такого воздействия в диэлектрических материалах, какими являются в своем большинстве горные породы, возникают колебания зарядов или двойных электрических слоев на бортах трещин, на границах включений и блоков, на границах раздела сред и пород или на других поляризованных структурах горных пород. Возникшие колебания сопровождаются генерацией электромагнитных сигналов. Поэтому для разработки метода мониторинга и краткосрочного прогноза геодинамических событий важным являлись исследования параметров и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород при импульсном акустическом воздействии.

Математическое моделирование изменений параметров ЭМС при разных амплитудах акустического воздействия на дефектную структуру с постоянным зарядом показало, что в результате акустоэлектрических преобразований на двойных электрических слоях происходит переизлучение энергии воздействующих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. При этом изменение амплитуды ЭМС линейно зависит от величины заряда на обкладках дефекта и от величины возбуждающего акустического импульса при постоянном зарядовом состоянии дефекта. На примере образцов кальцита (рисунок 6в) экспериментально показано, что электризация отличающихся по размеру структурных элементов приводит к увеличению поверхностной плотности заряда с уменьшением размеров структурных элементов. Общая погрешность измерения заряда и амплитуды ЭМС составляла 9%.

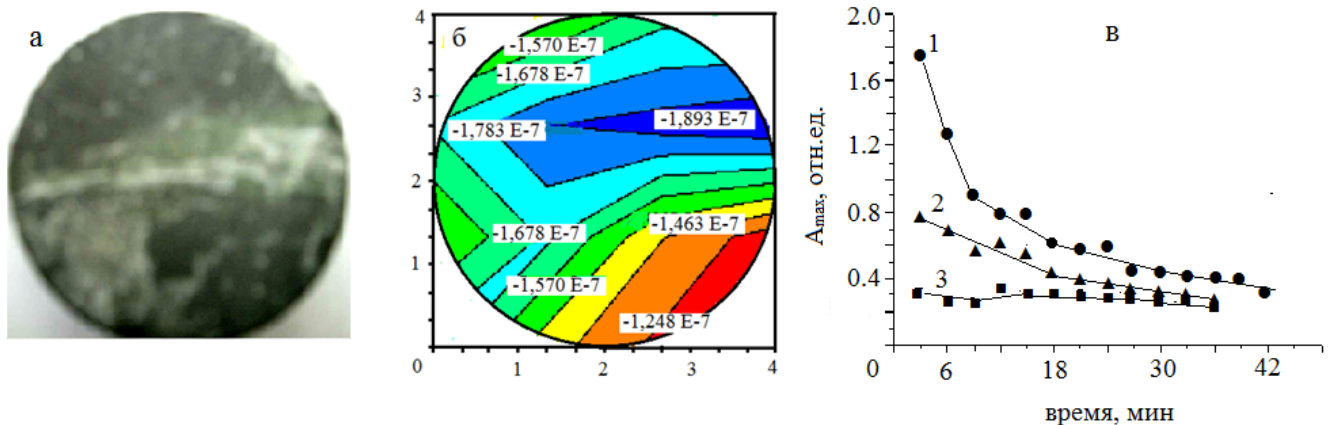


Рисунок 6 – Пример распределения заряда на поверхности образца №2 магнетитовой руды с включениями скарна и кальцита (а – фотография поверхности образца, б – изолинии распределения заряда по поверхности образца в кулонах) и закономерности изменения максимальной амплитуды электромагнитного сигнала (в) при акустическом возбуждении электризованных образцов кальцита в процессе релаксации заряда через каждые 3 минуты (1 – мрамор крупнокристаллический, 2 – мрамор мелкокристаллический, 3 – сталактит).

Подобную зависимость имеет и время релаксации поверхностного заряда. При этом амплитуда электромагнитного отклика на внешнее акустическое возбуждение из крупнокристаллического образца выше, чем у мелкокристаллического. Такие закономерности изменения амплитуды ЭМС зависят от величины дипольного момента структурных элементов. Этим же обстоятельством обусловлены и отличия амплитудно-частотных спектров ЭМС образцов мрамора. Экспериментальные исследования показали, что электрические и магнитные свойства горных пород и минеральных включений в них оказывают существенное влияние на амплитудно-частотные параметры ЭМС при акустических воздействиях. При этом амплитуды ЭМС нарастают при увеличении приложенных постоянных электрических или магнитных полей. Экспериментально линейность электромагнитного отклика на возбуждение акустическим импульсом в микросекундном диапазоне проверялась до напряженностей электрического поля $2.5 \cdot 10^3 \text{ В/м}$. При электризации вмещающих магнетитовую руду высокоомных образцов горных пород, например сиенита, в амплитудно-частотных спектрах проявляются низкочастотные составляющие. Показано также, что изменения амплитуды ЭМС зависят от содержания магнетита в образцах руды и подчиняется явлению гистерезиса. На рисунке 7а приведены закономерности изменения максимальной амплитуды электромагнитных откликов

на идентичное импульсное акустическое возбуждение образцов с разным содержанием магнетита от намагниченности в постоянном магнитном поле, создаваемого неодим-феррум-боровым (NdFeB) магнитом.

В образце руды №0 содержится по объему 74% магнетита, в образце №1 – 54%, в образце №3 – 0.23%, а в образце скарна – 0%. Ориентация магнитных диполей магнетита без внешнего акустического воздействия сохраняется длительное время. На рисунке 7б приведены изменения амплитуды электромагнитных сигналов при акустическом воздействии от времени выдержки после намагничивания образца магнетитовой руды при равных условиях намагничивания. Воздействие акустическими импульсами приводит ориентацию магнитных диполей в первоначальное состояние до намагничивания.

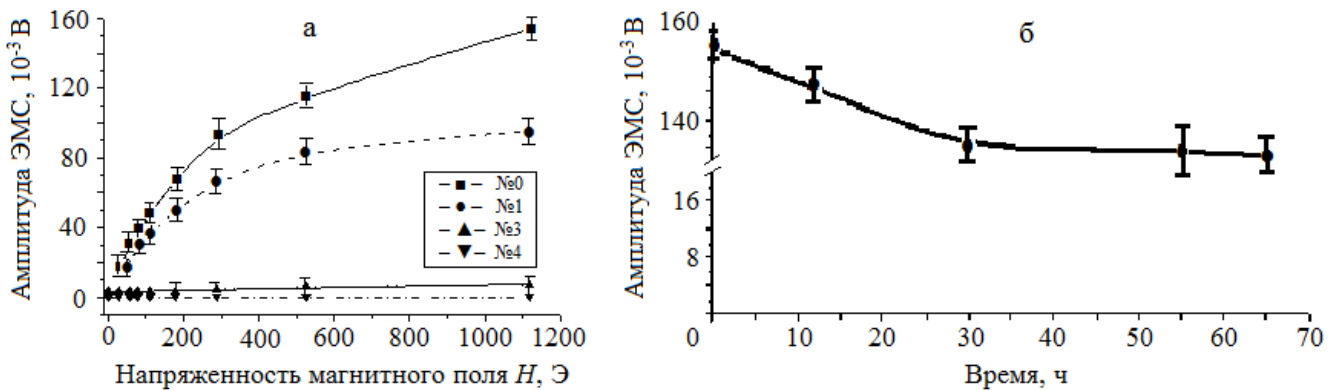


Рисунок 7 – Закономерности изменения максимальной амплитуды ЭМС на импульсное акустическое возбуждение образцов с разным содержанием магнетита в постоянном магнитном поле (а); изменения амплитуды электромагнитных сигналов от времени при равных условиях намагничивания

Кроме сложной структуры горные породы обладают и сложным текстурным строением. Поэтому важным являлось выявление влияния текстуры на параметры ЭМС на примере слоистых образцов. Математическое моделирование акустоэлектрических преобразований в слоистых твердотельных материалах, а также математическое моделирование изменений параметров электромагнитных откликов при импульсном детерминированном акустическом воздействии выявило закономерности преобразования на двойных электрических слоях энергии возбуждающих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. Кроме того, показана связь амплитудно-частотных параметров генерируемых электромагнитных сигналов с зарядовым состоянием слоистых структур и характеристиками детерминированных акустических воздействий. При моделировании учитывалось, что начальные условия являются нулевыми, так как система до введения возмущения находилась в покое. При решении дифференциального уравнения использовался численный метод Рунге – Кутты 4-го порядка в программно-интегральной среде MathCAD-13. Результатом решения являлись амплитудно-частотные спектры изменений заряда $q(t)$ и тока смещения $i(t)$ (рисунок 8). Физическое моделирование влияния слоистости на параметры ЭМС при акустическом детерминированном воздействии осуществлялось на двухслойных и трехслойных моделях, а также на природной многослойной системе на примере полосчатого серпентинита. Двухслойные системы моделировались на основе одинаковых образцов сиенита или кварца. В трехслойных системах использовались те же кварцевые образцы с акустическим импе-

дансом $z_k = 15.6 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ по направлению распространения акустического импульса и прослойки в виде полиметилметакрилата (ПММА) толщиной $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $2.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $4.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, имеющих акустический импеданс $z_{орг} = 3.2 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, силикатного стекла толщиной $2.1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и импедансом $z_{ст} = 14.2 \cdot 10^6 \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$, а также меди толщиной $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ с импедансом $z_m = 42 \cdot 10^6 \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$.

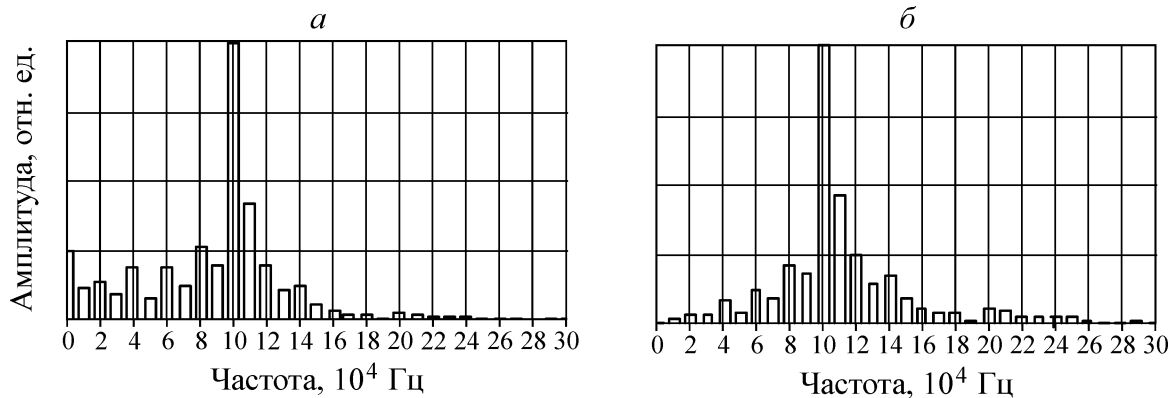


Рисунок 8 – Рассчитанные амплитудно-частотные спектры: *а* - заряда $q(t)$; *б* - тока смещения $i(t)$

Измерения ЭМС производилось датчиком диаметром $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Датчик регистрации ЭМС перемещался вдоль оси модельных и природных слоистых систем. Акустический контакт осуществлялся минеральным маслом. На контакте двух одинаковых образцов сиенита или кварца в двухслойных системах амплитуда ЭМС возрастает в 2-3 раза.

На каждой из граней кристаллов кварца или сиенита проходящий акустический импульс (АС) возбуждает переменное электрическое поле. Суперпозиция этих полей и приводит к изменениям амплитуды ЭМС. Результаты проведенного эксперимента с контактом двух кристаллов кварца и горной породы сиенита указывают на механизм, который на границах прожилков в природных образцах и в натурных условиях на контактах горных пород определяет возрастание амплитуды ЭМС.

В модельной трехслойной системе с прослойкой из ПММА акустический импеданс кварца почти в 5 раз больше чем у оргстекла. На рисунке 9а приведены изменения максимальной амплитуды ЭМС при акустическом возбуждении модельной системы кварцев со вставкой из ПММА толщиной $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Погрешность измерения амплитуд ЭМС и акустического импульса возбуждения не превышала 2%.

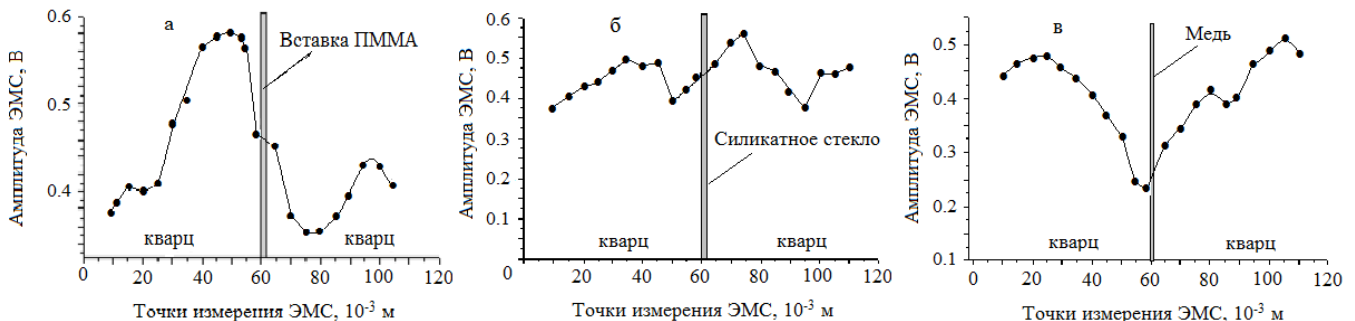


Рисунок 9 – Изменения максимальной амплитуды ЭМС при акустическом возбуждении системы кварцев: *а* – с ПММА толщиной $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; *б* – со стеклом толщиной $2.1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; *в* – с медью толщиной $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Начало координат по оси абсцисс соответствует положению точечных принимающих пластинок электромагнитного датчика от поверхности образца, через

которую вводился акустический импульс. На рисунке 9а видно, что за вставкой из ПММА амплитуда ЭМС уменьшается. Это хорошо согласуется с результатами модельных расчетов изменения механических колебаний до и после вставки из ПММА. После слоя ПММА в спектре преобладают низкочастотные составляющие спектра ЭМС и АС. На рисунке 9б показаны изменения максимальной амплитуды ЭМС из трехслойной системы со вставкой между кристаллами кварца из силикатного стекла, акустический импеданс которого $z_{ст}$ близок к z_k кварца. На рисунке 9в приведены данные изменений амплитуды ЭМС из такой же системы со вставкой из отожженной меди с акустическим импедансом z_m , который примерно в 3 раза больше z_k .

Для определения влияния на амплитудные параметры ЭМС количества слоев в горных породах были проведены экспериментальные исследования на образцах серпентинита, имеющих полосчатую текстуру из хризотил-асбеста и серпентина. Толщины слоев хризотил-асбеста составляла $(1-1.5) \cdot 10^{-3}$ м, а слоев серпентина – $(2-4) \cdot 10^{-3}$ м. Минерал хризотил-асбеста имел поперечно-волоконистый тип расположения волокон, при котором волокна направлены по нормали к плоскости слоя. Длительность импульса акустического возбуждения составляла 10^{-5} с. При этом следует отметить, что серпентинит, в силу хорошей электризации, обладает высокими амплитудами ЭМС при акустическом воздействии. Так в исследуемом образце максимальные амплитуды ЭМС достигали значений 5 В. Это в 4-5 раз меньше, чем из аналогичного по размерам кристаллического кварца.

Для подтверждения предположения о существенном влиянии полосчатой структуры образца серпентинита на параметры ЭМС исследовались в такой же геометрии образцы хризотил - асбеста и серпентина. Измерения показали, что амплитуда ЭМС из образцов хризотил - асбеста и серпентина на порядок меньше чем из серпентинита, а ее величина не превышает значений 0.2 В. В спектре ЭМС преобладают низкие частоты, но основные полосы частот в районе (20-40) кГц и (40-60) кГц сохраняются. Полосчатая текстура серпентинита приводит к появлению разности зарядового состояния на границах минералов, и при акустическом воздействии резко возрастает амплитуда ЭМС. Такие изменения амплитуды ЭМС вызваны созданием множественных двойных электрических слоев на границах минералов серпентина и хризотил - асбеста. На рисунке 10 приведены изменения максимальной амплитуды ЭМС при уменьшении количества слоев хризотил - асбеста и серпентина. Свой вклад в величину амплитуды ЭМС вносит простираание слоев контактирующих минералов и ориентация слоистости хризотил - асбеста относительно акустического возбуждения. Подтверждением влияния слоистой текстуры на амплитуду ЭМС при акустическом возбуждении получено при дальнейших исследованиях на образце полосчатого серпентинита. В процессе эксперимента часть слоев последовательно убиралась, производилось возбуждение акустическим импульсом с одинаковыми параметрами. Запись ЭМС осуществлялась у одной и той же боковой поверхности образца. При исследовании многослойного образца серпентинита был получен еще один важный результат. Регистрируемые в экспериментах электромагнитные и акустические сигналы имели вид затухающих колебательных процессов. В связи с этим, интерпретация результатов измерений производилась по колебательному механизму. При реализации этого механизма основные частоты должны определяться линейными размерами механических осцилляторов.

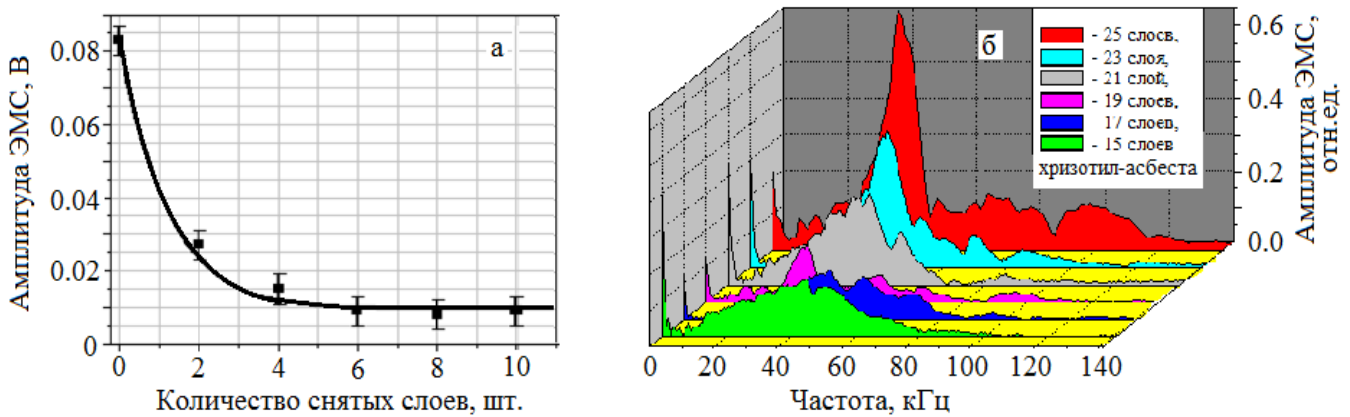


Рисунок 10 – Изменения максимальной амплитуды (а) и спектрального распределения (б) электромагнитных сигналов из полосчатого серпентинита при уменьшении количества слоев хризотил-асбеста при детерминированном акустическом возбуждении

В образцах полосчатого серпентинита такими осцилляторами служат размеры образца, толщина слоев хризотил - асбеста или серпентина и трещин. Математические расчеты и проведенные эксперименты на образцах полосчатого серпентинита и слоистого алевролита подтвердили предположения о вкладе возникающих биений в частотный спектр электромагнитных откликов слоистых горных пород. При этом набор частот может определяться как размерами структурно-текстурных неоднородностей, так и разностью скоростей акустических импульсов в них.

В выработках Таштагольского рудника наблюдается обводненность и повышенная влажность пола и бортов некоторых выработок и забоев. Экспериментальное моделирование показано, что при акустическом возбуждении контакта высокоомной горной породы на примере системы «микродиорит – минерализованная вода» генерируемые ЭМС имеют параметры, изменяющиеся с увеличением концентрации $NaCl$ в дистиллированной воде. Эти изменения носят двойственный характер. Так, с одной стороны, амплитудно-частотные параметры ЭМС определяются удельным электрическим сопротивлением водного раствора $NaCl$, что приводит к уменьшению амплитуды с увеличением концентрации соли. С другой стороны, увеличение концентрации $NaCl$ в солевом растворе приводит к расширению частотного спектра ЭМС. С повышением концентрации контактирующего раствора $NaCl$ появляются высокочастотные полосы с линейно возрастающими амплитудами. Показано также влияние величины приложенного электрического поля на параметры ЭМС из системы «микродиорит – минерализованная вода». При возрастании напряженности электрического поля от 10^2 В/м до $2.5 \cdot 10^2$ В/м пропорционально увеличивается амплитуды ЭМС и его основных спектральных полос.

В процессе исследований были выявлены также закономерности изменений параметров ЭМС реальных образцов горных пород при акустическом возбуждении. Горные породы в рудниках и шахтах при изменении напряженного состояния в результате добычи полезных ископаемых всегда находятся в возбужденном и неустойчивом состоянии. Поэтому породные массивы стремятся занять энергетически выгодное положение. При этом происходят трещинообразование и смещения масс горных пород, которые сопровождаются акустическими импульсами разной длительности и частоты. Взаимодействие акустических сигналов с двойными электрическими слоями на контактах дефектов, слоев и блоков и сопровождается электромагнитными сигналами. Поэтому при разработке методов и средств мониторин-

га изменения напряженно-деформированного состояния массива и краткосрочного прогноза развития геодинамических событий по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии необходимы знания основных закономерностей изменения этих параметров и характеристик при акустическом воздействии на реальные горные породы. При исследованиях на образцах необходимо учитывать неоднородности горных пород, являющиеся их фундаментальным свойством. К ним относятся как неоднородности состава пород в пределах образца, различие в химическом и минеральном составе, в форме и размерах зерен, а также неоднородности в виде включений, пор и микротрещин, так и неоднородности реальных кристаллов в виде дефектов кристаллической решетки. В реальных образцах горных пород даже изготовленных из одного керна содержатся все перечисленные выше неоднородности, которые являются либо сами источниками зарядов, либо местами концентрации зарядов. При акустическом колебании зарядов электрическое поле вокруг них изменяется в соответствии с этим воздействием и происходит переход механической энергии в электромагнитную.

Для сравнения были выбраны образцы группы скарнов (S1, S2, S3), имеющих высокое удельное электрическое сопротивление ρ_{sc} в пределах 10^3 - 10^4 Ом·м, и образцы группы магнетитовой руды (M1, M2, M3, M4) с удельным сопротивлением 10 - 10^2 Ом·м. Размеры образцов были одинаковыми: диаметр составлял $(42 \pm 1) \cdot 10^{-3}$ м, а длина вдоль оси цилиндра соответствовала $(80 \pm 2) \cdot 10^{-3}$ м. Количество магнетита в каждом образце приведено в Таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики образцов скарна и магнетитовой руды

Образцы	Предельная прочность, $R_{пред}$, кН	Удельное электрическое сопротивление, ρ , Ом·м	Удельный вес, σ , 10^3 кг/м ³	Содержание магнетита, %	Амплитуда ЭМС на частоте 65 кГц, В
Скарны					
S1	188	$4.5 \cdot 10^3$	2.9	0	$135 \cdot 10^{-3}$
S2	234	$5.1 \cdot 10^3$	3.1	0	$40 \cdot 10^{-3}$
S3	320	$4.8 \cdot 10^3$	2.8	0	$8 \cdot 10^{-3}$
Руда					
M1	234	16	3.4	11.7 ± 1	$800 \cdot 10^{-6}$
M2	193	17	3.4	11.7 ± 1	$350 \cdot 10^{-6}$
M3	317	19	3.7	18.9 ± 1	$12 \cdot 10^{-6}$
M4	258	21	3.8	21.05 ± 1	$3 \cdot 10^{-6}$

В этой же таблице представлена предельная прочность исследуемых образцов при одноосном сжатии. В результате экспериментальных исследований установлено понижение амплитуды ЭМС скарна в 2.5 раза при изменении длительности акустического импульса возбуждения $5 \cdot 10^{-6}$ с до 10^{-5} с. Экспериментально установлена связь предельной прочности диэлектрических горных пород с амплитудой ЭМС. Так на образцах скарна, имеющих близкий минеральный состав, наблюдается увеличение максимальных амплитуд спектральных составляющих ЭМС при уменьшении их предельной прочности. Это обстоятельство указывает на влияние размеров включений и слоев, а также наличие трещин в ослабленных по прочности образцах, на границах которых имеются двойные электрические слои.

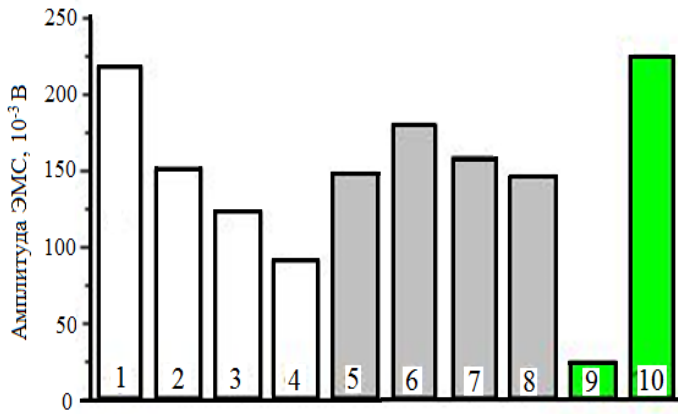


Рисунок 11 – Максимальные амплитуды электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом возбуждении горных пород:

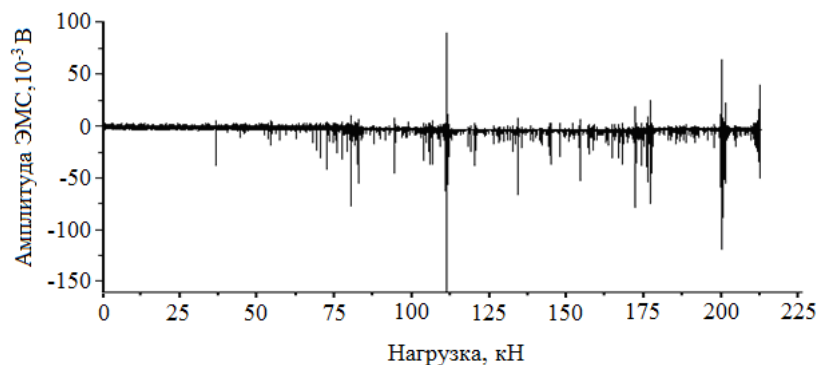
1 – скарн эпидотовый; 2 – скарн эпидот-гранатовый; 3 – скарн с включения пирита и магнетита; 4 – скарн гранат-магнетитовый; 5 – сиенит; 6 – микросиенит; 7 – метаморфический сланец; 8 – диоритовый порфирит; 9 – магнетитовая руда; 10 – магнетитовая руда с трещиной, залеченной кварцем

За счет количества и протяженности двойных электрических слоев в разных по прочности диэлектрических горных породах даже одного минерального состава эти неоднородности способствуют переходу механической энергии в энергию электромагнитного поля и, соответственно, в энергию электромагнитных откликов на акустическое воздействие. Показано, что увеличение удельного электрического сопротивления на 10% приводит к снижению амплитуды спектральных составляющих ЭМС почти в 4 раза. Для образцов магнетитовой руды прямой зависимости амплитуды спектральных составляющих ЭМС от предельной прочности не выявлено. Малое удельное электрическое сопротивление

магнетитовой руды существенно понижает накопление зарядов на двойных электрических слоях, что и приводит к снижению амплитуды ЭМС в руде. На рисунке 11 показано, что амплитудные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной связи с удельным электрическим сопротивлением горных пород. Малое удельное электрическое сопротивление магнетитовой руды существенно понижает накопление зарядов на двойных электрических слоях, что и приводит к снижению амплитуды ЭМС в руде. При этом в образце магнетитовой руды с 10% содержанием кварца почти в 10 раз повышается амплитуда ЭМС. Кроме того, анализ параметров ЭМС показал, что присутствие в образцах вмещающих диэлектрических пород высокопроводящего минерала магнетита приводит к снижению амплитуды в 1,5-2 раза. Эта связь обусловлена главным образом структурно-текстурным строением породы. Если между высокопроводящими минералами, такими как магнетит, в породе с высоким удельным электрическим сопротивлением нет непосредственных контактов, и они находятся в ней в виде изолированных друг от друга включений, то проводящие включения не оказывают заметного влияния на сопротивление породы и параметры ЭМС даже при очень высокой их концентрации. В дальнейшем в работе приведены результаты исследований изменения параметров и характеристик электромагнитной эмиссии образцов горных пород при нагружении одноосным сжатием до разрушения. Известно, что процесс разрушения твердых тел, в том числе горных пород, характеризуется определенной временной продолжительностью и поэтапным развитием. Поскольку реальные образцы горных пород состоят из структурных элементов и минералов, имеющих разную прочность, то и деформация при механическом воздействии будет неоднородной. Неоднородность деформации и разная прочность структурных элементов уже на начальном этапе механического нагружения приводит к повреждениям наименее прочных минералов в объеме горной породы. Кроме того, повреждения в виде микротрещин могут образовываться также на контактах минера-

лов и горных пород, на границах изолированных включений и пор. Поскольку возникающие внутренние напряжения через механоэлектрические преобразования обуславливают электромагнитную эмиссию, то это также влечет пространственное и временное распределение электромагнитных предвестников. В результате при деформировании изменяются параметры регистрируемых электромагнитных сигналов. Такие изменения ЭМЭ служат прогностическими признаками возникновения и развития деструктивных зон в материалах. При проведении исследований использовались образцы вмещающей горной породы Таштагольского железорудного месторождения, представленные сиенитами, скарнами и диоритами, образцы кварцсодержащего диабаз, а также образцы руды с разным содержанием магнетита. На рисунке 12 приведена осциллограмма изменения амплитуды ЭМС в процессе одноосного сжатия диабаз. В качестве приемника использовали емкостный датчик. Скорость нарастания сжимающих усилий составляла $(0,30 \pm 0,03)$ кН/с. На рисунке видно, что на протяжении всего цикла сжатия изменяется амплитуда ЭМС, причем в зависимости от этапа нагружения происходит либо увеличение амплитуды, либо ее уменьшение. Наряду с амплитудой изменяется и частота следования ЭМС. Анализ амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов на значимых частотах 100 кГц, 300 кГц и 800 кГц во всем диапазоне изменения НДС образца показал, что максимальные амплитуды выбранных частот различны при нарастании относительной нагрузки.

Относительная нагрузка, записываемая как $P/P_{пред}$, – это отношение текущей нагрузки P к предельной $P_{пред}$, при которой образец разрушается. На рисунках 13а,б



показаны изменения максимальных амплитуд выбранных частотных полос от нарастания отношения $P/P_{пред}$. Анализ электромагнитной эмиссии при одноосном сжатии образцов горных пород позволил определить закономерные изменения амплитудно-

частотных параметров сигналов. Эти изменения характеризуют этапы уплотнения, формирования очага разрушения, предшествующие разрушению и непосредственное разрушение. В спектре ЭМС всегда имеются частотные полосы характерные для разных этапов подготовки и развития разрушения образцов, связанных с размерами образующихся трещин. На рисунке 14 приведены типичные изменения усредненных за одну секунду амплитуд ЭМС в интервале частот (1-100) кГц, зарегистрированные при деформировании образца вмещающей горной породы скарна (рисунок 14а) на разных этапах формирования очагов разрушения и предшествующего фактическому его разрушению. На рисунке 14б приведены изменения усредненных за такое же время на этапах развития разрушения амплитуд ЭМС руды с 55% содержанием кальцита в интервале частот с добротностью не более 8 и с центральной частотой 100 кГц. На начальном этапе формирования очага разрушения частота

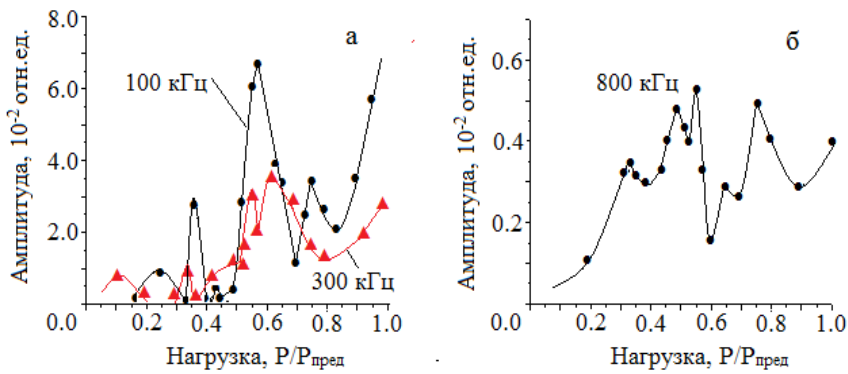


Рисунок 13 – Изменения максимальных амплитуд частотных полос электромагнитных сигналов при нарастании относительной нагрузки образца диабазы: а – 100 кГц и 300 кГц, б – 800 кГц

очага разрушения, предшествующие разрушению и непосредственное разрушение. В спектре ЭМС всегда имеются частотные полосы характерные для разных этапов подготовки и развития разрушения образцов, связанных с размерами образующихся трещин.

ЭМС более высокая (рисунок 15а), чем на этапе предшествующего разрушению образца (рисунок 15б).

Таким образом, анализ электромагнитной эмиссии при одноосном сжатии образцов горных пород позволил определить закономерные изменения амплитудно-частотных параметров сигналов, связанных с этапами уплотнения, формирования

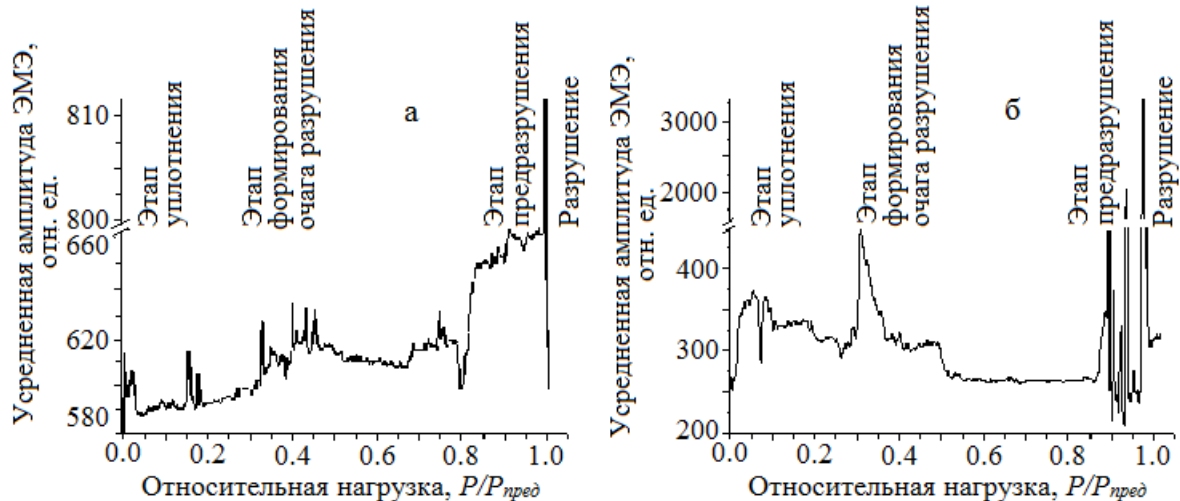


Рисунок 14 – Изменение усредненных за одну секунду амплитуд электромагнитной эмиссии образца вмещающей породы в широкой полосе частот (1–100) кГц (а) и образца руды с 55% содержанием кальцита в полосе с центральной частотой 100 кГц (б).

Кроме того, на всех этапах из-за близости возникающих трещин или из-за структурно-текстурных особенностей горной породы возможно появление сигналов, обусловленных бие-

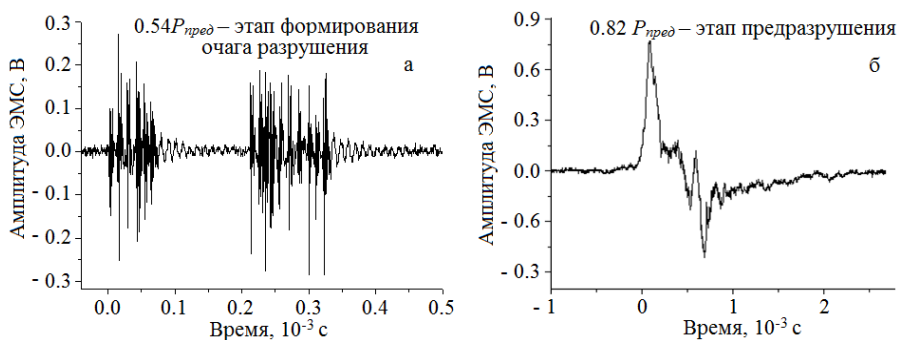


Рисунок 15 – Типичные осциллограммы электромагнитных сигналов, зарегистрированные на этапах деформирования образцов вмещающей горной породы: а - $0,54P_{разр}$, формирования очага разрушения; б - $0,82P_{разр}$, этап предшествующий разрушению.

лов, обусловленных бие-нием. При приближении к разрушению образца всегда происходит смещение спектральных составляющих в область низких частот и возрастание амплитуды спектральных полос ЭМС. Полученные закономерности изменения амплитудно-частотных

параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ горных пород могут быть успешно использованы для мониторинга и краткосрочного прогноза развития деструктивных зон и геодинамических событий в породных массивах. Параметры амплитуды, частотного спектра, интенсивности импульсного потока электромагнитных сигналов, несут информацию о характеристиках воздействующих на гетерогенные материалы акустических импульсах и, как следствие, несут информацию о процессах подготовки и развития разрушения этих материалов. Диапазон амплитуд ЭМС, излучаемых горными породами Таштагольского рудника при импульсном акустическом воздействии, лежит в интервале от первых десятков микровольт до единиц вольт, частотный спектр – в интервале от единиц герц до единиц мегагерц, но наиболее значимыми являются частоты $1 \div 80$ кГц, которые определяются блочностью породного массива. Изменение интенсивности импульсного потока ЭМС должно характеризовать развитие процессов подготовки разрушения горных пород или других гетерогенных материалов. Надо также учитывать, что наибольшие по амплитуде сигналы с частотами, находящимися в мегагерцовом диапазоне, связаны с разрядным механизмом генерации ЭМС в растущих трещинах.

В процессе исследования разрушения образцов горных пород установлена связь токов поляризации и характеристик электромагнитной эмиссии. Показано, что характеристики ЭМЭ существенно зависят от проводимости горной породы. Присутствие в образцах горной породы минералов с низким удельным сопротивлением оказывает существенное влияние на эффективность механоэлектрических преобразований и, соответственно, приводит к снижению амплитуды ЭМЭ. Показано, что амплитуда и интенсивность ЭМЭ диэлектрических вмещающих горных пород и магнетитовой руды при нагружении одноосным сжатием коррелируют с токами поляризации на всех этапах возникновения деструктивных зон и их развития, включая и этап уплотнения. Процессы изменения знака поляризационных токов в магнетитовой руде, вероятно, обусловлены совокупным влиянием возникающего электрического поля за счет роста трещин, движения дислокаций и точечных дефектов и изменением направлений ориентации магнитных диполей.

Известно, что в процессе развития деструктивных зон в образцах горных пород происходит эмиссия микрочастиц, которые переносят заряд и могут участвовать в генерации электромагнитных сигналов. С помощью спектрометра твердотельных микрочастиц APS 3321 параллельно с ЭМЭ было измерено количество отслоившихся частиц размером от $5 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-6}$ м, эмитируемых в процессе одноосного сжатия или сдвига. Экспериментальные исследования показали, что основная масса частиц появляется накануне и в момент разрушения образца. В тоже время электромагнитная эмиссия появляется на всех этапах нагружения. Таким образом, экспериментально показано, что при развитии деструктивных зон происходит эмиссия отслоившихся микрочастиц, которые могут участвовать в генерации электромагнитных сигналов на стадиях предшествующих прорастанию трещин и в момент разрушения образцов горных пород, а, следовательно, при таких же процессах и в породном массиве.

Для исследования изменений напряженно-деформированного состояния горных пород измерялось инфракрасное свечение горных пород. Предварительные исследования показали эффективность использования этого метода для поиска мест с повышенным НДС участков породного массива. Это выражается в увели-

чении температуры в окрестностях контрольных или разгрузочных скважин. При проведении исследований исходили из того, что за ИК свечение скважин ответственные физические процессы, протекающие в горных породах при изменении их НДС. Образцы изготавливались из горных пород Таштагольского месторождения с размерами в диаметре $42 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $80 \cdot 10^{-3}$ м. Исследовались образцы сиенита и железной руды с разным содержанием магнетита. В исследуемых образцах создавался искусственный дефект в виде отверстия диаметром $7 \cdot 10^{-3}$ м. Ось отверстия располагалась посередине продольной части образца и имела протяженность $25 \cdot 10^{-3}$ м. Образцы подвергались одноосному сдвиговому нагружению на стенде с прессом ИП-500. Для записи термограмм в лабораторных условиях использовался тепловизор NEC TN9100. В экспериментах осуществлялась непрерывная запись развития разрушения образца и его ИК излучение в диапазоне 8–14 мкм. Продолжительность съемки – 200 секунд. Чувствительность тепловизора составляла не менее $0,04^\circ \text{C}$. Для примера на рисунке 16 показаны изменения ИК свечения в образце магнетитовой руды с включениями кальцита.

Полученные в лабораторных модельных экспериментах результаты измерений показывают зависимость ИК свечения отверстия и его окрестностей от этапов подготовки и развития разрушения. Первый диапазон ИК свечения соответствует зоне уплотнения образца, а два последующих диапазона изменяющихся температур характеризуют этапы образование зон деструкции в образце.

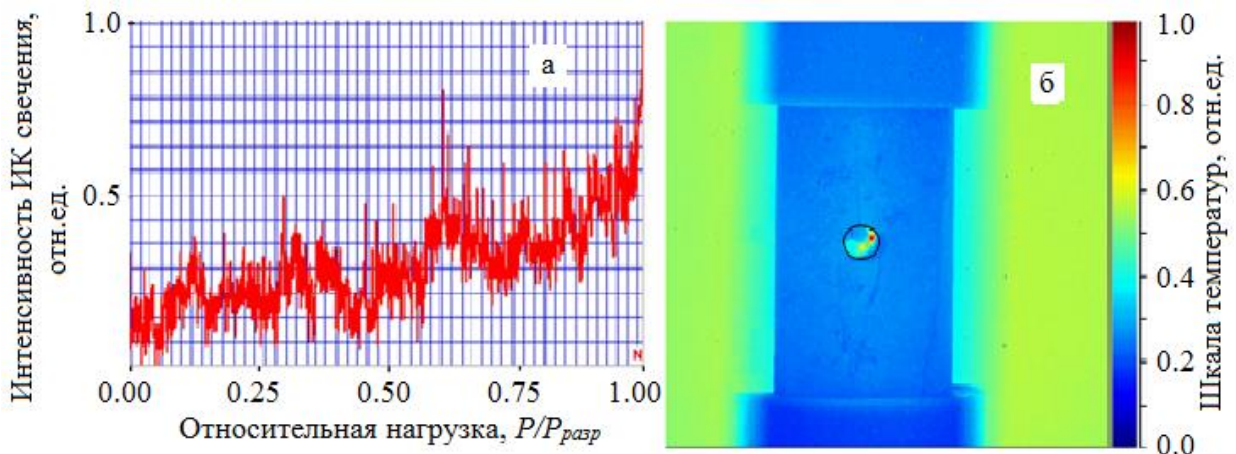


Рисунок 16 – Изменения ИК свечения в образце магнетитовой руды с включениями кальцита: а – изменение ИК свечения края и центра отверстия; б – свечение отверстия при одноосном нагружении сдвигом

Причем первый из них обусловлен образованием трещин в кальците, который характеризуется модулем Юнга $E = 20 \cdot 10^6$ Па, а второй обусловлен образованием трещин в магнетите, у которого $E = (120–140) \cdot 10^6$ Па. Четвертый же диапазон характеризует этап образование и развитие трещин отрыва. Подобные закономерности наблюдаются и при измерении электромагнитной эмиссии в диапазоне частот от 1.0 до 100.0 кГц в процессе нагружения до разрушающих значений образцов магнетитовой руды и вмещающих пород. Рассмотрены возможные механизмы подведения энергии для разогрева горных пород в окрестностях отверстий: термоупругий эффект, связанный с упругими деформациями; высвобождение энергии при раскрытии трещин и не использующейся на дальнейшее их развитие; свечение наночастиц, отслаивающихся от породы при силовом нагружении.

В результате исследований установлено, что инфракрасное свечение отверстий отображает процесс подготовки разрушения горных пород и его свершение. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию для определения этапов разрушения образцов горных пород и других твердотельных материалов, в том числе со сложной структурой. В слоистых и перемешанных двух и более компонентных твердотельных материалах появляется возможность выявления пороговых значений деструкции составляющих компонент при наложении различных типов силовой нагрузки. Кроме того, ИК термографию можно успешно применять для выявления напряженных участков массива горных пород. Полученные в четвертой главе результаты исследования являются основой для построения феноменологической схемы генерации и определения параметров электромагнитных сигналов, а также для создания информационной системы мониторинга при возникновении деструктивных зон и развитии разрушения горных пород в процессе изменения их НДС по параметрам и характеристикам ЭМЭ.

В главе 5 представлены результаты экспериментальных исследований электромагнитной эмиссии массива горных пород в шахте Таштагольского месторождения. Эти исследования важны для разработки метода мониторинга и краткосрочного прогноза изменений НДС горных пород в естественном их залегании. Первоначально необходимо было смоделировать интенсивные изменения НДС, сравнимые по энергии с опасными геодинамическими проявлениями, и исследовать параметры и характеристики электромагнитной эмиссии породного массива до и после этих событий. Использовать в качестве модельных естественные геодинамические явления не целесообразно, так как они до свершения события не определены ни во времени, ни в пространстве и могут иметь разброс в десятки и сотни километров, а по времени период проявления событий может достигать годовых значений. Моделирование возникновения и развития деструктивных зон до проявления геодинамических явлений в массиве горных пород возможно в условиях шахт при воздействиях взрывами. В этом случае развитие деструктивных процессов сжато во времени и определено пространством шахты. Кроме того, в шахтных условиях на больших глубинах исключается влияние атмосферного электричества. Технологические взрывы от десятков килограмм до 300 тонн проводились при добыче руды на Таштагольском железорудном месторождении (г. Таштагол, Кемеровская обл.) на глубинах (520–800) м. При этом возникают геодинамические события с энергией до 10^9 Дж, в том числе и горные удары. Причем проявления геодинамических событий могут происходить сразу после технологических взрывов, а также через определенный промежуток времени, что особенно опасно при ведении работ в шахте. Динамика массива может проявляться при малых технологических взрывах, являющихся спусковым элементом при определенных условиях накопления энергии в массиве, и при ведении очистных работ в процессе добычи руды. В связи с этим все ниже приведенные исследования электромагнитной эмиссии проводились в основном в шахте Таштагольского месторождения, сложенного прочными горными породами.

В результате исследований было установлено, что изменения НДС массива горных пород вследствие механоэлектрических преобразований всегда сопровождаются импульсными электромагнитными сигналами и электромагнитной эмиссией. При этом параметры и характеристики ЭМЭ определяются механическими, ди-

электрическими и магнитными свойствами горных пород, а также зависят от энергии события на всех этапах его развития. Было установлено, что атмосферное электричество не оказывает влияния на суточный ход электромагнитной эмиссии массива горных пород в рудных шахтах глубиной более 300 метров. Для уверенного и надежного приема ЭМС первоначально разрабатывались методы определения мест установки регистраторов типа РЭМС1 и РЭМАС1 (глава 3)

Сначала был использован метод электромагнитного профилирования, который раньше применялся на дневной поверхности Земли и основывался на измерении локальных постоянных электрических полей в горных породах. Наблюдения изменений интенсивности ЭМЭ в режиме электромагнитного профилирования проводились на протяжении шести лет по одному разу в год в орте 2 горизонта минус 210 на глубине 660 метров от дневной поверхности. Место профилирования было выбрано исходя из того, что с этого горизонта в Таштагольском руднике начали проявляться горные удары большой интенсивности. Целью профилирования было выявление мест и условий наибольшей электромагнитной активности в шахтном поле Таштагольского месторождения. Исследования показали, что преимущественной эмиссионной электромагнитной способностью обладают контакты горных пород на залеченных дайках и трещинах меньшего размера. Это согласуется с результатами лабораторных исследований двойных, тройных и множественных слоистых систем, приведенных в главе 4. Из-за изменения параметров ЭМЭ во времени отклонения усредненных за одну секунду амплитуд ЭМС при профилировании находилась в пределах 20%. Распространение нарушений в зону проведения взрывных и очистных работ позволило эффективно изучать развитие геодинамических событий. Таким образом, мониторинг изменения напряженно-деформированного состояния массивов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии наиболее предпочтительно вести на дайках и контактах пород, имеющих выход на разломы, зоны смещения и смятия, а также в места проведения технологических взрывов.

В качестве еще одного метода для выявления напряженных мест в массиве была привлечена ИК радиометрия скважин и их близлежащих окрестностей. В главе 4 приведены изменения ИК свечения отверстий и их окрестностей при развитии разрушения образцов горных пород. Это явление также, как и электромагнитное профилирование, использовалось при выборе мест установки электромагнитных регистраторов типа РЭМС1 и РЭМАС1 для мониторинга изменений НДС массива горных пород по параметрам и характеристикам ЭМЭ. Замеры температуры ИК свечения поверхности, контактов горных пород, а также в скважинах разного назначения проводили с использованием тепловизора IRISYS IRI 4010B в диапазоне длин волн $(8-14) \cdot 10^{-6}$ м. Порог его температурной чувствительности составлял не менее 0.15°C . Тепловизор обеспечивал измерение температуры от минус 10°C до плюс 250°C . На рисунке 17 показано ИК свечение разгрузочных скважин и их окрестностей в орте 11 горизонта минус 350 (глубина 800 м) Таштагольского рудника, а также приведен снимок ИК свечения в скважине на глубине около 12 м, пробуренной более 30 дней перед съемкой. По данным анализа состава кернов, исследованных ранее при бурении, на этой глубине находится контакт магнетитовой руды и сланцев. Многократные исследования показали, что повышенная температура свечения скважин всегда наблюдалось в местах массива горных

пород, находящихся под нагрузкой, вызванной технологическими взрывами, особенностями отработки рудного тела, при проходке ортов и штреков, вблизи зон обрушения, сдвижения и т.д.

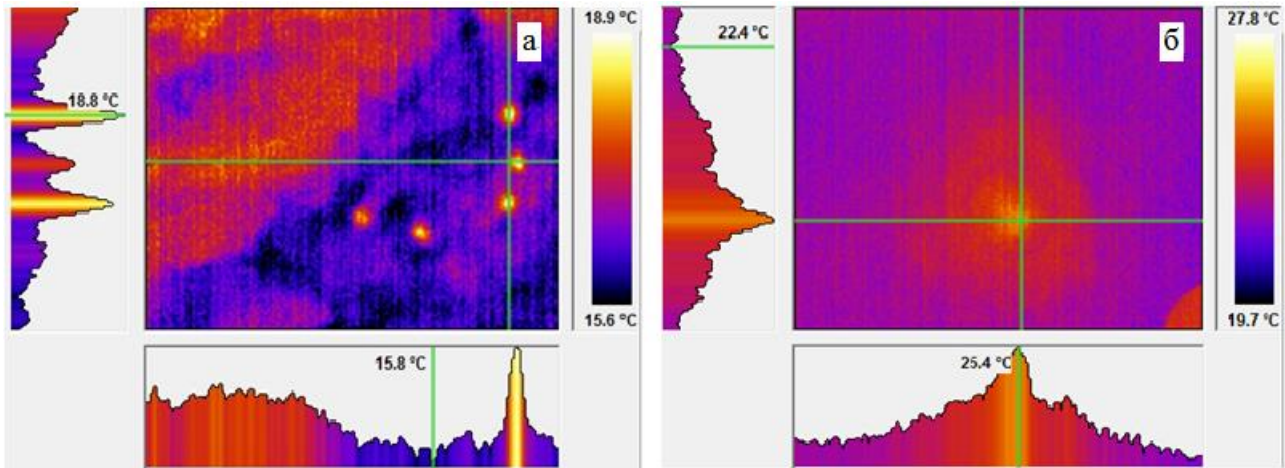


Рисунок 17 – Инфракрасное свечение поверхности забоя с разгрузочными скважинами диаметром $105 \cdot 10^{-3}$ м орта 11 горизонта минус 350 (глубина 800 м) Таштагольского рудника после выдержки в течение 7 суток после бурения (а); ИК свечение контакта магнетитовой руды и сланцев в скважине на глубине 12 м (б)

Таким образом, инфракрасное свечение скважин отображает процесс подготовки разрушения в определенном напряженно-деформированном объеме породного массива. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию, наряду с электромагнитным профилированием для определения мест с высоким значением НДС массива горных пород. Выявление участков породного массива с помощью электромагнитного профилирования или ИК радиометрии скважин и их окрестностей, находящихся в повышенном НДС, позволит существенно снизить количество используемых регистраторов электромагнитных сигналов и повысит эффективность прогноза развития и проявления геодинамических событий.

В дальнейшем для отработки метода мониторинга и прогноза геодинамических проявлений в руднике представлены результаты исследований изменения характеристик ЭМЭ до проведения массовых или технологических взрывов, в момент взрыва и в период релаксации породного массива после взрывного воздействия. Как показали лабораторные и натурные исследования физической основой использования электромагнитного метода для мониторинга образования деструктивных зон и развития геодинамических событий являются закономерности изменения энергетических, амплитудно-частотных, временных и других параметров электромагнитных сигналов в зависимости от НДС горных пород и их физических свойств. В шахте Таштагольского месторождения в ходе экспедиционных работ более 50 раз были проведены четырех и пятисуточные измерения ЭМЭ и АЭ. На рисунке 18 приведен типичный пример записи изменений параметров электромагнитной и акустической эмиссий во времени на различных каналах регистратора РЭМС1 в шахтном поле Таштагольского рудника (МВ – момент взрыва, ГУ – горный удар). На 5 каналах наблюдаются отличия характеристик ЭМЭ. В относительных единицах показаны временные изменения характеристик электромагнитной эмиссии в полосах с центральными частотами 2, 15, 100 кГц и в широкой полосе частот (1-100) кГц, а также интенсивность (счет) импульсного потока ЭМЭ массива горных

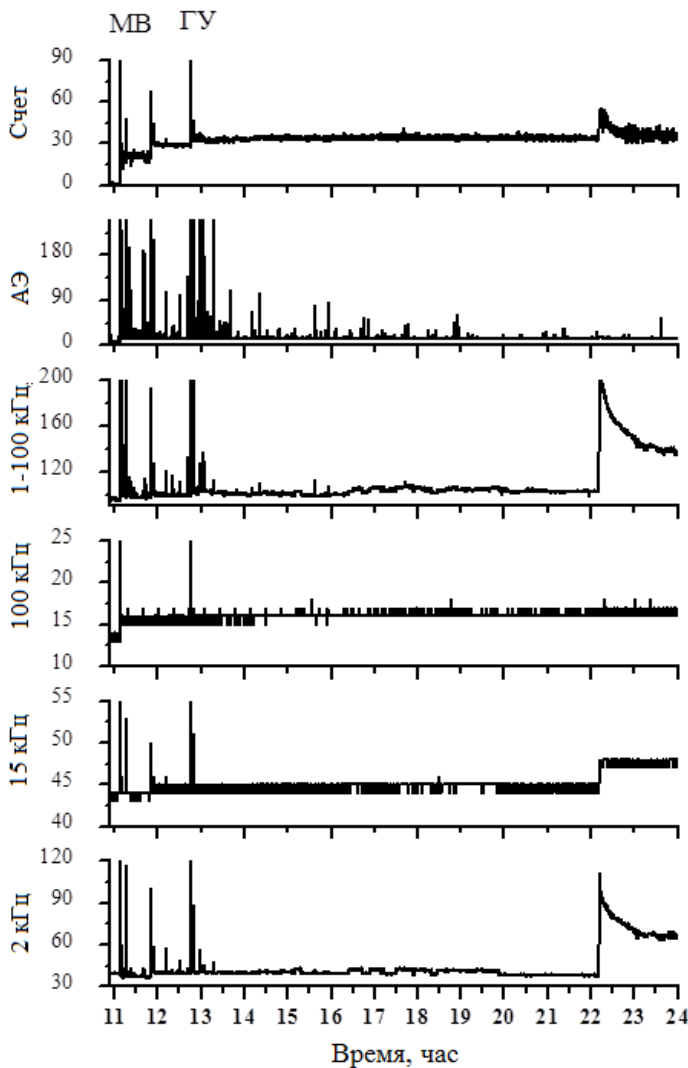


Рисунок 18 – Типичный пример записи в относительных единицах изменений параметров электромагнитной и акустической эмиссий во времени на различных каналах регистратора РЭМС1 в шахтном поле Таштагольского рудника

взрыва в ЮЗ направлении. Развертка во времени изменения интенсивности потока ЭМС по индукционной составляющей показала, что возбужденное состояние массива после горного удара продолжалось в течение 4 минут с последующим ее снижением до значений интенсивности ЭМЭ перед взрывом. После такой частичной релаксации механических напряжений в массиве стало проявляться новое нарастание возбуждения НДС, которое сопровождалось полуторачасовым повышением среднего уровня интенсивности ЭМЭ. Анализ хода интенсивности ЭМЭ показал, что время нахождения массива в таком состоянии продолжалось около 17 часов, с возвратом в течение часа состояния НДС на новый уровень. Возбуждения механических напряжений такого вида характерны при сдвигении больших масс породы по активным разломам в массиве Таштагольского рудника. Таким образом, в процессе исследований характеристик ЭМЭ было выявлено 3 основных временных процессов изменения НДС массива после взрыва, которые проходят в течение секунд, минут и часов.

пород и изменения характеристик акустической эмиссии. Время усреднения данных мониторинга ЭМЭ и АЭ в регистраторе устанавливалось 5 с.

Такая разница во временном ходе ЭМЭ обусловлена изменением спектра и амплитуды электромагнитных сигналов из массива пород. Подобные же отличия характеристик ЭМЭ наблюдались и при развитии разрушения образцов горных пород на прессе. На рисунке 19 приведены 48 часовые изменения интенсивности импульсного потока ЭМЭ в руде до проведения технологического взрыва блока №11 между горизонтами минус 210 и минус 280с зарядкой ВВ 285 тонн, во время его осуществления (МВ) и в период релаксации напряженного состояния массива с прохождением горного удара (ГУ) с энергией $1.1 \cdot 10^8$ Дж через пятьдесят секунд после взрыва. На рисунке отображены практически все возможные изменения характеристик ЭМЭ, связанные с вариациями НДС массива. По данным Таштагольской сейсмической станции горный удар был определен на глубине минус 690 метров от дневной поверхности и по горизонтали в юго-западном направлении в 50 метрах от

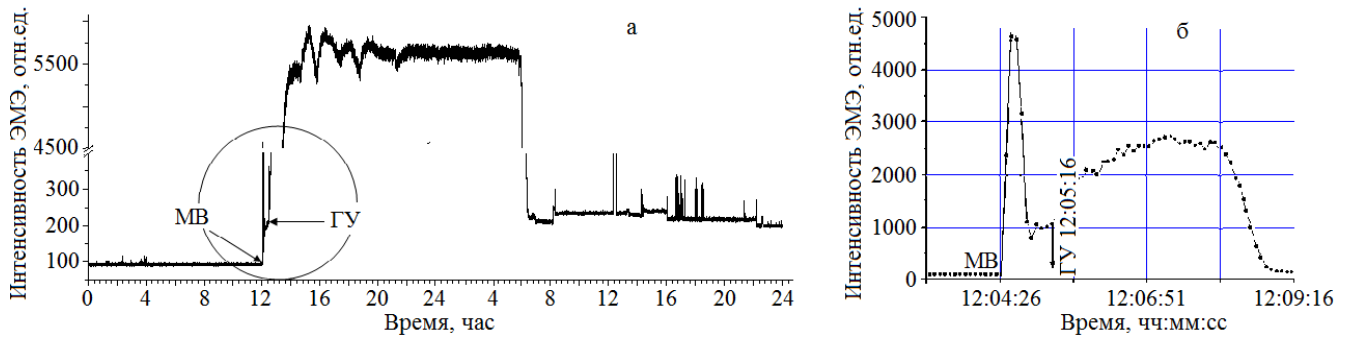


Рисунок 19 – Изменения интенсивности импульсного потока электромагнитной эмиссии: а - в течение 48 часов до технологического взрыва блока №11 между горизонтами минус 210 и минус 280, во время его осуществления (МВ); б – в период релаксации напряженного состояния массива с прохождением горного удара (ГУ).

В процессе измерения характеристик ЭМЭ оценивались информационные возможности двух типов датчиков для регистрации емкостной и индукционной составляющих электромагнитного поля в период динамического изменения НДС массива горных пород. Было установлено, что индукционные датчики наиболее эффективны при регистрации ЭМЭ из руды или пород, имеющих включения магнетитовой руды. Емкостные датчики можно применять на любых участках шахтного поля, так как магнетитовая руда всегда имеет включения пород с высоким удельным сопротивлением.

На рисунке 20 представлена еще одна характерная запись ЭМЭ, связанная с вариациями НДС массива после технологического взрыва. Масса заложенного для взрыва ВВ составляла 200 тонн. Приборы РЭМС1 с индукционными датчиками устанавливались на горизонта минус 210 в орте 2. Датчики для измерений характеристик ЭМЭ и АЭ размещали в месте контакта породного массива с дайкой, простирающейся в область взрыва. Регистрировались данные по всем 6 каналам с усреднением данных за 5 секунд: интенсивность потока ЭМС; акустическая эмиссия; амплитуда ЭМЭ на широкой полосе частот (1-100) кГц; амплитуды ЭМЭ в полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц. Регистрировались данные по всем 6 каналам с усреднением данных за 5 секунд: интенсивность потока ЭМС; акусти-

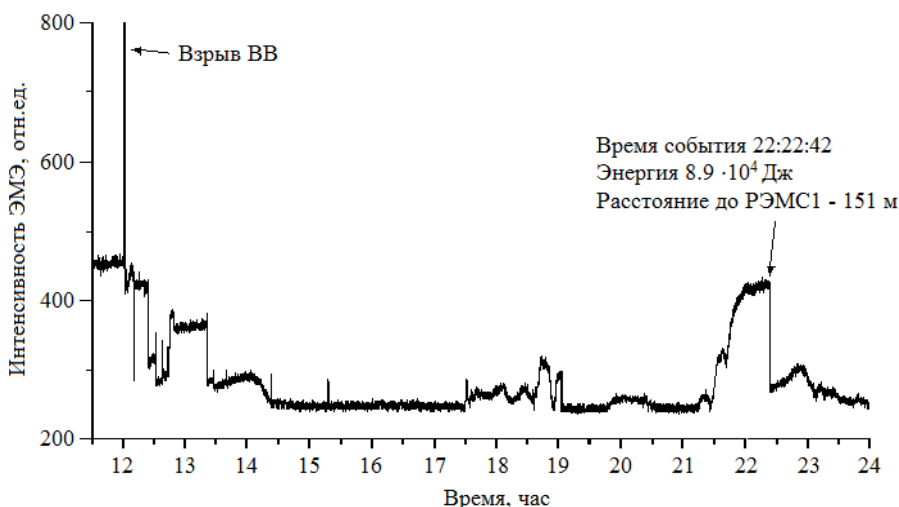


Рисунок 20 – Изменения интенсивности электромагнитной эмиссии в период релаксации горного массива после проведения технологического взрыва между горизонтами минус 140 и минус 210 в блоке (4-5)

ческая эмиссия; амплитуда ЭМЭ на широкой полосе частот (1-100) кГц; амплитуды ЭМЭ в полосах с центральными частотами 2, 15 и 100 кГц. Анализ данных регистрации показал, что количество и амплитуды высокочастотных сигналов после технологического взрыва аperiodически уменьшаются. Это обстоятельство говорит о снижении количества вновь образованных трещин в мас-

сиве размером не более $(5-7) \cdot 10^{-2}$ м или площадью до $5 \cdot 10^{-4}$ м². Нарастание амплитуд ЭМЭ отмечалось только в полосах с центральными частотами 15 и 2 кГц, что указывает на рост трещин длиной до одного метра или имеющих площадь отрыва до одного квадратного метра. На рисунке 20 выделен пример нарастающих изменений интенсивности ЭМЭ в течении одного часа, резкий спад которой произошел после тектонического толчка четвертого энергетического класса. Это указывает на то, что мониторинг подготовки и развития геодинамических событий возможен при выше указанной установке регистрирующей ЭМЭ аппаратуры. Наблюдаются также случаи, когда после технологического взрыва НДС массива в районе обрушения «мягко» релаксирует в виде толчков. Это зависит от многих факторов, как технологических, так и горно-геологических.

Как показал комплексный анализ электромагнитной и акустической эмиссий, а также данных наблюдений Таштагольской сейсмической станции, медленные изменения ЭМЭ не имели объективных физических объяснений, так как сейсмическая станция не фиксировала существенных геодинамических проявлений в этот период времени. Для выявления причин таких изменений характеристик ЭМЭ было проведено физическое моделирование возбуждения электромагнитных сигналов в массиве горных пород с использованием специального ударного пневматического устройства, разработанного в Институте горного дела СО РАН. На рисунке 21 при-

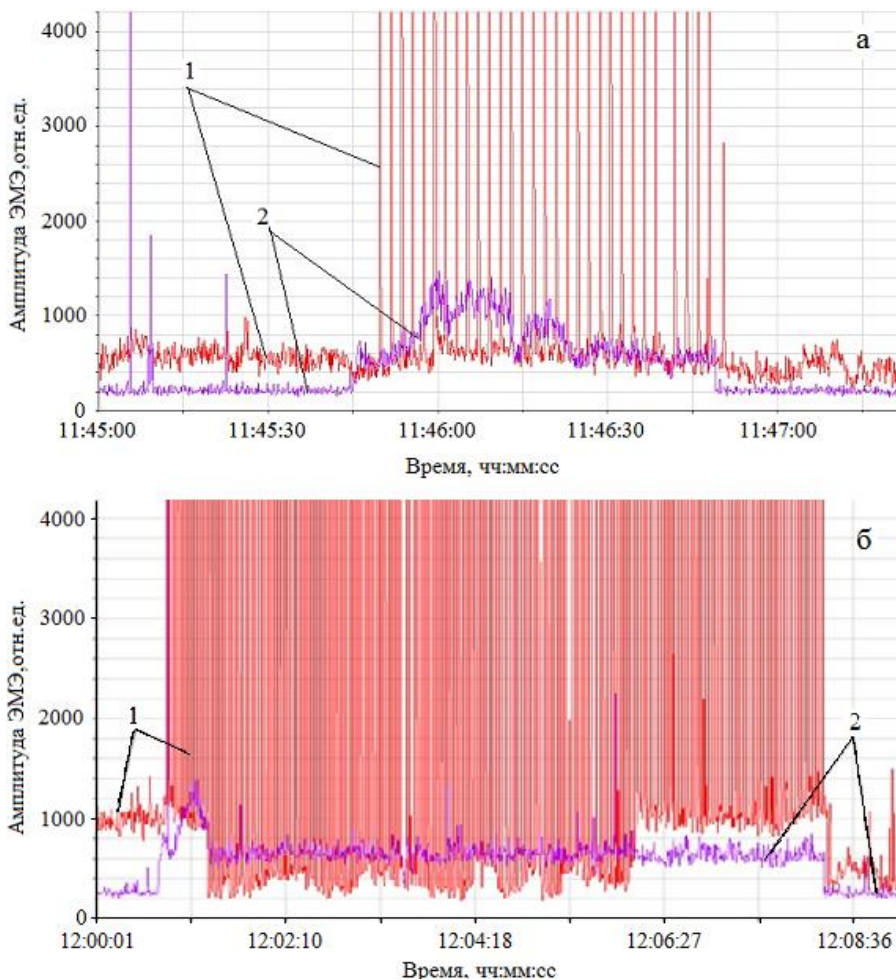


Рисунок 21 – Изменения амплитуды спектральных составляющих ЭМЭ горных пород на выбранных частотах при воздействии первой серии ударов в течение 60 с (а) и 430 с (б): 1 – 1 кГц; 2 – 13 кГц

ведены фрагменты изменений амплитуд двух спектральных составляющих ЭМЭ, зарегистрированные РЭМАС1 при серии ударов в течение 60 и 430 секунд. Исследования проводились на горизонте минус 350 (глубина 800 м) в орте 8. На этом последнем по глубине горизонте и на выше простирающемся горизонте минус 280 (глубина 730 м) в период проведения экспериментальных измерений буровые, очистные и строительные работы не выполнялись. Используемое в эксперименте пневматическое ударное устройство развивало усилие около 90 Дж с частотой 1 Гц. Удары производили серийно. Количество ударов увеличивали от серии к серии. Измере-

ния проводилось с усреднением амплитуды ЭМС равным 32 миллисекунд. Акустические сигналы в виде импульсного воздействия имели колоколообразную форму. При проведении экспериментов выявлена важная закономерность. Как видно из рисунков 21 в начале серии ударов амплитуда возбуждаемых электромагнитных сигналов возрастает по закону близкому к линейному. Затем происходит уменьшение усредненной амплитуды ЭМС до определенного значения и держится на всем временном диапазоне последующих ударов в серии. Это связано с резонансными явлениями, обусловленными размерами блоков, трещин, шириной границ раздела, углом наклона электрического или магнитного диполей по отношению к направлению падающей акустической волны, а также с установившимися со временем вынужденными колебаниями. Следует заметить, что поскольку возбуждающие акустические импульсы близки по амплитуде, то и установившиеся вынужденные колебания объема горных пород также будут близки по амплитуде. В результате под действием этих вынужденных колебаний происходят акустико-электромагнитные преобразования на границах минералов и слоев, на трещинах или на контактах различных минеральных включений, и генерируются электромагнитные отклики горных пород. Причем в начальный период времени, в соответствии с изменением амплитуды установившихся вынужденных колебаний, электромагнитные сигналы будут иметь более высокую амплитуду с последующим понижением ее до определенного уровня.

Модельные эксперименты, показавшие уменьшение амплитуды ЭМЭ от последующих ударов, равных по энергии первоначальным, позволили объяснить явление плавного изменения параметров электромагнитной эмиссии после некоторых мощных технологических взрывов. Надо заметить, что такие изменения хода амплитуды ЭМЭ в период релаксации породного массива после технологических взрывов большой мощности встречаются не часто. На рисунке кроме плавных изменений наблюдаются и пиковые изменения ЭМЭ. Это указывает на то, что после взрыва происходит медленное сдвигание массива горных пород с разной скоростью и с перераспределением НДС по разломам и другим плоскостям скольжения. Такие пиковые значения амплитуд ЭМЭ проявляются и при развитии деструктивных зон в напряженных местах массива горных пород. Сдвигание массива горных пород сопровождается множественными механическими сколами, трещинообразованием и, соответственно, акустической эмиссией. В результате совокупности трения породных масс и трещинообразования при перемещении, а также воздействия возникающих акустических сигналов на двойные электрические слои, всегда присутствующих в горных породах, появляются электромагнитные отклики, амплитуда которых изменяется плавно на определенном уровне значений в соответствии с энергией механического воздействия. На это указывают и результаты физического моделирования при воздействии на массив низкоэнергетическими ударами. Моделирование в лабораторных условиях изменения параметров ЭМС при трении поверхностей полевого шпата и гранита с естественной шероховатостью, имеющих разную твердость по шкале Мооса (6 и 7, соответственно), показало такую же закономерность возрастания и спада до определенного уровня значения амплитуд ЭМЭ.

Таким образом, характеристики электромагнитной эмиссии, возникающей вследствие механоэлектрических преобразований в горных породах, отображают изменения НДС породного массива. Из результатов исследований следует, что по

амплитудно-частотным параметрам электромагнитных сигналов горных пород можно судить о развитии трещинообразования и, соответственно, о развитии деструктивных зон и динамике массива. Измерения интенсивности и амплитуды ЭМЭ горных пород в условиях шахт и рудников позволят определять реальные времена подготовки геодинамических событий и их проявления, а также выявлять особенности перераспределения НДС массива, в том числе и его медленное сдвижение. Знание этих особенностей позволит правильно и эффективно осуществлять управлением разгрузкой массива горных пород.

В связи с тем, что количество осадков и влажность в шахте Таштагольского месторождения в течение года варьируется в соответствии с погодными условиями, проводились специальные исследования сезонных изменений характеристик ЭМЭ. Весь период исследований был разбит на четыре сезона (весна, лето, осень, зима). Работы проводились: с 23.04.2014 по 29.04.2014; с 16.06.2015 по 25.06.2015; с 26.08.2015 по 03.09.2015 и с 08.12.2015 по 16.12.2015. В результате этих исследований было выявлено, что на характеристики ЭМЭ влажностный режим в шахтном поле рудника оказывает влияние в большей степени по электрической составляющей электромагнитного поля и в меньшей степени на показания по индукционной составляющей.

Анализ измеряемых в разные периоды года характеристик электромагнитной и акустической эмиссии горных пород, спектральных параметров ЭМС, данных сейсмических наблюдений до и во время проведения технологических взрывов, при релаксации породного массива после взрыва показал их устойчивую связь с изменениями НДС породного массива. Установлена корреляция фактического прохождения геодинамических событий по данным акустических и сейсмических наблюдений в период перераспределения напряженно-деформированного состояния массива и возрастания амплитуды ЭМЭ.

В работе представлены результаты детальных исследований связей параметров и характеристик электромагнитной эмиссии с сейсмическими наблюдениями. Проведенный расчет корреляции по Пирсону показал, что: корреляция между классом произошедшего после взрыва события и интенсивностью ЭМЭ составила - 0.96, а с амплитудами ЭМЭ на частотах (1-100) кГц, 100 кГц и 2 кГц – 0.93; корреляция между классом произошедшего после взрыва события и интенсивностью акустической эмиссии – 0.89. В качестве примера на рисунке 22 приведен класс и время геодинамических событий произошедших после массового технологического взрыва блока 12 между горизонтами минус 280 и минус 350. По данным сейсмостанции в первые 5-6 минут вблизи места взрыва блока массива происходит большое количество событий. Затем их количество уменьшается, а в 16 часов 17 минут 42 секунды между горизонтами минус 280 и минус 350 на расстоянии около 100 метров от места произведенного взрыва происходит сейсмическое событие с энергией $3.98 \cdot 10^6$ Дж. Этот толчок снизил НДС массива и, соответственно, уменьшил количество сейсмических проявлений. На рисунке 23а отображена спектрограмма электромагнитной эмиссии в частотном диапазоне (1-100) кГц, полученная регистратором РЭМАС1 после взрыва 05 февраля 2017 года в период с 12 часов до 21 часа по Кемеровскому времени, а на рисунке 23б из этой спектрограммы выделены амплитуды ЭМЭ на частотах 3 и 13 кГц. На рисунке видно, что после взрыва наблюдается высокая активность ЭМЭ на низкой частоте, что соответствует обра-

зованию трещин протяженностью около метра. Перед геодинамическим событием наблюдалась повышенная активность ЭМЭ на частотах и 3 кГц и 13 кГц, что говорит об усиленном трещинообразовании разной длины. Момент события с энергией $3.98 \cdot 10^6$ Дж отмечился высокой амплитудой ЭМЭ по всем частотам. Как показано

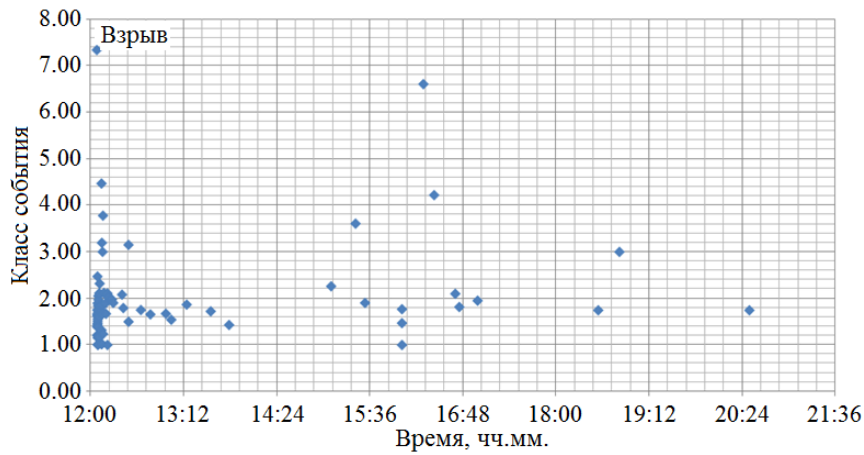


Рисунок 22– Распределение во времени геодинамических событий и их класса после массового технологического взрыва 05 февраля 2017 года

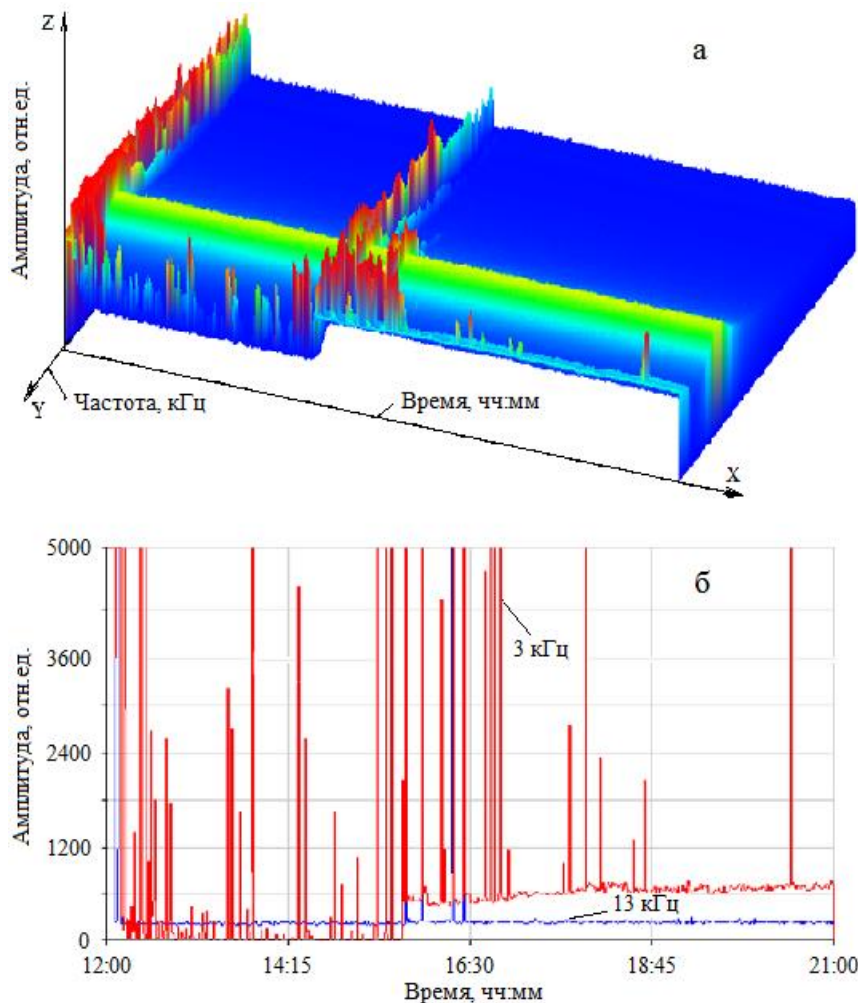


Рисунок 23 – Спектрограмма ЭМЭ в частотном диапазоне (1-100) кГц после технологического взрыва 05 февраля 2017 года (а); распределение амплитуд ЭМЭ в этот же промежуток времени на выбранных частотах 3 кГц и 13 кГц (б)

на рисунках большая амплитуда ЭМЭ наблюдалась с 16 часов 42 минуты по 16 часов 59 минут. По данным сейсмической станции «Таштагол» эти амплитуды могут быть привязаны к толчкам со значительно меньшей энергией 125 Дж и 65 Дж. Повышенная амплитуда ЭМЭ обусловлена более близким расстоянием геодинамических событий до регистраторов и диаграммой направленности принимающих датчиков.

Таким образом, проведенные натурные исследования показали, что объективно существует связь между сейсмическими событиями в шахтном поле рудника, электромагнитной и акустической эмиссией горных пород как накануне события, так и в момент времени его прохождения. Более того, сейсмические наблюдения не отслеживают процессы, которые могут происходить с небольшой энергией в процессе релаксации породного массива. При проведении мониторинга выявлено, что все сейсмические события записаны регистратором РЕМАС1 по интенсивности электромагнитной и акустической эмиссий. В районе шахтного поля, где проводился мониторинг, зарегистрированы

изменения ЭМС, которые связаны с формированием деструктивных зон в исследованных участках. Проведенные натурные исследования показали, что выбранный при проектировании регистраторов диапазон частот от 1.0 до 100 кГц для мониторинга образования деструктивных зон и развития геодинамических событий в шахтном поле рудника с прочными и упругими горными породами является наиболее информативным и достаточным.

В глава 6 представлен вариант комплексной системы мониторинга и краткосрочного прогноза изменений НДС массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий, включая ИК диагностику. Основой для этой системы явились приведенные в первых пяти главах диссертации теоретические, лабораторные и натурные экспериментальные исследования. Предварительно была разработана обобщенная схема механоэлектрических преобразований в горных породах на этапах подготовки разрушения. Возникновение электромагнитных сигналов происходит по следующим механизмам: при переносе заряда в устье трещин с дозвуковыми скоростями; при изменении дипольного момента двойных электрических слоев под действием акустических импульсов на контактах минералов или веществ, на бортах трещин, дефектов и блоков; при взаимодействии акустических импульсов с сегнетоэлектриками и минерализованной жидкостью. Частотные и амплитудные параметры возникающих ЭМС определяются размерами трещин и дефектов, а также блочностью массива, степенью минерализации жидкости, акустическими и сегнетоэлектрическими свойствами минералов и веществ, входящих в горную породу, ее структурно-текстурными особенностями. Отличительной чертой возникающих ЭМС в массиве горных пород является их существенно повышенный низкочастотный спектр, регистрируемый приборами в диапазоне от 1.0 до 5.0 кГц. Надо отметить, что процесс образования деструктивных зон зависит от структуры блоков в образцах и массиве горных пород. В первую очередь при повышении давления сжатия или другого типа нагрузок трещинообразование начинается в менее прочных минералах и горных породах. Дальнейшее повышение нагрузки приводит к процессу трещинообразования и в более прочных структурных составляющих. Поэтому процесс развития деструктивной зоны в горных породах может быть растянутым во времени, продолжительность которого зависит от скорости нагружения и прочности структурных составляющих горные породы.

Дальнейшее развитие метода мониторинга и краткосрочного прогноза возникновения деструктивных зон и геодинамических событий было связано с созданием макета единой информационной системы для диагностики НДС массива горных пород в шахте Таштагольского месторождения в реальном масштабе времени. Алгоритм записи и передачи данных измерений параметров ЭМС и АС следующий. Разработанный программно-аппаратный регистратор РЭМАС1, как первичный регистратор, обеспечивает прием данных параметров ЭМС и АС. В процессе программного автоматического их анализа, формирование данных в виде математического ожидания и дисперсии амплитуд электромагнитных сигналов за интервалы времени в устанавливаемых оператором пределах от $8 \cdot 10^{-3}$ до $128 \cdot 10^{-3}$ секунды. Амплитуда акустических сигналов усредняется за время $128 \cdot 10^{-3}$ секунды. При этом данные по ЭМС формируются в интервале частот (1 – 100) кГц с промежутками в 1 кГц. Перед установкой емкостных или индукционных датчиков определя-

ется структура горных пород, наличие залеченных трещин и даек, а также присутствие скважин. Электромагнитным профилированием или, при наличии скважин, с помощью ИК радиометрии выявлялись наиболее напряженные участки массива горных пород. Поскольку контроль всего шахтного поля затруднителен из-за необходимости иметь большое количество регистраторов, то предлагается вести наблюдения изменений НДС только вокруг взрывааемого или отрабатываемого блоков горных пород. Количество регистраторов в этом случае может быть ограничено тремя, четырьмя или пятью приборами. Три прибора располагаются в шахте по горизонту вокруг разрабатываемого блока горных пород, который находится ниже взрыва. Четвертый прибор помещается на вышележащем горизонте шахты. Пятый прибор для контроля может располагаться на нижележащем горизонте от первых трех. Такое расположение регистраторов позволяет калибровать электромагнитные и акустические импульсы по энергии технологического взрыва. Практические измерения показали, что в целях сохранения регистраторов и уверенного приема ЭМЭ оптимальное расстояние до места взрыва не должно быть ближе 40 метров, но не превышать 150–200 метров. В дальнейшем на выбранных частотах результаты предварительной обработки передаются по транспортным узлам сети информационной системы на ПК диспетчера. По данным мониторинга математического ожидания и дисперсии амплитуд ЭМЭ на выбранных частотах диспетчер следит за развитием динамики контролируемого участка массива горных пород. Таким образом, уже на стадии предварительной обработки данных мониторинга параметров и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород можно судить о развитии деструктивных зон и геодинамических проявлений. Разработка и применение в последующем специальных триангуляционных программ обеспечит контроль энергии и места развивающихся геодинамических событий в шахте.

При тестировании макета единой информационной системы для диагностики НДС массива горных пород в шахте Таштагольского месторождения в реальном масштабе времени испытывали передачу данных по проводной и беспроводной связи. По сравнению с передачей данных по проводам через интерфейс RS-485 использование радиоканала оказалось наименее энергетически и финансово затратной. Такая сеть наиболее приспособляемая к изменениям мест проведения взрывных и очистных работ. Для передачи данных на диспетчерский пульт или в банк данных по радиоканалу использовали модули типа ATZB-X-233-USB.

Преимуществом такого подхода является возможность реализации на базе радиопередающих модулей как топологии сети точка-точка, звезда, так и топологии *mesh*, при которых каждый из приемопередающих модулей может выступать в качестве ретранслятора для нескольких модулей в зоне приема, причем сами эти модули могут не иметь непосредственной связи. Это позволяет, в перспективе, даже при небольшой дальности уверенного приема между двумя модулями в сети (200 – 500 метров) в рамках самоорганизующейся *mesh*-сети, обеспечивать широкую зону покрытия. Хотя в отдельных случаях прямолинейность выработок, например на Таштагольском руднике, может достигать значений до 500 м. Расстояние до диспетчерской службы на поверхности составляет $(3-5) \cdot 10^3$ м. Нелинейность проходов потребует несколько большего количества приемопередатчиков. По результатам тестирования в шахтных условиях Таштагольского месторождения можно сказать, что выбор того или иного способа передачи информации определяется

конкретными условиями снабжения энергией информационной сети, геологической обстановкой в руднике и технологией добычи полезного ископаемого.

В качестве примера в диссертации представлена математическая модель обнаружения предвестников разрушения горных пород на этапе принятия решений диспетчером с использованием временных рядов параметров электромагнитных сигналов. Моделирование проводилось с учетом разработанных под руководством академика РАН А.Д. Гвишиани в Геофизическом центре РАН новых методов и алгоритмов обнаружения предвестников геодинамических явлений по временным рядам. Порядок обнаружения предвестников геодинамического события имеет определенные этапы. На первом этапе производился выбор базисных функций и α -разметка измеряемого временного ряда ЭМЭ (рисунок 24). При этом использовался алгоритм α -разметки, основанный на процедуре преобразования временного ряда в символьную последовательность Symbolic Aggregate approXimation (SAX). После осуществления разметок производили процедуру решения уравнений.

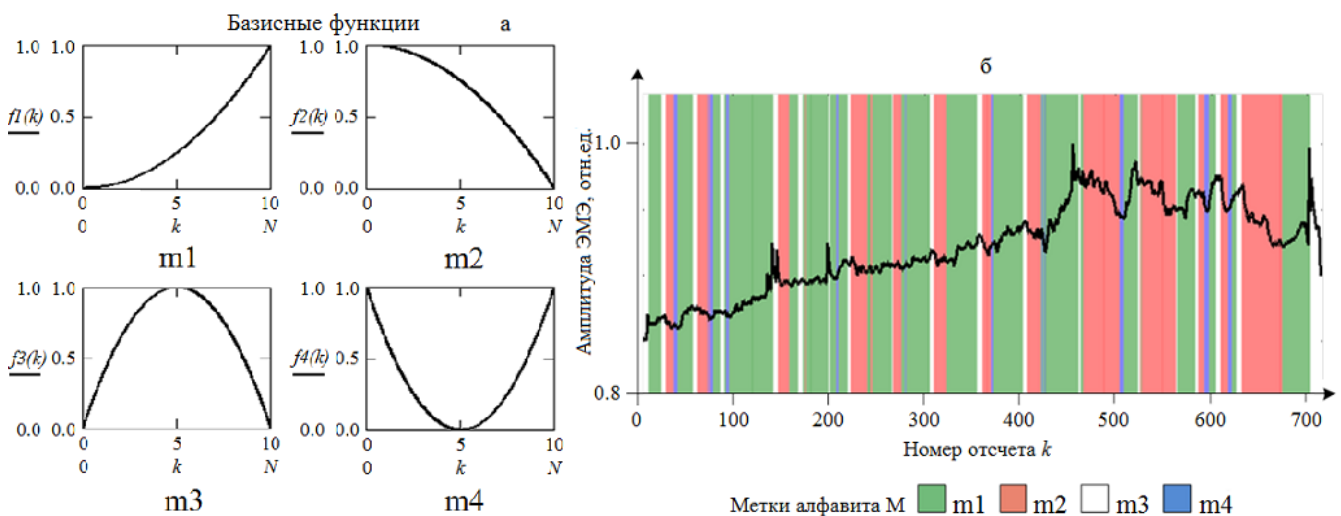


Рисунок 24 – Базисные функции для α -разметки (а) и пример α -разметки временного ряда лабораторных измерений ЭМЭ образцов горных пород при одноосном сжатии до разрушения (б)

Кроме того, оценивались и были использованы закономерности и признаки, которые указывали на предвестники формирования очага разрушения. Производилась β -разметка. Такими признаками являлись импульсные изменения средней амплитуды ЭМЭ и увеличение частоты следования резких изменений амплитуды ЭМЭ. Был разработан алгоритм обнаружения предвестников разрушения образцов горных пород. Параметры предвестника записывались в виде наборов меток $M=\{m1, m2, m3, m4\}$ (рисунок 24а) и так далее. В результате решения системы уравнений оценивались значения функции, характеризующие принадлежность соответствующего участка временного ряда к предвестникам (рисунок 24б). Работа алгоритма обнаружения предвестников разрушения тестировалась первоначально на временных рядах амплитуд ЭМЭ, полученных при разрушении лабораторных образцов Таштагольского месторождения, а затем на временных рядах амплитуд ЭМЭ, полученных при измерениях в шахте Таштагольской, включающих массовый технологический взрыв и «горный удар». Таким образом, разработанный алгоритм позволил выявлять во временных рядах измерений амплитуд ЭМЭ особенности, характерные для этапа, предшествующего разрушению горных пород. Кроме того,

данный алгоритм может быть успешно использован в составе программного обеспечения информационной системы.

Основные выводы

1. Созданы комплексные методы мониторинга и прогноза развития деструктивных зон и геодинамических явлений по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии горных пород, в том числе с использованием акустических методов и ИК радиометрии.

2. Разработаны приборы и средства мониторинга для исследований параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии гетерогенных материалов и горных пород: в лабораторных условиях при акустическом возбуждении и одноосном сжатии, в том числе при приложении электрических или магнитных полей; а в натурных условиях шахты непрерывно до 170 часов при возбуждении взрывом массива горных пород, в том числе до взрыва, во время его проведения и в период релаксации механических напряжений в породном массиве.

3. На основании теоретических, лабораторных и натурных исследований с применением созданных программно-аппаратных регистраторов электромагнитной и акустической эмиссий РЭМС1 и РЭМАС1 разработан метод для мониторинга и контроля развития деструктивных зон и геодинамических процессов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массива горных пород, а также макет информационной системы такого мониторинга.

4. Математическое моделирование изменений параметров ЭМС при разных амплитудах акустического воздействия на дефектную структуру с постоянным зарядом показало, что в результате акустоэлектрических преобразований на двойных электрических слоях происходит переизлучение энергии воздействующих акустических импульсов в энергию электромагнитных откликов. Также установлено, что амплитудно-частотные параметры излучаемых электромагнитных сигналов находятся в непосредственной связи с характеристиками детерминированных акустических воздействий, зарядовым состоянием дефектов и структурных элементов.

5. Математически смоделирован и экспериментально определен спектр амплитудно-частотный параметров электромагнитных сигналов при детерминированном акустическом воздействии на образцы с различными структурными особенностями, электрическими, сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами, при поляризации образцов и приложении электрического и магнитного полей, а также образцов, контактирующих с солевыми водными растворами.

6. Параметры ЭМС исследуемых материалов и характеристики воздействующего акустического импульса находятся в непосредственной связи. Это обстоятельство указывает на то, что генерируемые при росте трещин акустические импульсы участвуют в формировании частотного спектра ЭМС как при развитии разрушения образцов, так и при формировании деструктивных зон в массивах горных пород. На формирование частотного спектра оказывает влияния резонансный характер колебаний включений и слоев в горной породе, а также биение из-за сложения близких частот акустических импульсов, возникающих при отражении от структурно включений.

7. На примере модельных слоистых систем, а также переменнo-слоистой горной породы серпентинит и минералов, из которых состоит его слоистая структура (серпентин и хризотил – асбест), показано влияние количества слоев на амплитуду

ЭМС. Существенное возрастание амплитуды в серпентините, несомненно, вызвано присутствием большого количества двойных электрических слоев на границах полосчатых чередований минералов серпентина и хризотил – асбеста. Этот факт подтверждают и измерения зарядового состояния поверхности серпентинита, и уменьшение амплитуды ЭМС при равном акустическом воздействии после удаления части слоев.

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

9. Экспериментально показано, что при развитии деструктивных зон происходит эмиссия микрочастиц, которые могут участвовать в генерации электромагнитных сигналов на стадиях предшествующих прорастанию трещин и в момент разрушения образцов горных пород, а, следовательно, при таких же процессах и в породном массиве.

10. Характеристики инфракрасного свечения отверстий или скважин изменяются в соответствии с процессами подготовки разрушения образцов или массива горных пород, находящихся в меняющемся или действующем напряженно-деформированном состоянии. Основываясь на этом, можно эффективно использовать ИК термографию, наряду с электромагнитным профилированием, для определения мест с высоким НДС массива горных пород, а также выявлять места установки регистраторов электромагнитных сигналов.

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

12. Выявлено три основных временных процессов изменения амплитуды ЭМЭ после взрыва, которые проходят в течение секунд, минут и часов. Секундные изменения связаны со взрывным воздействием на массив, прохождением «горного удара», сколов, толчков и другими быстроизменяющимися изменениями НДС массива. Минутные изменения параметров ЭМЭ связаны с релаксационными процессам НДС массива после «горных ударов» или взрывов с малой энергией. Кроме того, релаксация НДС может продолжаться в течение нескольких часов, обусловленная медленным сдвижением массива горных пород с разной скоростью по разломам и другим плоскостям скольжения.

13. Результаты исследований и совместного анализа электромагнитной и акустической эмиссии горных пород, спектральных параметров электромагнитных сигналов, данных сейсмических наблюдений до технологических взрывов, в период их проведения и при релаксации породного массива в разные времена года показали связь изменений напряженно-деформированного состояния породного массива, характеристик и параметров ЭМЭ горных пород.

14. На основе проведенных исследований в шахтном поле Таштагольского месторождения разработан алгоритм и схема проведения мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий, включая инфракрасное свечение скважин.

15. Создан и апробирован в шахтных условиях Таштагольского месторождения макет информационной системы для передачи данных от регистратора на удаленный компьютер. В качестве первичного приемника информации об электромагнитных и акустических сигналах массива горных пород использован программно-аппаратный регистратор РЭМАС1.

Список основных работ, опубликованные автором по теме диссертации:

Монографии:

1. **Беспалько А.А.** Программно-аппаратный комплекс для мониторинга развития геодинамических процессов в горных массивах в реальном режиме времени по параметрам электромагнитных сигналов/ Бомбизов А.А., Лошилов А.Г., Суржиков А.П. – Томск: изд-во ТПУ, 2018. – 174 с.

2. **Беспалько А.А.** Диагностика геофизических предвестников геодинамических явлений и развитие геотехнологии разработки железорудных месторождений/ Еременко А.А., Еременко В.А., Яворович Л.В. – Новосибирск: Наука, 2016. – 296 с.

3. **Беспалько А.А.** Механоэлектрические преобразования при акустическом и взрывном воздействии на образцы горных пород и породные массивы в изменяющемся поле напряжений/ Яворович Л.В. – Раздел VI, глава 2 в коллективной монографии «Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия»/ Ответственный редактор академик Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 632 с.

4. **Беспалько А.А.** Связь петрофизических свойств горных пород с изменением параметров электромагнитных сигналов при акустическом воздействии/ Яворович Л.В., Суржиков А.П. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 120 с.

5. **Беспалько А.А.** Связь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород/ Яворович Л.В. – Деп. в ВИНТИ 04.10.2006, № 1198-B2006. – 194 с.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в реферативных базах данных Scopus и Web of Science:

1. **Беспалько А.А.** Влияние слоистости алевролита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении/Яворович Л.В., Гольд Р.М., Дацко Д.И. ФТПРПИ / Journal of Mining Science/. – 2002. – №2 – С. 27-31.

2. **Беспалько А.А.** Возбуждение электромагнитного излучения в слоистых горных породах при акустическом воздействии/Яворович Л.В., Гольд Р.М., Дацко Д.И. ФТПРПИ / Journal of Mining Science/. – 2003. – №2. – С. 8-14.

3. **Беспалько А.А.** Неразрушающий электромагнитный метод контроля качества взлетно-посадочной полосы/ Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. – Дефектоскопия / Russian Journal of Nondestructive Testing/. – 2003. – №12. – С. 54-58.

4. **Беспалько А.А.** Наблюдения изменений напряженного состояния массива горных пород после массового взрыва по параметрам электромагнитной эмиссии/ Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Яворович Л.В., Климов В.К., Штирц В.А., Шипеев

- О.В. Физическая фезомеханика / *Physical Mesomechanics*/. – 2004. –Т.7, Ч.2. – С. 253-256.
5. **Беспалько А.А.** Исследование электромагнитной эмиссии контактов горных пород в шахтном поле/ Яворович Л.В., Климко Т.А. Физическая мезомеханика / *Physical Mesomechanics*/. – 2004. –Т.7, Ч.2. – С. 285-283.
6. **Беспалько А.А.** Влияние электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии/ Яворович Л.В., Климко Т.А. Физическая мезомеханика / *Physical Mesomechanics*/. – 2004. –Т.7, №5. – С. 95-99.
7. **Беспалько А.А.** Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах при динамических воздействиях/ Суржигов А.П., Яворович Л.В. Горный журнал / *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*/. – 2006. – №4. – С. 32-34.
8. **Беспалько А.А.** Экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитной эмиссии в неоднородных диэлектрических материалах/ Кузьминых Р.А., Люкшин Б.А., Уцын Г. Е., Яворович Л.В. Известия ВУЗов. Физика / *Russian Physics Journal*/. – 2007. – №2. – С. 16-22.
9. **Беспалько А.А.** Механоэлектрические преобразования в кварце и кварцсодержащих горных породах в процессе акустического возбуждения/ Яворович Л.В., Федотов П.И. ФТПРПИ / *Journal of Mining Science*/. – 2007. – №5. – С. 22-27.
10. **Беспалько А.А.** Регистратор электромагнитных и акустических сигналов для контроля прочности и разрушения материалов и массивов горных пород/ Федотов П.И., Яворович Л.В. Известия ТПУ. – 2008. –Т.32, №2. – С. 255-258.
11. **Беспалько А.А.** Исследование влияния концентрации водного раствора NaCl на параметры электромагнитного сигнала песчаников/ Яворович Л.В. Известия ВУЗов. Физика / *Russian Physics Journal*/. – 2008. – №11/2. – С. 117-120.
12. **Беспалько А.А.** Влияние размеров неоднородностей на характеристики волновых процессов в упругих средах/ Люкшин Б.А., Уцын Г.Е. Известия ВУЗов. Физика / *Russian Physics Journal*/. – 2008. – №11/2. – С. 52-57.
13. **Беспалько А.А.** Механоэлектрические преобразования в массиве горных пород Таштагольского рудника при взрывных воздействиях/ Яворович Л.В., Виитман Е.В., Федотов П.И., Штирц В.А. ФТПРПИ / *Journal of Mining Science*/. – 2010 – №2. – С. 53-62.
14. **Беспалько А.А.** Исследование параметров электромагнитных сигналов при акустическом возбуждении горных пород, контактирующих с жидкостью/ Яворович Л. В., Федотов П. И. Контроль. Диагностика. – 2011. – Спец. выпуск. – С. 7-11
15. **Беспалько А.А.** Регистратор электромагнитных сигналов для контроля изменений напряженного состояния горных пород/ Бомбизов А.А., Лощилов А.Г., Яворович Л.В. Контроль. Диагностика. – 2011. – №11. – С. 14-17.
16. **Беспалько А.А.** Исследование изменений характеристик электромагнитных сигналов при одноосном сжатии образцов горных пород Таштагольского рудника/ Яворович Л.В., Колесникова С.И., Букреев В.Г., Мертвецов А.Н., Федотов П.И. Известия вузов. Физика / *Russian Physics Journal*/. – 2011. – Т.54, №1/2. – С. 78-84.

17. **Беспалько А.А.** Диагностика развития деструктивных зон в образцах горных пород при одноосном сжатии по спектральным характеристикам электромагнитных сигналов/ Яворович Л.В., Федотов П.И. Дефектоскопия / Russian Journal of Nondestructive Testing/. – 2011. – № 10. – С. 41-49.

18. **Беспалько А.А.** Алгоритм поиска предвестников разрушения горных пород по временным рядам измерений электромагнитных сигналов/ Букреев В.Г., Мертвецов А.Н., Яворович Л.В. Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 3-7.

19. **Беспалько А.А.** Контроль структурных нарушений породных массивов шахтного поля рудников по параметрам механоэлектрических преобразований/ Суржиков А.П., Яворович Л.В., Федотов П.И. Дефектоскопия / Russian Journal of Nondestructive Testing/. – 2012. – № 4. – С. 34-40.

20. **Беспалько А.А.** Разработка прибора для мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород по косвенным признакам электромагнитного и акустического излучения/ Бомбизов А.А., Лощилов А.Г., Филатов А.В. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2(26), ч.1. – С. 141-143.

21. **Bespalko A.A.** Control of Rock Mass by Mine Tashtagol Method IR-Radiometer/ Yavorovich L.V., Moiseev S.V. 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. – Tomsk: TPU Press. – 2012. – V2. – P. 228-231.

22. **Беспалько А.А.** Исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности скважин/ Яворович Л.В., Федотов П.И., Овсянникова Т.В., Моисеев С.В. Контроль. Диагностика. – 2012. – №13. – С. 18-22.

23. **Беспалько А.А.** Определение опасных зон в районе тектонических нарушений электрометрическим и электромагнитным методами/ Штирц В.А., Еременко А.А., Еременко В.А., Александров А.Н., Яворович Л.В. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №10. – С. 170-179.

24. **Беспалько А.А.** Автономный регистратор электромагнитных и акустических сигналов для мониторинга шахтных сооружений/ Бомбизов А.А., Лощилов А.Г. Приборы и техника эксперимента /Instruments and Experimental Techniques/. – 2013 – №1. – С. 141-144.

25. **Беспалько А.А.** Выявление предвестника разрушения образцов горных пород по параметрам электромагнитных сигналов/ Яворович Л.В., Федотов П.И. Известия вузов. Физика / Russian Physics Journal/. – 2013, – Т.56, № 1/2. – С. 271-275.

26. **Беспалько А.А.** Особенности спектра электромагнитных сигналов образцов горных пород при одноосном сжатии/ Яворович Л.В., Федотов П.И., Попеляев А.И. Контроль. Диагностика. – 2013. – № 9. – С. 25-32.

27. **Беспалько А.А.** Исследование и контроль намагниченности образцов магнетитовой руды по параметрам электромагнитного сигнала/ Федотов П.И., Яворович Л.В. Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 221-224.

28. **Беспалько А.А.** Исследование параметров электромагнитных откликов образцов вмещающих и рудных пород Таштагольского рудника на акустическое воздействие/ Яворович Л.В. Контроль. Диагностика. – 2013. – № 13. – С. 272-275.

29. **Беспалько А.А.** Перспективы комплексного использования электрометрического и электромагнитного методов для контроля изменения напряженно-

деформированного состояния горного массива/ Яворович Л.В., Еременко А.А., Попеляев А.И., Штирц В.А. Контроль. Диагностика. – 2014. – № 11. – С.19-24.

30. **Bespalko A.A.** Electromagnetic radiation generated by acoustic excitation of rock Samples/ Yavorovich L.V., Fedotov P.I., Baksht R.B. Acta Geophysica. – 2015. – V. 64, № 5. – P. 1446-1461.

31. **Bespalko A.A.** Interconnection between parametrs of rock samples electromagnetic signals and content of magnetic in the samples/ Yavorovich L.V., Fedotov P.I., Popelyaev A.I. Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. –2015. – V 81, № 1. Doi:10.1088/1757-899X/81/1/012055

32. **Беспалько А.А.** Электромагнитный отклик слоистых диэлектрических структур на импульсное акустическое воздействие/ Люкшин Б.А., Уцын Г.Е., Яворович Л.В. Известия ВУЗов. Физика / Russian Physics Journal/. – 2015. – Т.58, №4. – С. 120-126.

33. **Bespalko A.A.** Spectrum monitoring of electromagnetic signals from rocks to control geodynamic processes under working mine conditions/ Bombizov A.A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Scientific Conference on «Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials», RTEP 2014». – 2015. – 81. Doi:10.1088/1757-899X/81/1/012122.

34. **Bespalko A.A.** Analyzing Deformation and Fracture of Dielectrics by Integral Characteristics of Their Electromagnetic Emission / Yavorovich L.V., Fedotov P.I., Popelyaev A.A. Key Engineering Materials Submitted: Scientific Journal. – 2016. – V. 683. – P. 36-43.

35. **Беспалько А.А.** Преобразования акустических импульсов в электромагнитный отклик слоистых и дефектных структур/ Исаев Ю.Н., Яворович Л.В. ФТПРПИ / Journal of Mining Science/. – 2016. – №2. – С. 64-71.

36. **Bespalko A.A.** Application of an integrated and self-contained electromagnetic acoustic recorder for monitoring the rock mass structure and development of geodynamic processes in ore mines/ Yavorovich L., Fedotov P., Pomishin E., Vedyashkin M. MATEC Web of Conferences. – 2016. – 79. Doi: 10.1051/mateccconf/20167901039.

37. **Bespalko A.A.** Study of interrelation between electromagnetic radiation and rock strength/ Yavorovich L.V., Fedotov P.I., Pomishin E.K. Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – 110. Doi:10.1088/1757-899X/110/1/012085.

38. **Bespalko A.A.** Studying Electromagnetic Signal of Rock Effected by Acoustic Impact under Uniaxial Compression/ Yavorovich L., Pomishin E., Fedotov P. AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1772. Doi: 10.1063/1.4964567.

39. **Беспалько А.А.** Электромагнитная эмиссия горных пород после массовых взрывов/ Яворович Л.В., Еременко А.А., Штирц В.А. ФТПРПИ / Journal of Mining Science/. – 2018. – №2. – С. 10-17.

40. **Беспалько А.А.** Регистратор электромагнитных и акустических сигналов/ Хорсов Н.Н., Федотов П.И., Кураков С.А. Патент № 80557 Россия, G01D 1/02 (2006.01), G01H 11/08 (2006.01) 2008134233; заявление 20.08.08; опубл.02.10.09, Бюллетень №4