

ОТЗЫВ

дополнительного члена совета ДС.ТПУ.13 на диссертацию

Беспалько Анатолия Алексеевича,

представленную на соискание ученой степени

доктора технических наук по специальности

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,

материалов и изделий, на тему

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

Диссертационная работа Беспалько А.А. по своей структуре состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка используемой литературы и трех приложений, которые изложены на 398 страницах, в том числе включая 174 рисунка и 11 таблиц. Список используемой при написании диссертации литературы представлен 370 наименованиями. В целом диссертационная работа оформлена в соответствии с установленными требованиями и хорошо иллюстрирована.

Анализ актуальности диссертационной работы. Заявленная тема диссертационной работы является актуальной, как по комплексу проблем, связанных с мониторингом и краткосрочным прогнозом изменения напряженно-деформированного состояния (НДС), так и с изучением физических основ метода электромагнитной эмиссии горных пород.

Известно, что при добыче полезных ископаемых с использованием энергии взрывов в тектонически и сейсмически активных районах Алтай-Саянской складчатой горной области при горных работах возникают катастрофические сейсмические и динамические явления в форме техногенных землетрясений, ударов горно-тектонического типа, обрушения больших масс горных пород. Ситуацию усугубляет и увеличение глубина добычи полезных ископаемых, что способствует возрастанию горное давление в местах проведения работ. 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, под различными водоемами 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.

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 мониторинга и контроля развития геодинамических проявлений

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.

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.

Основная идея диссертационной работы понятна и основана на возможности создания комплексного метода мониторинга и прогноза развития деструктивных зон и геодинамических явлений по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии горных пород, а также создания регистраторов электромагнитных и акустических сигналов для его реализации. Важным дополнением является учет внешних акустических воздействий на массив, амплитудно-частотные и

временные параметры которых определяются развитием деструктивных зон и процесса разрушения горных пород при изменении НДС.

Эта идея согласуется с общими понятиями о параметрах и характеристиках электромагнитной эмиссии, которая развивалась с начала 70-х годов прошлого века, как для определения дефектности неметаллических материалов и изделий, так и для мониторинга изменения НДС природной среды и развития геодинамических событий.

Цель исследования в формулировке автора отвечает параметрам диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Работа в целом направлена на получение теоретических и экспериментальных данных и развитие физических основ электромагнитной эмиссии горными породами. Кроме того, разработанные регистраторы электромагнитных и акустических сигналов способствовали развитию исследований электромагнитной эмиссии горных пород в натурных условиях шахтного поля рудника до технологических взрывов массой до 300 тонн, во время их проведения и в период релаксации породного массива.

Задачи, поставленные соискателем, отвечают целевым ориентировкам.

Достоверность результатов основывается на качестве и количестве первичного материала, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований, а также на использовании широкого круга применяемых в ходе работы методов и методик. В ходе работы применялись: 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 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; 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.

Полученные результаты не противоречат физике процессов, протекающих при механоэлектрических преобразованиях.

Для натурных экспериментов диссертант удачно выбрал базовый **объект** мониторинга геодинамических процессов, а именно, шахту Таштагольского месторождения. Здесь проводятся технологические взрывы разной массы. При релаксации горного массива в определенном объеме шахты и в известный промежуток времени протекают геодинамические события разного класса. Наличие сейсмостанции и сравнение ее данных с электромагнитной и акустической эмиссией способствовали выявлению связей параметров и характеристик электромагнитной эмиссии с изменением НДС исследуемой области массива пород.

Оценивая **научную новизну** приведенных в диссертации разработок и исследований по сути излагаемого материала и в формулировках соискателя следует отметить, что действительно в подобном развернутом виде с высокой степенью детальности основные методические приемы и результаты моделирования связей амплитудно-частотных параметров электромагнитных сигналов и характеристик электромагнитной эмиссии со структурным и текстурным строением горных пород, с их зарядовым состоянием, влажностью и амплитудно-частотными параметрами возбуждающего акустического импульса представлены впервые. Новыми являются результаты исследования влияния постоянных электрических и магнитных полей на параметры электромагнитного отклика горных пород при импульсном акустическом возбуждении. Амплитудно-частотные и временные параметры электромагнитных сигналов и акустической эмиссии в целом указывают на формирование и развитие зон деструкции горных пород. 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. Новизной обладают и результаты исследований температуры инфракрасного свечения скважин, отверстий и контактов горных пород, интенсивность которого определяется действующими механическими напряжениями и прочностью структурных составляющих породы. В диссертации приведены аналого-цифровые регистраторы 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 обеспечило новизну регистраторов. Новизной обладают схемы выбора места установки регистраторов, способствующих эффективному приему электромагнитной эмиссии из зон развития деструктивных и геодинамических процессов. Элементами новизны обладает и алгоритм информационной системы и схема передачи данных от регистраторов типа РЭМАС1 на удаленный компьютер диспетчера, обеспечивающих возможность использования параметров и характеристик электромагнитной

эмиссии для мониторинга изменений НДС массива горных пород в реальных условиях шахтного поля рудников.

Рассматривая *защищаемые положения*, необходимо отметить их логическую последовательность в части смыслового содержания – от создания регистраторов электромагнитных и акустических сигналов для работы в лабораторных и шахтных условиях подземных рудников, в том числе в информационной системе мониторинга развития геодинамических событий, определения влияния электрофизических свойств, структурного строения и влажности горных пород на амплитудно-частотные параметры электромагнитных сигналов, контроля формирования зон деструкции в горных породах по амплитудно-частотным параметрам электромагнитных сигналов и по характеристикам электромагнитной эмиссии, мониторинга развития разрушения массива горных пород после взрывных воздействий, инфракрасного свечения скважин и его применения, наряду с электромагнитным профилированием, для выбора наиболее эффективных мест установки приборов для электромагнитного мониторинга геодинамической обстановки в натурных условиях шахтного поля рудников, до разработки комплексного метода мониторинга и контроля развития геодинамических процессов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массива горных пород.

Личный вклад автора не вызывает сомнений и состоит в существенном дополнении физики процесса механоэлектрических преобразований в сложных гетерогенных неметаллических твердотельных материалах, в процесс инфракрасного свечения отверстий и их окрестностях в образцах и массивах горных пород, в создании новых комплексных программно-аппаратных систем мониторинга параметров и характеристик электромагнитной и акустической эмиссии, в определении закономерных связей изменений параметров и характеристик электромагнитной эмиссии и напряженно-деформированного состояния горного массива, в разработке комплексного метода мониторинга и контроля развития геодинамических процессов по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии массива горных пород.

Практическая ценность работы состоит в создании программно-аппаратного регистратора типа РЭМС1, способного 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. Создан также программно-аппаратный регистратор параметров и характеристик электромагнитной эмиссии РЭМС1, обеспечивающий в заданном интервале времени от $8 \cdot 10^{-3}$ до $128 \cdot 10^{-3}$ секунд автоматический анализ записанных данных путем расчета математического ожидания амплитуд электромагнитной (ЭМЭ) и акустической эмиссий, а также дисперсии амплитуд ЭМЭ. Регистратор использован при разработке практической информационной системы. В информационной системе регистратор РЭМС1 используется в качестве

прибора, предназначенного для сбора, предварительной обработки и передачи данных на удаленный компьютер диспетчера. Комплексный метод, основанный на выявленных связях параметров и характеристик ЭМЭ с изменением НДС горных пород, применим в шахтных условиях рудников для мониторинга и контроля развития деструктивных зон и геодинамических процессов. Выявленное инфракрасное свечение 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 исследований, разработанные регистраторы, комплексные методы и методики мониторинга развития деструктивных зон и разрушения горных пород широко используются в шахте Таштагольского рудника, о чем свидетельствуют акты внедрения и использования разработок соискателя. Несомненно, что обобщенные результаты исследований найдут применение при комплексной оценки степени изменения НДС и опасности протекающих геодинамических процессов, включая удароопасность участков массива горных пород.

Структурно диссертация содержит 6 глав, раскрывающих суть защищаемых положений. Текст по главам снабжен отдельными выводами и хорошо иллюстрирован.

В первой главе «Анализ состояния изученности электромагнитной эмиссии диэлектрических твердотельных материалов и горных пород. Постановка задач исследований» 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. Анализ затронул весь период изучения электромагнитной эмиссии при механоэлектрических преобразованиях, начиная с 70-х годов прошлого века до настоящего времени. Рассматривались модельные представления и натурные исследования ЭМЭ твердотельных диэлектрических материалов и горных пород. Показано, что генерация электромагнитных сигналов при трещинообразовании хорошо изучена, то при акустическом взаимодействии с дефектами структуры образцов и массивов горных пород данных о генерации электромагнитной эмиссии не достаточно. Исходя из этого, определена область исследования, поставлены задачи и определены пути их решения.

Во второй главе кратко описаны горно-геологическая и гидрологическая характеристики взятого в качестве базового Таштагольского железорудного месторождения. Достаточно полно приведены физико-механические, электрические и магнитные свойства горных пород Таштагольского месторождения. Это также способствовало выбору автором направления исследований параметров и характеристик электромагнитной эмиссии в лабораторных экспериментах и в натуральных условиях рудника.

В третьей главе достаточно полно описаны применяемые методы и аппаратура исследования горных пород в лабораторных и натуральных условиях экспериментов. 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. Описан созданный на базе автоматизированного пресса 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 электромагнитных и акустических сигналов, 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. Сделан анализ предшествующих и существующих в настоящее время регистраторов электромагнитных сигналов.

Описан состав разработанных автономных программно-аппаратных комплексных регистраторов электромагнитных и акустических сигналов РЭМС1 и РЭМАС1, емкостных, индукционных и пьезоэлектрических датчиков, используемых в регистраторе. Приведены функциональные схемы регистраторов. Работа регистратора основана на принципах преобразования энергии электромагнитных сигналов посредством емкостного или индукционного датчиков в аналоговые сигналы с последующим усилением, оцифровкой, усреднением в установленный промежуток времени и запоминанием конечных данных на встроенном носителе памяти. Использование автоматической предварительной обработки данных измерений существенно сокращает массив данных на выходе приборов. Разработанные регистраторы включены в защищаемые положения автора диссертации.

Как показано в последующих главах созданные регистраторы 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 натуральных условиях Таштагольского железорудного месторождения.

В четвертой главе приведены различные подходы для определения механизмов генерации ЭМЭ при акустическом возбуждении и силовом нагружении образцов горных пород. Теоретически и экспериментально исследовалась электромагнитная эмиссия образцов гетерогенных

диэлектрических структур и горных пород. Эти исследования явились физическим обоснованием для разработки и применения методов мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород в естественном их залегании по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии.

В процессе исследований выявлялись особенности поляризации некоторых минералов и горных пород. Показано, что контакты минералов, трещины и наличие слоистости по-разному влияют на процесс поляризации и, соответственно, на параметры и характеристики электромагнитной эмиссии твердотельных неметаллических материалов при их акустическом возбуждении. При этом установлено, что увеличение зернистости породы влечет и увеличение амплитуды электромагнитных сигналов (ЭМС). В диссертации представлены результаты исследований влияния, наряду с акустическим воздействием, постоянных электрических и магнитных полей. Показано, что линейность ЭМС в горных породах с высоким удельным сопротивлением при равном акустическом воздействии сохраняется в постоянном электрическом поле до $2.5 \cdot 10^3$ В/м, в то время как постоянное магнитное поле напряженностью до 2900 Э или $2.3 \cdot 10^5$ А/м не влияет на амплитуду ЭМС. С другой стороны, показано, что горные породы с высокой магнитной восприимчивостью, например, магнетит или магнетитовая руда, в постоянном магнитном поле при акустическом возбуждении генерируют ЭМС, амплитуда которых линейна до 180 Э, а далее амплитуда возрастает по экспоненте до насыщения. Вызывает интерес тот факт, что при акустическом воздействии образец размагничивается, в то время как без акустического возбуждения намагниченность сохраняется длительное время.

В выработках Таштагольского рудника наблюдается обводненность и повышенная влажность пола и бортов некоторых выработок и забоев. Экспериментально показано, что при акустическом возбуждении контакта высокоомной горной породы и минерализованной вода амплитуда генерируемых ЭМС уменьшается с увеличением концентрации водного раствора соли и к расширению частотного спектра ЭМС. Показано линейное возрастание амплитуды спектральных полос ЭМС модельной системы «микродиорит – минерализованная вода».

В дальнейшем в диссертации приведены результаты расчетов возбуждения ЭМС в слоистых структурах, проводилось экспериментальное моделирование электромагнитных откликов двух и трехслойных структур, а также природных многослойных образцов горных пород. Показано влияние контактов и акустического импеданса слоев, а также их количества на амплитуду электромагнитных откликов при акустическом возбуждении образцов. Особенно наглядно влияние слоев показано на примере природного слоистого образца серпентинита.

В работе детально описан мониторинг разрушения образцов горных пород по параметрам электромагнитных сигналов. Приведены этапы развития разрушения по параметрам и характеристикам ЭМЭ. Показано

влияние прочности образцов горных пород на параметры ЭМС при акустическом возбуждении в процессе одноосного сжатия. Экспериментально выявлены связи токов поляризации и электромагнитной эмиссии горных пород с их электрическими и магнитными свойствами. Приведены также результаты измерений отслоения частиц при разрушении образцов горных пород, которые указывают, что вклад зарядов этих частиц в ЭМЭ существенен только на этапе разрушения.

Особое место в работе занимают исследования инфракрасного свечения отверстий при изменении НДС образцов горных пород. Интенсивность этого свечения также обладает определенной этапностью, связанной с развитием разрушения при изменении НДС образцов и в дальнейшем, как показано в работе, использовалась для нахождения наиболее эффективных мест для размещения регистраторов электромагнитной и акустической эмиссий.

Таким образом, в главе 4 проведено теоретическое и экспериментальное физическое обоснование для разработки и применения методов мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород в естественном их залегании по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии.

В пятой главе приведены результаты исследований электромагнитной и акустической эмиссий, инфракрасной радиометрии и сейсмических событий в массивах горных пород. Представленные данные мониторинга проводились до и во время осуществления технологических взрывов, а также в период релаксации массива горных пород. Таким образом, выявлялись корреляционные связи характеристик ЭМЭ с акустическими и сейсмическими проявлениями, которые имели очень высокие значения до 0.95. Сезонные исследования ЭМЭ горного массива при проведении технологических взрывов показали их не существенные различия, которые определяются в большей степени структурным строением массива. Исследования спектров электромагнитных сигналов показали, что основной частотный диапазон регистрируемых сигналов находится в интервале 1-100 кГц. Модельные эксперименты, показавшие уменьшение амплитуды ЭМЭ от последующих ударов, равных по энергии первоначальным ударам, позволили объяснить явление плавного изменения параметров электромагнитной эмиссии после некоторых мощных технологических взрывов. Это указывает на то, что после взрыва происходит медленное сдвижение массива горных пород с разной скоростью и с перераспределением НДС по разломам и другим плоскостям скольжения. Наблюдающиеся пиковые значения амплитуды ЭМЭ отображают наиболее мощные по энергии сколы при перемещении породной массы или ускоренное их сдвижение в этот промежуток времени.

Исследования показали, что мониторинг изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород во времени по параметрам и характеристикам электромагнитной эмиссии предпочтительно вести на дайках, трещинах, других тектонических нарушениях и контактах пород, имеющих выход на разломы, зоны смещения и смятия, а также в

места проведения технологических взрывов и ведения очистных работ. Изменения характеристик электромагнитной эмиссии, возникающей вследствие механоэлектрических преобразований в горных породах, отображают изменения напряженно - деформированного состояния породного массива. Измерения интенсивности и амплитуды ЭМЭ горных пород в условиях шахт позволяет определять реальные времена подготовки геодинамических событий и их проявления, а также выявлять особенности перераспределения НДС массива. Знание этих особенностей позволит правильно и эффективно осуществлять управлением разгрузкой массива горных пород с целью профилактики безопасного ведения разведочных, проходческих, очистных и строительных работ. Автором выявлено три основных временных процессов изменения НДС после взрыва, которые проходят в течение секунд, минут и часов. Первое из них это взрывное изменение НДС горного массива в течение десятков секунд, затем следующая в течение нескольких минут релаксация возбужденного состояния массива после «горного удара» и других интенсивных геодинамических проявлений. В отсутствии «горного удара» релаксация может продолжаться в течение нескольких часов. При этом возможно повторное возбуждение массива за счет протекания геодинамических смещений и проявлений, которое может длиться во времени до 17 и более часов. При этом нарастание возбужденного состояния массива может продолжаться в течение 1-2 часов с возвратом в течение часа в относительно устойчивое состояние на новом стабилизированном уровне. Для объективного представления об изменении напряженно-деформированного состояния массива, образования деструктивных зон и их развития, проявления геодинамических событий по характеристикам электромагнитной эмиссии важным является расположение зон и центров событий по отношению к месту нахождения регистраторов ЭМЭ. При проведении мониторинга выявлено, что все сейсмические события фиксируются разработанными соискателем приборами РЭМС1 и РЕМАС1 по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий.

В шестой главе приведены результаты макетирования комплексной система мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород по параметрам и характеристикам электромагнитной и акустической эмиссий, включая инфракрасное свечение скважин. На основании теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в главах 4 и 5, представлена обобщенная схема механоэлектрических преобразований в горных породах на этапах подготовки разрушения. В этой схеме отображены механизмы возникновения ЭМЭ на различных этапах развития разрушений и свершения геодинамических событий. Представлены также 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. На основании этих схем и алгоритмов уже

на стадии предварительной обработки данных мониторинга параметров и характеристик электромагнитной эмиссии горных пород можно судить о развитии деструктивных зон и геодинамических проявлений. Сделан и протестирован макет беспроводной передача данных от регистратора до удаленного компьютера диспетчера для принятия решений о продолжении работ в шахте. В помощь диспетчеру приводится алгоритм и программа математического моделирования обнаружения предвестников разрушения горных пород на этапе принятия решений с использованием временных рядов параметров электромагнитных сигналов.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет выявлять во временных рядах измерений амплитуд ЭМЭ особенности, характерные для этапа, предшествующего разрушению лабораторных образцов горных пород. Кроме того, данный алгоритм может быть успешно использован в составе программного обеспечения информационной системы, которая предназначена для мониторинга изменения НДС массивов горных пород и прогноза удароопасности по параметрам и характеристикам ЭМЭ после технологических взрывов и проведения очистных работ в рудниках.

Основные выводы по диссертационной работе:

1. По содержанию представленная диссертационная работа полностью соответствует специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, а именно формуле специальности и ряду областей исследований, перечисленных в паспорте этой специальности. Разработанные методы и аппаратура для их реализации может эффективно использоваться для контроля дефектности материалов и изделия, для контроля возникновения деструктивных зон в неметаллических гетерогенных материалах, а также для мониторинга развития геодинамических проявлений в массивах горных пород .

2. Содержание автореферата отвечает основным положениям диссертации. Обоснование защищаемых положений, основные выводы диссертационных исследований отражены в многочисленных научных публикациях А.А. Беспалько.

3. Работа содержит все элементы, присущие диссертациям на соискание доктора технических наук (теоретические и большое количество экспериментальных лабораторных и натурных исследований, создание комплексных стендов, оригинальных программно-аппаратных регистраторов РЭМС1 и РЭМАС1 и макета информационной системы на базе РЭМАС1, методические разработки, практическую значимость, апробацию результатов и т.д.).

4. Диссертация является законченной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие ее квалифицировать как разработку научно обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в безопасность ведения работ в подземных сооружениях, представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на

актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для российской науки и практики в области мониторинга природной среды, гетерогенных материалов и изделий. Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. В заключение каждой главы сделаны четкие выводы. Выводы и рекомендации обоснованы.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

5. Замечания:

- при измерении скорости продольной акустической волны образец с датчиками зажимался струбциной, по которой тоже распространяются упругие колебания, непонятно как происходило разделение волн распространяющихся по образцу и струбцине, кроме того использовался образец диаметром 4,2 мм и длиной 8 мм, при этом в образце могли возникнуть моды высших порядков, которые повлияют на точность измерения скорости продольной волны,
- при описании стенда не приведены параметры используемых излучателя и приемника, в частности резонансные частоты, поэтому сложно оценить эффективность возбуждающих импульсов разной длительности,
- некоторые рисунки в диссертации имеют плохое качество (например, рис.2.1, 2.2), кроме того есть неточности в названии, например, рис.3.4 обозначен как «эмиттерный повторитель», а приведена схема повторителя на операционном усилителе, рис.3.19 обозначен как «Структурная схема акустического канала», а в тексте диссертации – как электромагнитный канал.

Отмеченные недостатки не влияют на общее благоприятное впечатление от представленной работы.

6. На основании вышеизложенного, по актуальности решаемых задач, научному и практическому значению полученных результатов, диссертационная работа **Беспалько Анатолия Алексеевича**, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий на тему **«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО –ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД»** является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических, лабораторных и натурных экспериментальных исследований разработаны физические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научные достижения, а также изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит вклад в развитие научно-технического потенциала страны, что соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, предъявляемым к диссертациям на

соискание ученой степени доктора наук (dis.tpu.ru), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Профессор отделения электронной
инженерии Инженерной школы
неразрушающего контроля и безопасности
Национального исследовательского Томского
политехнического университета,
доктор технических наук,
г.Томск, пр.Ленина, 30,
учебный корпус №5, офис 202,
тел. +7(3822)606297, e-mail: asoldatof@tpu.ru

✓ Солдатов А.И.

«21» мая 2019 г.

Подпись А.И.Солдатов удостоверяю,
Ученый секретарь НИ ТПУ



Ананьева О.А.

