УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и инновациям
Томского политехнического университета
_____ Степанов И.Б.
«11» 03 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ).

Диссертация «Физические основы и реализация метода электромагнитной эмиссии для мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород» выполнена в Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов (ПНИЛ ЭДиП ИШ ФВП).

В период подготовки диссертации соискатель Беспалько Анатолий Алексеевич работал в Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов ТПУ в должности ведущего научного сотрудника.

В 1983 году в диссертационном совете Уральского политехнического института защитил кандидатскую диссертацию по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния. По результатам защиты была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук.

Научный консультант – Суржиков Анатолий Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, руководитель отделения контроля и диагностики Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности, а также главный научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация выполнена по актуальной теме, которая отображена в названии работы. 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. Исследования показали, что параметры и характеристики МЭП зависят от физических свойств диэлектрических материалов и горных пород, от их генетического типа и структурно-текстурных особенностей. При механоэлектрических преобразованиях параметры возникающих электромагнитных сигналов (ЭМС) и характеристики электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) несут информацию о процессах образования деструктивных зон и об изменении НДС в шахтном поле. И здесь главным является, с одной стороны, понимание физических процессов, приводящих к возникновению электромагнитных сигналов, выявление закономерностей вариаций параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при изменениях НДС и образцов, и массива горных пород. С другой стороны, важным является аппаратурная оснащенность разрабатываемых методов, которая поможет обеспечить выявление амплитудно-частотных и амплитудно-временных связей изменения НДС горных пород с изменениями параметров ЭМС и характеристик ЭМЭ при МЭП в породном массиве. Кроме того, при создании полевых аппаратно-программных комплексов учитывалась 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.

Диссертация написана грамотно. При выполнении диссертации соискатель опирался на математическое моделирование, а также на физические экспериментальные исследования горных пород в лабораторных и натурных условиях, а при разработке программно-аппаратных регистраторов учитывал достоинства и недостатки разработанных ранее приборов такого же назначения. Для исследований им применены современные методы, методики и приборы.

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.

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 механоэлектрических 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 заключается в следующем:

- 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.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработанный, изготовленный и апробированный в течение пятнадцатилетнего периода исследований программно-аппаратный регистратор типа РЭМС1 способен вести без смены и подзарядки аккумулятора в течение не менее 180 часов непрерывный мониторинг электро-магнитной 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 8·10-3 до 128·10-3 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.

Выполненная работа имеет законченный вид. Результаты работы внедрены в Таштагольском филиале ОАО «ЕвразРуда». 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.

Материалы диссертации полностью изложены в 105 работах, опубликованных соискателем в открытой печати и в журналах, рекомендованных ВАК, а более 24 публикаций цитируются в базах данных Scopus и Web of Science. Список основных публикаций:

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., Лощилов 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 ВИНИТИ 04.10.2006, № 1198-В2006. – 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., Климко 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. Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействии/ Яворович Л.В., Федотов П.И. Известия ТПУ. – 2005. – Т.308, №7. – С. 18-23.

8. Беспалько А.А. Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах при динамических воздействиях/ Суржиков А.П., Яворович Л.В. Горный журнал / Russian Journal of Non-Ferrous Metals/. – 2006. – №4. – С. 32-34.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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/matecconf/20167901039.

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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

Специальность, которой соответствует диссертационная работа - 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Диссертация «Физические основы и реализация метода электромагнитной эмиссии для мониторинга и краткосрочного прогноза изменений напряженно-деформированного состояния горных пород» Беспалько Анатолия Алексеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Заключение принято на научном семинаре Проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов ТПУ. На заседании присутствовало 18 чел. Рультаты голосования: «за» - 18 чел., «против» - нет, «воздержались» - нет, протокол № 1 от « 20 » февраля 2019 г.

Председатель научного семинара — Лысенко Елена Николаевна

Секретарь научного семинара — Власов Виталий Анатольевич