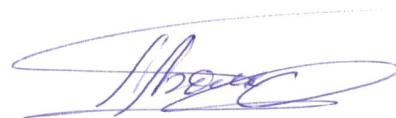


На правах рукописи



Бомбизов Александр Александрович

**АВТОНОМНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ
ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» и федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель Филатов Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Кербель Борис Моисеевич,
д-р техн. наук, профессор, Северский технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; профессор кафедры «Электроника и автоматика физических установок»

Катаев Сергей Григорьевич,
канд. физ.-мат. наук, д-р техн. наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный педагогический университет»; доцент кафедры «Общей физики»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН), г. Томск

Защита состоится “ 24 ” ноября 2015 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан “ 8 ” октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Васендина Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка месторождений полезных ископаемых подземным способом сопровождается изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород. Развитие процесса изменения НДС массива обусловлено применяемой технологией разработки, свойствами рудных тел, вмещающих пород и влечет за собой снижение уровня безопасности горных работ, окружающих промышленных, жилых и природных объектов.

В технологии добычи полезных ископаемых широко используются буровзрывные работы, которые подразумевают собой подрыв горных массивов, подготовку инфраструктуры и отгрузку породы. При массовых взрывах происходит перераспределение напряженно-деформированного состояния на большие расстояния от области взрыва. В связи с выжиданием релаксации горных массивов работы начинаются спустя несколько дней после взрыва. Время выжидания строго не определено, поэтому процессы разрушающего характера могут произойти во время начала работ, что может повлечь за собой человеческие жертвы.

Изменения свойств горных пород в результате действия механических напряжений приводит к возникновению и росту трещин, в результате чего возникают акустические эффекты и активируются источники электромагнитной эмиссии (ЭМЭ). Электромагнитная эмиссия является одним из информационных каналов, позволяющих проводить оценку изменений НДС массивов горных пород.

В настоящее время является перспективным метод контроля изменений напряженно-деформированного состояния горного массива и прогноза геодинамических событий, основанный на механоэлектрических преобразованиях в горных породах. При этом параметры возникающих электромагнитных сигналов несут информацию о процессах образования деструктивных зон, по которым можно делать выводы о происходящих изменениях НДС в шахтном поле. В связи с этим разработка аппаратно-программных средств и методов регистрации электромагнитных и акустических сигналов для мониторинга в шахте может позволить оценить изменение напряженно-деформированного состояния горных пород.

Исследования явления электромагнитного излучения твердых тел были начаты в Томском политехническом институте еще в 1970 г. Коллективом во главе с А.А. Воробьевым (А.А. Воробьев, Е.К. Заводовская, В.Н. Сальников) проведены успешные эксперименты по регистрации электромагнитной эмиссии. В 1973 г. подана заявка на регистрацию открытия «Радиоизлучение горных пород и минералов при физико-химических процессах в них». Большой вклад в развитие данной области науки внесли такие иностранные ученые А. Рабинович и В. Фрид, работы которых связаны с параметризацией электромагнитного излучения горных пород и стадийностью развития геодинамического события. Ученые из Института горного дела (ИГД) СО РАН М. В. Курленя, Г. Е. Яковицкая, Г. И. Кулаков установили в лабораторных условиях стадийность процесса разрушения, проявляющуюся в S-образной спектральной характеристике электромагнитного излучения образца горной породы.

Применение электромагнитной эмиссии в практике горного дела в значительной мере сдерживается сложностью реализации регистрирующей аппаратуры пригодной для подробного долговременного анализа сигналов от горных пород в полевых условиях. Известны разработки в данном направлении ИГД СО РАН, НИИ Горной геомеханики и маркшейдерского дела, Кузбасского государственного технического

университета. Первый автономный прибор для продолжительного мониторинга электромагнитного излучения горных пород создан в Национальном исследовательском томском политехническом университете (НИ ТПУ) под руководством А. А. Беспалько. Основными недостатками известных приборов являются: ограниченный частотный диапазон для анализа; недостаточная чувствительность; отсутствие в разработанных приборах алгоритмов выделения полезного сигнала на фоне шумов и помех; ограниченный анализ частотного распределения амплитуд электромагнитного излучения горных пород; при текущей программно-аппаратной проработке невозможно создать единую информационную систему для организации мониторинга всего шахтного поля или значительной его части по аналогии с сейсмостанциями. В связи с этим в настоящее время не существует пригодной для практического использования и реализованной в серийной аппаратуре достоверной методики определения по электромагнитному излучению напряженно-деформированного состояния горных пород и прогнозирования геодинамических событий. Поэтому создание способов и алгоритмов регистрации и выделения электромагнитных сигналов, возникающих в результате электромагнитной эмиссии массивов горных пород, является необходимым для создания распределенной системы диагностики в реальном масштабе времени напряженно-деформированного состояния горных пород и прогнозирования геодинамических событий в целях обеспечения безопасности ведения добычи полезных ископаемых подземным способом.

Цель работы. Разработка способов и алгоритмов регистрации и выделения сигналов электромагнитной эмиссии горных пород в области низких и средних частот в реальном масштабе времени с повышенной помехозащищенностью от шумов и помех и создание программно-аппаратных средств для продолжительного мониторинга и контроля изменений напряженно-деформированного состояния горных пород.

Задачи исследования:

1) Выполнить моделирование электромагнитного излучения горных пород, возникающих в шахтах в процессе геодинамических событий.

2) Разработать алгоритм обработки регистрируемого излучения для использования его в портативном автономном приборе и уменьшения объема выходных данных с обеспечением достаточной информативности для последующего анализа.

3) Создать способ частотно-временного анализа регистрируемого электромагнитного излучения с повышенной избирательностью выделения сигналов на фоне шумов и помех и оптимизировать его для применения в автономных портативных приборах.

4) Разработать программно-аппаратные средства анализа сигналов в реальном масштабе времени на месте его регистрации в процессе мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния горных пород.

5) Апробировать в лабораторных и полевых условиях разработанные программно-аппаратные средства и алгоритмы анализа в задачах исследования связи электромагнитной эмиссии с напряженно-деформированным состоянием горных пород.

Методы исследования

В процессе работы над диссертационной работой использовался комплексный подход, включающий в себя анализ научных и технических источников,

охватывающих область исследования; анализ и параметризацию исходных данных; моделирование и построение алгоритмов обработки входных данных с использованием теории вероятности и математической статистики; проведение теоретических, лабораторных и натурных исследований сигналов электромагнитной эмиссии горных пород.

Научная новизна

1. Установлено, что эффективным критерием для выявления импульсных сигналов электромагнитного излучения горных пород на фоне шумов и помех может служить определение квадрата среднеквадратичного отклонения амплитуд спектральных составляющих зарегистрированного излучения.

2. Предложен способ частотно-временного анализа электромагнитного излучения горных пород, который позволяет определять импульсные сигналы на фоне шумов и помех, и заключается в выделении тех спектральных составляющих, квадрат среднеквадратичного отклонения (СКО) амплитуды которых выше порога, отслеживающего изменения интенсивности побочного фонового шумового излучения путем расчёта среднеквадратичного отклонения квадратов СКО амплитуд спектральных составляющих, полученных на заданном интервале времени.

3. Предложен способ для сравнения и выбора оптимальной оконной функции по критерию спектрального контраста, который заключается в отношении спектральных плотностей сигналов электромагнитной эмиссии с помехой и без неё, предварительно обработанных различными оконными функциями, и по результирующей характеристике позволяет определить оптимальную оконную функцию, наилучшим образом выделяющую сигнал на фоне шумов и помех.

4. Получены аналитические выражения, позволяющие выполнять анализ входных данных в режиме потоковых вычислений, когда каждый новый обрабатываемый отсчет вносит вклад в результирующее математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение с установленным весовым коэффициентом, который определяется на основании размера анализируемой выборки и выбирается из предварительной оценки стационарности побочного фонового излучения. Это позволяет многократно сократить используемый объем оперативной памяти и время вычислений и тем самым реализовать обработку в режиме реального времени.

5. Установлено, что после обработки электромагнитного излучения предложенным способом частотно-временного анализа с низким значением порогового коэффициента, форма импульсных сигналов, возникающих при образовании трещин в рудном теле, проявляется на спектрограмме в виде вертикальных линий на фоне точечных шумовых проявлений.

Практическая ценность

1. Разработан макет регистратора электромагнитных сигналов, позволяющий автономно проводить мониторинг электромагнитного излучения горных пород в шахтных сооружениях длительностью не менее 3 суток.

2. Создан способ частотно-временного анализа электромагнитных сигналов, который сокращает объем данных при сохранении достаточной информативности как о краткосрочных, так и о долгосрочных процессах, протекающих в массивах горных пород.

3. Разработанный алгоритм частотно-временного анализа электромагнитного излучения горных пород не требует значительных вычислительных ресурсов и пригоден для использования в автономных портативных приборах.

4. Достигнутая автономность регистратора позволяет организовать в шахте

распределенную информационную систему для контроля напряженно-деформированного состояния горных пород и прогнозирования деструктивных процессов с использованием беспроводной цифровой системы связи.

Реализация и внедрение полученных результатов исследований.

Разработанный регистратор электромагнитных и акустических сигналов используется:

- в железорудной шахте в г. Таштагол Кемеровской области, входящей в состав подразделения «Евразруда», для проведения мониторинга изменения напряженно-деформированного состояния и релаксации горных пород после массового взрыва;

- в проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДиП) Национального исследовательского Томского политехнического университета для исследования эффектов электромагнитной эмиссии, происходящих в образцах горных пород.

Решения, полученные в рамках диссертационной работы, так же используются в Открытом акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» им. Академика М.Ф. Решетнёва в автоматизированной системе контроля информационных магистралей и компонентов космических аппаратов.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях и выставках:

- Всероссийская научно-техническая конференция “Научная сессия ТУСУР”, г. Томск, 2008, 2009, 2010 гг.

- Выставка научных достижений молодых ученых ТУСУРа в рамках Всероссийской научной-технической конференции «Научная сессия ТУСУР 2010».

- Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 25–29 Июля 2011 г., г. Катунь, Горный Алтай, С. 198–202.

- «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Всероссийская конф. с участием иностранных ученых, Новосибирск: Ин-т горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 2011.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что изменение квадрата среднеквадратичного отклонения амплитуд спектральных составляющих электромагнитного излучения горных пород позволяет повысить контрастность для выделения на фоне шумов и помех импульсных сигналов, соответствующих быстропротекающим геодинамическим событиям в массивах горных пород. Предложен способ частотно-временного анализа электромагнитного излучения горных пород, который заключается в выделении тех спектральных составляющих, квадрат среднеквадратичного отклонения которых выше порога, определяющего интенсивность побочного фонового излучения и рассчитанного по результатам СКО спектральных амплитуд, полученных на заданном интервале времени.

2. Предложены аналитические выражения для частотно-временного анализа электромагнитного излучения горных пород, использование которых позволяет выполнять обработку входных данных в режиме потоковых вычислений, когда каждый новый обрабатываемый отсчет вносит изменения в результирующее математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение с установленным весовым коэффициентом, который выбирается исходя из предварительной оценки стационарности подлежащего устранению побочного фонового излучения на заданном временном интервале. Это позволяет многократно сократить используемый

объем оперативной памяти и время вычислений и тем самым реализовать выполнение обработки в режиме реального времени.

3. Предложен способ выбора оконной функции для анализа сигналов электромагнитной эмиссии горных пород, основанный на сравнении по критерию спектрального контраста, который заключается в отношении предварительно обработанных различными оконными функциями спектральных плотностей сигналов с помехой и без неё и по результирующей характеристике позволяет определить оптимальную оконную функцию, наилучшим образом выделяющую сигнал на фоне шумов и помех.

Личный вклад автора. Диссертация является результатом исследований автора. Алгоритм первичной обработки и способ частотно-временного анализа разработаны лично автором. Разработка программно-аппаратного обеспечения для осуществления мониторинга шахтных сооружений выполнялась при непосредственном участии автора. Статья «Способ спектрально-временного анализа электромагнитного излучения горных пород для обнаружения предвестников геодинамических событий» написана без соавторов. Полевые исследования автором выполнялись непосредственно в железорудной шахте. Выполнено более десяти шахтных спусков.

Диссертация выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ 11-07-98000 р_Сибирь_a, РФФИ 11-07-00666а, 14-08-00395 А, а так же фонда содействия малых форм предприятий в научно-технической сфере УМНИК (НИОКР по теме: «Прибор для предупреждения обвалов горных пород в условиях шахт» // договор № КР 04_/08 от 20.02.2009 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 11 работ, в том числе 5 в журналах из перечня ВАК. Результаты диссертационной работы отражены в 3 отчетах НИОКР, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2014616038).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 188 страницы текста, 97 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 116 наименований. Приложения составляют 34 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертационного исследования, показаны научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе выполнено рассмотрение теоретических основ, связанных с возникновением электромагнитного излучения в результате геодинамических событий в горных породах. Приведен обзор методов и средств диагностики напряженно-деформированного состояния преимущественно по признакам электромагнитного излучения.

Разработка месторождений полезных ископаемых шахтным способом сопровождается изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород. Возникновение и рост трещин вызывают упругие акустические колебания в горной породе. Колебания под действием акустических волн границ неоднородностей и контактов разных пород сопровождаются электромагнитным излучением. Ранние наблюдения данного явления датируются 1933 годом (Степанов А.В.). Частотный диапазон, на котором обнаруживают электромагнитную эмиссию при разрушении горных пород, лежит в пределах от 1 кГц до 10 МГц (Bigby, D). Учеными А. Рабинович и В. Фрид велись работы связанные с

параметризацией электромагнитного излучения горных пород и стадийностью развития геодинамического события. Обнаружено, что амплитуда сигнала электромагнитной эмиссии прямо пропорциональна размеру образовавшейся трещины, от которой происходит излучение, а частота сигнала обратно пропорциональна размеру трещины (Д.Р. Хансон и др.). Таким образом, частота, на которой наблюдается сигнал, определяет какого порядка дислокации (трещины, разрушения) возникают в горных породах. Поэтому определение центральной частоты сигнала электромагнитной эмиссии играет важную роль при обнаружении самых ранних предвестников горных ударов. Известно, что перед разрушением массива пород: происходит увеличение амплитуды и интенсивности (количество импульсов за единицу времени) сигнала электромагнитной эмиссии; изменяется форма импульсов электромагнитной эмиссии (Л.В. Яворович, А.А. Беспалько); увеличивается время нарастания переднего фронта импульса; смещается максимум спектральной плотности электромагнитного излучения в область низких частот (М.В. Курленя, А.Г. Вострецов, Г.И. Кулаков, Г.Е. Яковицкая).

При наблюдении в диапазоне частот 1–100 кГц установлено, что процесс разрушения образцов горных пород на основании структуры сопутствующего электромагнитного излучения может рассматриваться как трехстадийный с последовательным изменением на несколько порядков временных интервалов между возникновением соседних импульсов (А.А. Беспалько, Л.В. Яворович).

Разработанные средства диагностики шахтных сооружений используют пороговые устройства в широком частотном диапазоне для регистрации электромагнитных импульсов. Однако, как следует из опубликованных данных, в ходе анализа для повышения достоверности выявления признаков разрушения в полной мере не учитываются возможные стационарные или квазистационарные помехи и шумы, вызванные излучением земли или техногенными факторами и их влияние на данные электромагнитного мониторинга горных пород.

В связи с этим сформулированы задачи исследований, которые заключаются в совершенствовании реализованных в известных приборах подходов к регистрации электромагнитного излучения горных пород, разработке способов выявления скрытых в фоновом излучении сигналов, соответствующих изменению состояния горного массива.

Вторая глава посвящена разработке способа и специальных алгоритмов обработки зарегистрированного электромагнитного излучения горных пород в диапазоне частот 1–100 кГц в шахтных выработках, который позволяет эффективно распознавать импульсные сигналы на фоне шумов и стационарных помех, сокращая при этом размер выходных данных, что необходимо для работы портативного, автономного прибора в течение длительного интервала времени.

Предварительно была построена приближенная модель электромагнитного излучения в шахтных сооружениях, которая использовалась для последующей проработки решений по выделению импульсных сигналов. Для этого, путем одноосного сжатия образцов горных пород были зарегистрированы электромагнитные сигналы, возникающие в моменты трещинообразования. Полученные сигналы были сопоставлены с известной моделью, что дало основание для дальнейшего моделирования электромагнитного излучения в шахтном поле. В результате параметризации смоделированы тестовые сигналы с центральными частотами 20, 50 и 80 кГц. Чтобы учесть влияние внешней среды, к тестовым сигналам добавлен аддитивный шум с амплитудой, меньшей исходного сигнала на 9 дБ и амплитудно-

модулированная помеха синусоидальной формы. Частота сигнала, имитирующего помеху, выбрана равной 3 кГц, частота несущей 50 кГц, глубина модуляции 100%. Результирующие сигналы изображены на рисунке 1.

Дальнейший анализ сигнала осуществлялся в частотно-временном представлении для рассмотрения поведения каждой спектральной составляющей независимо от соседних при условии минимального перекрытия их частотных характеристик. Такой подход может позволить разграничить рассмотрение частотных диапазонов и исключить влияние большего по амплитуде низкочастотного шума на высокочастотные составляющие сигналов в исследуемом диапазоне 1 – 100 кГц.

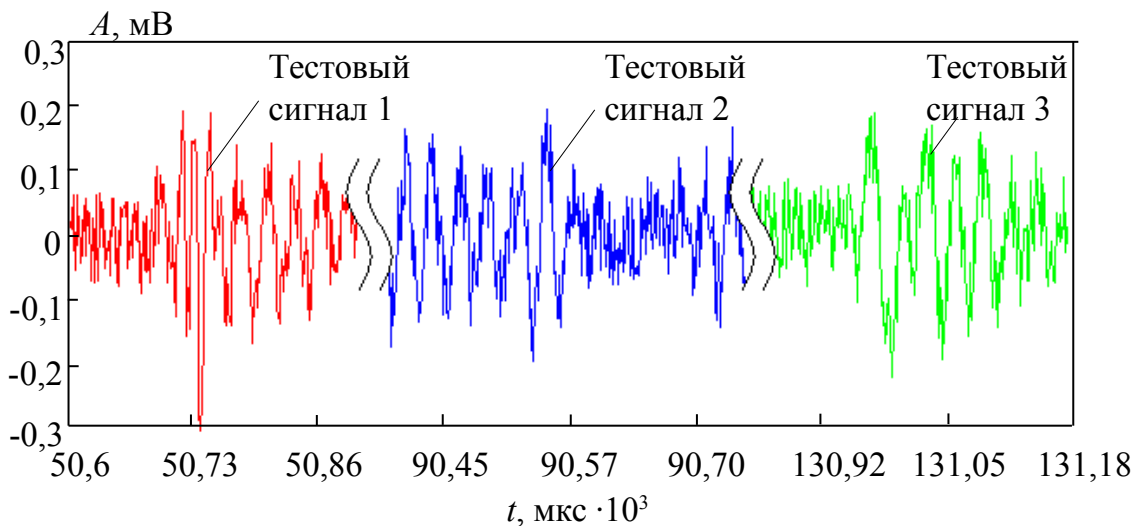


Рисунок 1 – Временная диаграмма суммы тестовых сигналов с аддитивным шумом и стационарной помехой

С учетом различных форм импульсного излучения горных пород и требований к вычислительным ресурсам портативных автономных устройств рассматривались такие способы преобразования из временной области в частотную как цифровые фильтры, вейвлет анализ и быстрое преобразование Фурье (БПФ). Наиболее предпочтительным способом выбран последний, при использовании которого выходной объем данных сокращается по сравнению с входным, оптимальное разрешение по частоте составляет 1 кГц, по времени – 1 мс при частоте дискретизации 1 МГц.

Известно, что на ограниченном интервале времени в ходе спектрального анализа с использованием БПФ в конечном спектре возникают искажения в виде эффекта Гиббса, которые представляют собой появление побочных спектральных составляющих в области точки разрыва исходного сигнала. Как правило, в спектральной обработке применяется метод взвешивания, в котором используется весовая последовательность конечной длины, называемая окном. Для устранения потерь на краях анализируемой дискретной выборки сигнала использовано 50 % наложение временных окон. В рамках работы предложен критерий оценки эффективности применения того или иного окна, который заключается в рассмотрении подавления растекания спектра сигнала, вызванного эффектом Гиббса, и сохранения признаков присутствия полезного сигнала на фоне стационарной помехи. Для каждого сравниваемого окна выполнялось отношение спектральных составляющих суммы сигнала и предполагаемой гармонической помехи к только помехе в отсутствии сигнала. Результирующая характеристика в данной работе получила название спектральный контраст и определяет степень сохранения

признаков сигнала на фоне помехи при обработке выбранным окном. При помощи предложенного критерия проведено сравнение различных оконных функций и для дальнейшего применения выбрано окно Кайзера ($\beta=9$).

В результате проведенных исследований были получены необходимые данные для создания оптимального, с точки зрения затрачиваемых машинных ресурсов и достигаемой информативности, алгоритма первичной обработки сигналов, который заключается в последовательной обработке оцифрованного сигнала выборками (D) по 1024 отсчета с наложением 50 %. Каждая выборка взвешивается окном Кайзера ($\beta=9$) и преобразуется в частотное представление при помощи БПФ. Из результирующих 512 комплексных спектральных составляющих удаляются избыточные значения от 101 до 512. Далее для нахождения спектральных амплитуд для значений 1 – 100 выполняется взятие модуля. Затем выполняется обработка следующей выборки сигнала, смещенной относительно предыдущей на 512 (наложение 50 %) временных отсчетов. При накоплении заданного числа $2 \cdot N$ (где N – параметр усреднения, который может быть установлен от 32 до 128, 2 – компенсация наложения) частотных представлений сигнала выполняется расчет математического ожидания \bar{x} и квадрата среднеквадратичного отклонения σ^2 во времени каждой спектральной амплитуды. Затем алгоритм начинается сначала до накопления заданного числа $2 \cdot N$ новых частотных представлений сигнала. Результирующие частотно-временные зависимости сохраняют признаки как о медленно протекающих процессах (\bar{x}) в горных породах, так и о быстропротекающих (σ^2).

Далее рассмотрен способ, который позволяет на фоне шума и помехи идентифицировать полезный импульсный сигнал, соответствующий геодинамическому событию в горных породах. Способ заключается в выполнении последовательности действий, связанных с обработкой математического ожидания и квадрата СКО спектральных составляющих большого массива измеренных и усредненных после первичной обработки данных.

Предварительно, перед проведением статистического анализа была проведена оценка распределения на разных частотах математического ожидания и квадрата СКО спектральных амплитуд во времени, полученных в лабораторных и шахтных условиях. Для анализа в лабораторных условиях проводились исследования электромагнитного излучения при одноосном сжатии образца. Построенные распределения \bar{x} и σ^2 спектральных амплитуд на интервале времени ~ 9 минут (до разрушения образца) составлены из 18500 отсчетов и соответствуют в большей степени нормальному распределению. В шахтных условиях размер выборки для построения распределений составлял 240000 отсчетов, что соответствовало двум часам непрерывных измерений электромагнитных сигналов. Анализируя полученные зависимости отмечено, что распределение математического ожидания спектральных составляющих имеет незначительные отклонения от нормального закона распределения. Анализ распределения квадрата СКО в шахте показал, что оно больше соответствует логарифмически-нормальному закону. Это можно объяснить тем, что в отличие от лабораторных условий в шахте имеется значительно меньше техногенных помех, вызванных сетевыми или другими пульсациями при работе бытовых и лабораторных приборов. В результате чего наблюдается более спокойная электромагнитная обстановка, выраженная в меньшем разбросе основного «колокола» распределения квадрата СКО амплитуд спектральных составляющих в шахте. В данных условиях лучше проявляются импульсы электромагнитного излучения, которые выражаются в отклонении распределения от нормального.

Далее, опираясь на статистические подходы, разрабатывался способ частотно-временного анализа на описанных ранее (рисунок 1) тестовых сигналах. Весь временной отрезок общего тестового фрагмента электромагнитного излучения составляет около ~ 500 мс. Тестовые сигналы с основными частотами 80, 50 и 20 кГц возникают от начала тестового фрагмента в моменты времени ориентировочно 50, 90 и 130 мс, соответственно. Частотно-временная зависимость тестового фрагмента электромагнитного излучения с тремя импульсами на фоне шумов и стационарной помехи изображена на рисунке 2.

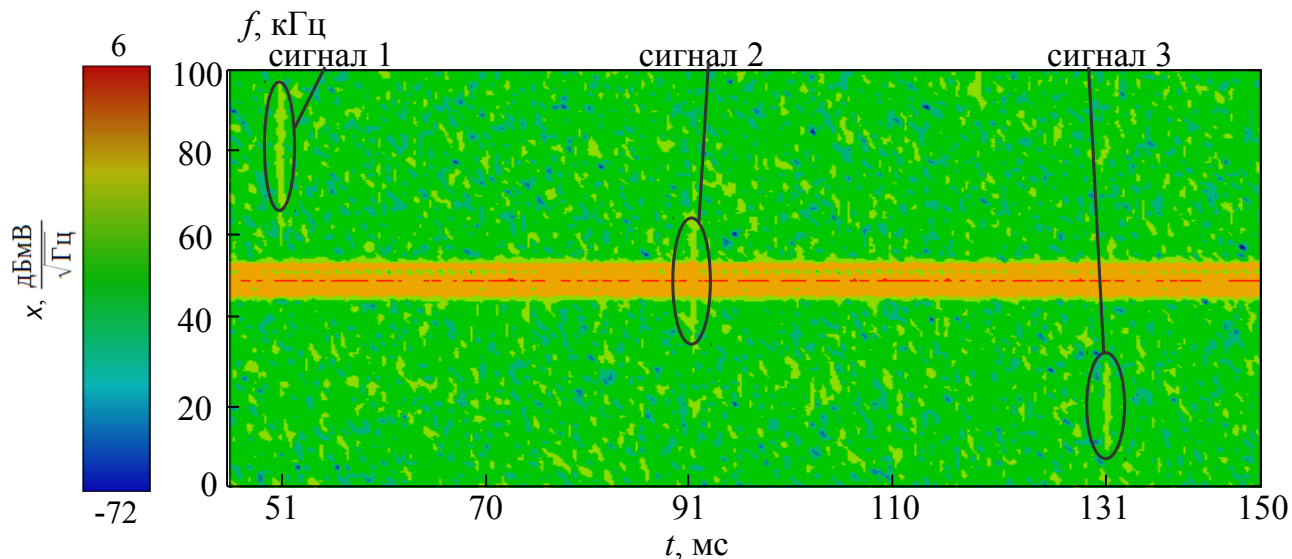


Рисунок 2 – Частотно-временная зависимость суммы тестовых сигналов с аддитивным шумом и стационарной помехой

Для выполнения статистического анализа спектрально-временного представления тестового фрагмента электромагнитного излучения получено аналитическое выражение, согласно которому из спектрограммы исключаются значения, находящиеся ниже определенного порога:

$$x'(f, t_n) = \begin{cases} x(f, t_n), & x(f, t_n) \geq k \cdot \sigma(x(f, t_{i \in [1, \max]})) \\ 0, & x(f, t_n) < k \cdot \sigma(x(f, t_{i \in [1, \max]})) \end{cases}, \quad (1)$$

где n – номер отсчета по времени; $x(f, t_n)$ – спектральная амплитуда сигнала; k – весовой коэффициент; $\sigma(x(f, t_{i \in [1, \max]}))$ – среднеквадратичное отклонение амплитуд спектральных составляющих, рассчитанное на всем временном интервале моделирования (~ 500 мс), для каждой частоты рассматриваемого диапазона.

Обработанные согласно (1) данные изображены на рисунке 3. Весовой коэффициент равен 5,5 и выбран таким образом, чтобы пороговое значение $k \cdot \sigma(x(f, t_{i \in [1, \max]}))$ было выше амплитуды шумов, но ниже спектральных компонент тестовых сигналов. Из рисунка можно сделать вывод, что зафиксирован сам факт появления тестовых сигналов как некоторых событий, нарушающих стационарность процесса. Применение в текущем виде рассмотренного подхода статистической обработки частотно-временного представления сигнала в автономном переносном приборе не является целесообразным, так как требует больших объемов как оперативной памяти для промежуточных расчетов квадратов СКО спектральных амплитуд, так и flash-памяти для сохранения результатов обработки.

Уменьшение объемов выходных данных обеспечивает разработанный алгоритм первичной обработки исходного сигнала, который преобразует дискретную форму во

временную зависимость математического ожидания и квадрата среднеквадратичного отклонения спектральных амплитуд. Исходный сигнал (рисунок 1) был обработан описанным алгоритмом с параметром $N = 32$, что обеспечило расчет математического ожидания \bar{x} и квадрата СКО σ^2 спектральных амплитуд по 64 значениям исходного сигнала с учетом 50% наложения. В результате установлено, что последующая статистическая обработка математического ожидания спектральных амплитуд при помощи выражения (1) не выявляет признаков присутствия в электромагнитном излучении импульсных сигналов. Анализируя частотно-временную зависимость квадратов СКО выявлено, что области тестовых сигналов обладают большим контрастом на фоне белого шума по сравнению с математическим ожиданием. В связи с этим сделан вывод о возможности применения статистической обработки к данной зависимости.

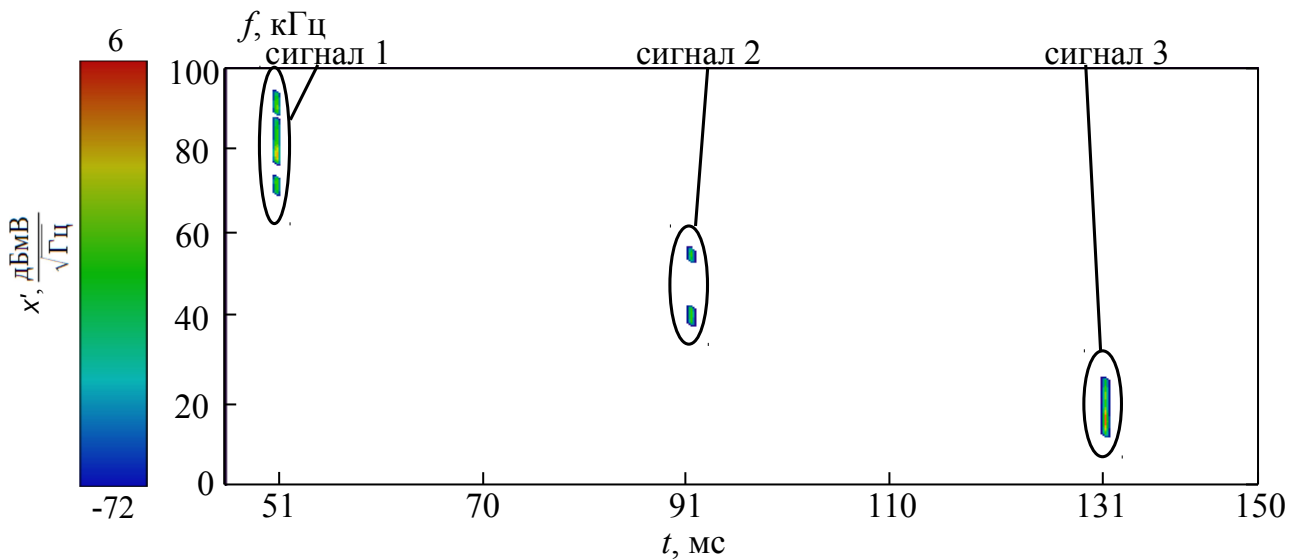


Рисунок 3 – Обработанная частотно-временная зависимость фрагмента тестового сигнала

Проведена адаптация к новым исходным данным выражения (1), которое приняло следующий вид:

$$\sigma^{2'}(f, t_n) = \begin{cases} \sigma^2(f, t_n), & \sigma^2(f, t_n) \geq k \cdot C(\sigma^2(f, t_{i \in [1, \max]})) \\ 0, & \sigma^2(f, t_n) < k \cdot C(\sigma^2(f, t_{i \in [1, \max]})) \end{cases}, \quad (2)$$

где $\sigma^2(f, t_n)$ – квадрат среднеквадратичного отклонения на ограниченном интервале времени, рассчитанный на этапе первичной обработки для каждой спектральной составляющей; $C(\sigma^2(f, t_{i \in [1, \max]}))$ – среднеквадратичное отклонение квадрата СКО амплитуд спектральных составляющих, рассчитанное на всем временном интервале моделирования (~500 мс), для каждой частотной составляющей.

Обработанные данные согласно (2) изображены на рисунке 4. Весовой коэффициент k равен 3,2; для которого аддитивные шумы и гармоническая помеха находятся ниже порога.

Использование рассмотренного выше способа анализа является затруднительным применительно к вычислительным системам для обработки больших объемов данных. Это объясняется тем, что для анализа значений квадрата СКО спектральных амплитуд $\sigma^2(f, t_n)$, полученных на ограниченном временном интервале условно бесконечного дискретного сигнала, необходимо выполнять расчет

среднеквадратичного отклонения квадратов СКО $C(\sigma^2(f, t_{i \in [1, \max]}))$, соответствующих интервалу расчета СКО. Причем для анализа следующих во времени значений $\sigma^2(f, t_{n+1})$ необходим расчет $C(\sigma^2(f, t_{i \in [1, \max]}))$ для следующего интервала. Такой подход требует большого числа математических операций и частоты обращения к памяти, причем объем используемой памяти прямо пропорционален длительности анализируемого временного интервала.

Для использования предложенного выше способа в портативных вычислительных системах выполнена его адаптация под потоковую модель вычисления, когда в обобщенном виде обработка следующего элемента данных начинается по завершении обработки текущего, причем обработка одного элемента из потока полностью не зависит от всех остальных элементов этого же потока.

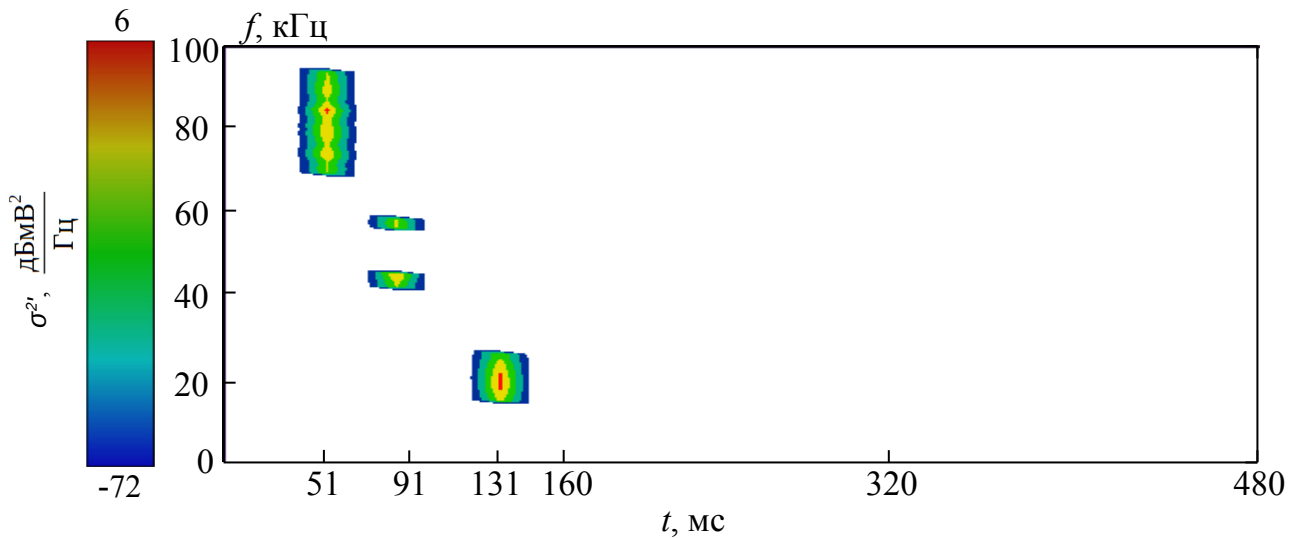


Рисунок 4 – Обработанная частотно-временная диаграмма квадрата СКО спектральных составляющих

Для этого принято, что расчет математического ожидания по формуле скользящего среднего будет сопоставим с расчетом по формуле среднего арифметического. Отсюда получено выражение для потокового расчета математического ожидания квадрата СКО амплитуд спектральных составляющих:

$$\bar{\sigma}^2(f, t_n) = \frac{\bar{\sigma}^2(f, t_{n-1}) \cdot (m-1) + \sigma^2(f, t_n)}{m}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}^2(f, t_{n-1})$ – значение математического ожидания квадрата СКО, полученное на предыдущем этапе расчета t_{n-1} для частоты f ; $\sigma^2(f, t_n)$ – значение квадрата СКО на текущем этапе расчета t_n для частоты f (входной элемент для потоковых вычислений); m – сглаживающий коэффициент, определяющий вес каждого нового значения квадрата СКО спектральной амплитуды ($\sigma^2(f, t_n)$) в результирующем математическом ожидании. Выбирается в зависимости от продолжительности стационарного участка электромагнитного излучения в частотно-временном представлении.

Для расчета СКО, используемого в (2), по аналогии с математическим ожиданием (3) сделана замена классической формулы следующим нижеприведенным выражением:

$$C(\sigma^2(f, t_n)) = \sqrt{\frac{C^2(\bar{\sigma}^2(f, t_{n-1})) \cdot (m-1) + (\bar{\sigma}^2(f, t_n) - \sigma^2(f, t_n))^2}{m}}, \quad (4)$$

где $(\bar{\sigma}^2(f, t_n) - \sigma^2(f, t_n))^2$ – квадрат разности математического ожидания (3) и

текущего значения квадрата СКО амплитуд спектральных компонент (входной элемент потоковых вычислений).

На рисунке 5 приведен результат обработки исходных данных используя выражения (2) – (4) со сглаживающим коэффициентом $m = 512$ и с весовым коэффициентом $k = 12,5$.

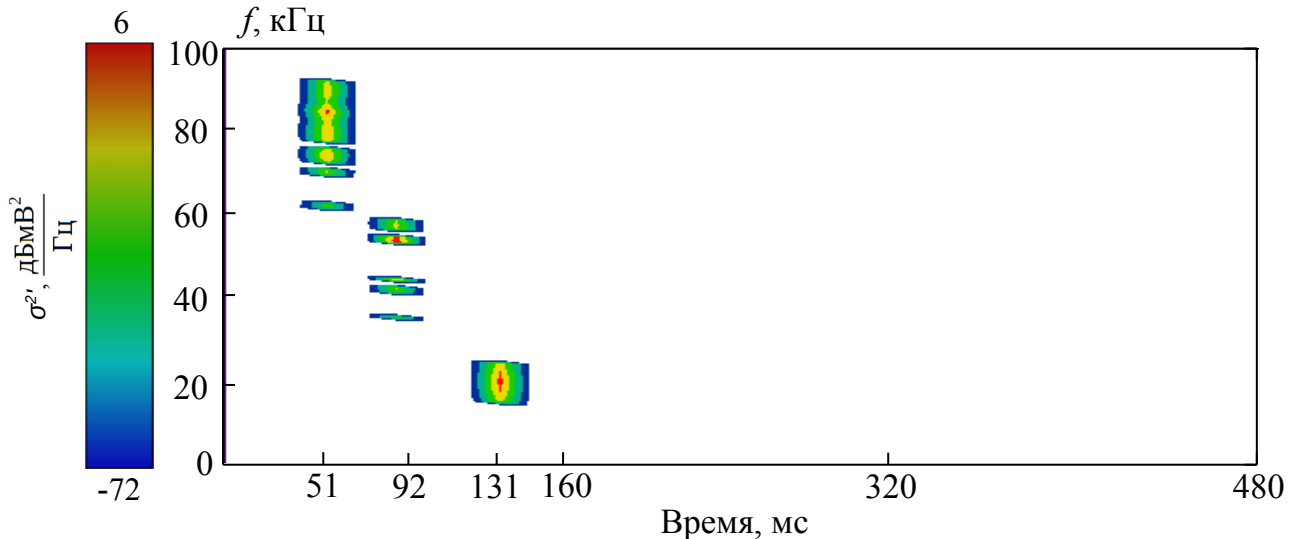


Рисунок 4 – Обработанная частотно-временная диаграмма квадрата СКО спектральных составляющих с использованием выражений (2) – (4)

После обработки видны фрагменты всех трех смоделированных импульсных сигналов. Сравнивая с рисунком 4, можно выделить небольшие потери амплитуд спектральных составляющих сигналов, но тем не менее все три сигнала обнаружены.

В третьей главе описываются созданные аппаратные и программные средства для долговременной регистрации и обработки в полевых условиях сигналов в режиме реального времени и сохранения данных на съемный носитель информации.



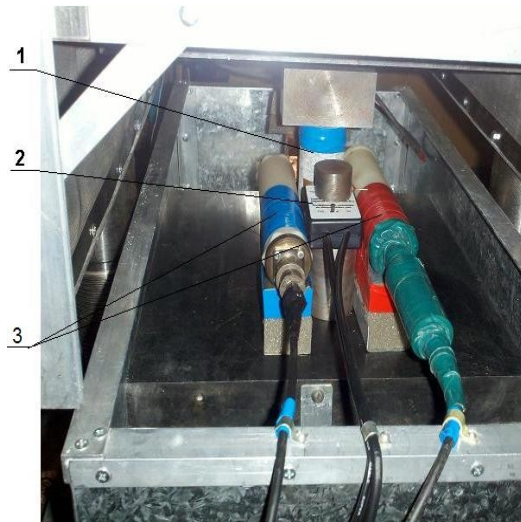
Рисунок 5 – Внешний вид регистратора

Описан разработанный амплитудно-частотный регистратор (рисунок 5), с помощью которого решается задача увеличения продолжительности записи результатов мониторинга горных пород в шахтных сооружениях. Регистратор обеспечивает прием электромагнитных и акустических сигналов (АС), их предварительную обработку и передачу во flash-память.

На рисунке 6 представлена структурная схема построенного по модульному принципу регистратора, основным элементом которого является цифровой сигнальный процессор (ЦСП), управляющий всеми периферийными модулями в квазиреальном времени и выполняющий математические расчеты.

Для логического разделения задач работа с пользовательским интерфейсом и системой обеспечения питания возложена на отдельные контроллеры. При вводе и выводе информации, в ходе первичной обработки используется клавиатура и графический жидкокристаллический дисплей. Прибор работает от аккумулятора с

выявления признаков быстропротекающих процессов в горном массиве. Для экспериментальных исследований использовался разработанный и описанный в главе 3 макет регистратора электромагнитных и акустических сигналов (РЭМАС) и созданное программное обеспечение REMASExpert.



1 – образец; 2 – емкостной датчик;
3 – индукционные датчики.

Рисунок 7 – Размещение образцов и датчиков между плитами пресса

Тестирование прибора в практически значимых работах осуществлялось на базе проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников (ПНИЛ ЭДиП) НИ ТПУ.

На программируемом прессе проводилось одноосное сжатие до разрушения образцов (рисунок 7). Длительность эксперимента составила 8,5 минут. Разработанный прибор РЭМАС устанавливался в рабочий режим, осуществляющий непрерывную регистрацию, обработку в реальном масштабе времени электромагнитных сигналов и сохранение результатов на съемный носитель. В результате получены данные (рисунок 8), отображающие формирование очагов разрушения в

позициях A_i , где $i = 1, 2, 3$ и непосредственно разрушение образца в позиции Б.

Позиции A_i можно интерпретировать следующим образом: A_1 – образование очагов разрушения в виде микротрещин; A_2 – возникновение магистральной трещины в результате объединения определенного критического количества микротрещин; A_3 – последующее разрушение материала и увеличение числа микротрещин. Помимо этого промаркированы события A_2 , значения σ^2 спектральных амплитуд которых достигли порогового значения с установленным весовым коэффициентом. На частотно-временной характеристике они представляют точечные выбросы и могут являться признаками геодинамических событий.

В ходе работы замечено, что после импульсов большой амплитуды следуют «слепые» участки некоторой длительностью, которая зависит от сглаживающего коэффициента m , используемого в выражениях (3)–(4). В связи с этим в работе были сформулированы граничные условия применения способа в реальных исследованиях. В процессе установлено, что после обработки электромагнитного излучения предложенным способом частотно-временного анализа с низким значением порогового коэффициента, форма импульсных сигналов на спектрограмме проявляется в виде вертикальных линий на фоне точечных шумовых проявлений.

Полевые работы с разработанным прибором выполнялись на входящей в состав подразделения «Евразруда» рудной шахте в городе Таштагол Кемеровской области. Периодом времени, когда наиболее часто и явно происходят геодинамические изменения, считается время выполнения массового взрыва для разработки рудного блока. Тротильный эквивалент закладываемой взрывчатки составляет 180–240 тонн. Как правило последствиями таких потрясений являются смещения целых блоков пород и образование зон повышенного напряженно-деформированного состояния пород. В связи с тем, что наибольшая электромагнитная активность наблюдается возле эпицентра взрыва, то размещение прибора выбиралось в ближайших

окрестностях от взрывных работ. В исследовательских работах расстояние от источника распространение взрывной волны до мест установки приборов составляло 70–80 метров. В целях безопасности приборы устанавливались в шахте за сутки до массового взрыва и через двое суток после взрыва снимались.

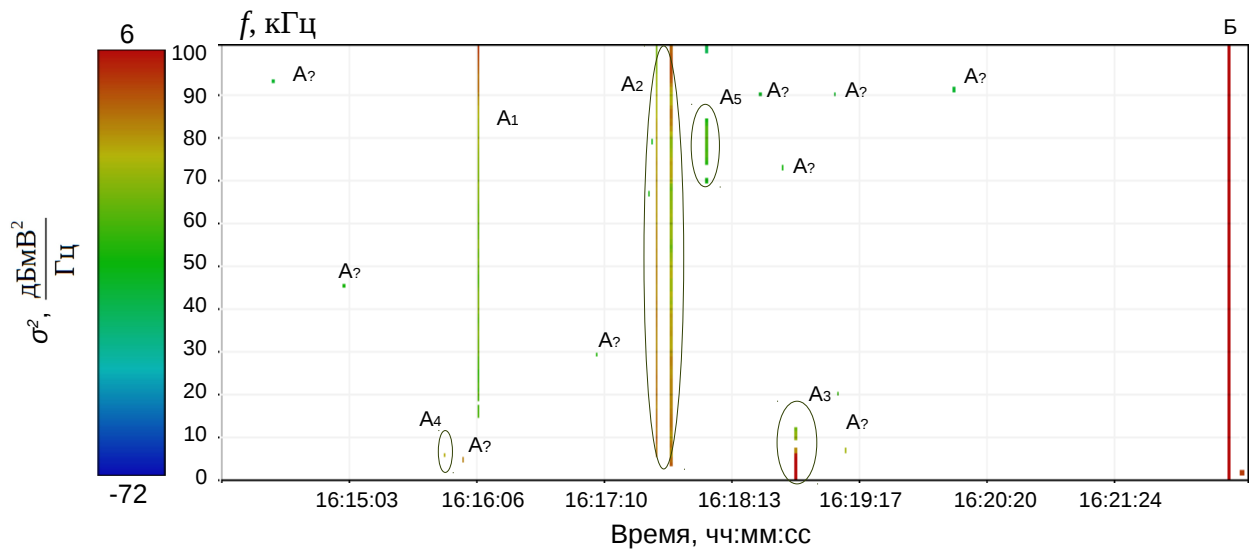


Рисунок 8 – Обработанная частотно-временная характеристика σ^2 спектральных амплитуд электромагнитного излучения индукционного датчика

В процессе испытаний в шахте был проведен эксперимент для оценки эффективности работы представленного способа частотно-временного анализа и выделения на фоне шумов и помех импульсных сигналов, соответствующих краткосрочным геодинамическим событиям. Для этого средствами самого регистратора электромагнитных сигналов была создана периодически повторяющаяся стационарная помеха, путем снятия экрана со шлейфа, соединяющего контроллер памяти и SD-карту. Длительность помехи 40–45 с, а период повторения примерно 1 м 20 с. При установке коэффициента сглаживания $m = 512$ и порогового коэффициента $k = 6,5$ помеха была устранена.

В процессе экспериментальных исследований были проведены сопоставления сейсмоактивности горных пород в шахте и их электромагнитной активности. Выявлено, что большинство импульсных сигналов коррелируют с зарегистрированной активностью размещенными в шахте сейсмодатчиками. Наблюдается разброс амплитуд зарегистрированного электромагнитного излучения и энергии подземных толчков, что обусловлено отсутствием системы датчиков, размещенных в шахтном поле и на разных глубинах. Помимо непосредственного подтверждения сейсмоактивности были зарегистрированы другие сигналы, предположительно связанные с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород, что может являться предвестником будущих геодинамических событий и, возможно, разрушений.

Заключение. Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Выявлено, что для спектральных составляющих амплитуд электромагнитных сигналов, возникающих в горных породах, распределение рассчитанных математических ожиданий представляет собой форму Гаусса и соответствует нормальному. Распределение квадрата среднеквадратичного отклонения обладает логарифмически нормальным распределением.

2. Установлено, что критерием для выявления импульсных сигналов на фоне шумов и помех может служить определение квадрата среднеквадратичного

отклонения по времени амплитуд спектральных составляющих зарегистрированного электромагнитного излучения.

3. Предложен способ сравнения оконных функций по критерию спектрального контраста, который заключается в отношении спектральных плотностей сигнала с помехой и только помехи, предварительно обработанных оконной функцией. Величина результирующей характеристики позволяет определить избирательность оконной функции при выделении сигнала на фоне помехи.

4. Разработан способ анализа, который позволяет эффективно фиксировать моменты возникновения импульсных сигналов на фоне шумов и помех.

5. Получены аналитические выражения, позволяющие выполнять анализ входных данных в режиме потоковых вычислений. Это позволяет многократно сократить используемый объем оперативной памяти и время вычислений и тем самым реализовать обработку в режиме реального времени.

6. Разработан регистратор электромагнитных и акустических сигналов, который позволяет автономно выполнять мониторинг шахтных сооружений во время и после технологических взрывов и собирать статистические данные о спектральном составе сигналов от горных пород.

7. Разработано программное обеспечение REMASExpert, которое позволяет:

а) автоматизированно производить обработку данных;
б) осуществлять быстрое перемещение в большом объеме данных, что сокращает время просмотра и анализа;

в) выполнять фильтрацию в частотном диапазоне, что позволяет отсеять состояние покоя горного массива и выделить быстро протекающие процессы.

8. Получено экспериментальное подтверждение эффективности разработанного способа для выделения на участках электромагнитной активности полезных сигналов, соответствующих геодинамическим событиям.

9. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что после обработки электромагнитного излучения разработанным способом частотно-временного анализа (глава 2) с выбранным низким значением порогового коэффициента k , спектральная форма широкополосных сигналов горных пород проявляется в виде вертикальной линии на фоне точечных шумовых проявлений. Таким образом, по данному признаку чувствительность при обработке электромагнитного излучения может быть повышена до уровня побочных шумов.

10. Установлено, что в шахтных сооружениях возможно организовать беспроводную передачу данных, что в будущем может позволить создать распределенную информационную систему для контроля напряженно-деформированного состояния горных пород и прогнозирования деструктивных процессов.

11. Результаты работы могут быть положены в основу при создании банков данных для спектрально-временного статистического анализа излучаемых импульсных сигналов, на основе которого могут быть разработаны достоверные методы прогноза деструктивных геодинамических событий.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание работы отражено в 11 работах:

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Регистратор электромагнитных сигналов для контроля изменений напряженного состояния горных пород / А. А. Беспалько, А. А. Бомбизов, А. Г. Лоцилов, Л. В. Яворович // Контроль-диагностика. – 2011. – № 11(161). – С. 14–17.

2. Бомбизов А. А. Автономный регистратор электромагнитных и акустических сигналов для мониторинга шахтных сооружений / А.А. Бомбизов, А.А. Беспалько, А.Г. Лоцилов // Приборы и техника эксперимента.–2013.– №1.– С. 141–143.

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

4. Бомбизов А. А. Способ спектрально-временного анализа электромагнитного излучения горных пород для обнаружения предвестников геодинамических событий // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.– 2014.– №1(31), ч.1.– С. 69–74.

5. Бомбизов А. А. Критерий выбора оконной функции для задач частотно-временного анализа электромагнитного излучения горных пород / Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.– 2015.– №1(35), ч.1.– С. 24–27.

Статьи и материалы конференций:

1. Полевой автономный регистратор для мониторинга и анализа электромагнитных и акустических сигналов горных пород в условиях шахт / А. А. Беспалько, П. И. Федотов, Н. Н. Хорсов, А. А. Бомбизов, А. Г. Лоцилов, Н. Д. Малютин, А. Ф. Пустовойт // Научная сессия ТУСУР.– 2008.– №1.– С. 100–103.

2. Мониторинг и диагностика деструктивных зон в образцах горных пород по параметрам электромагнитных сигналов и характеристикам электромагнитной эмиссии / А.А. Беспалько, Л.В. Яворович, П.И. Федотов, А.А. Бомбизов // I Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest 25–29 Июля 2011 г., г. Катунь, Горный Алтай.– С. 198–202.

3. Амплитудно - частотный регистратор электромагнитных и акустических сигналов для натурных исследований в условиях рудников / А. А. Беспалько, Т. Х. Бибииков, А. А. Бомбизов, А. Г. Лоцилов, П. И. Федотов, Л. В. Яворович // «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Всероссийская конф. С участием иностранных ученых (2011; Новосибирск). Труды Всероссийской конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», посвященной 80-летию ак. М.В. Курлени (с участием иностранных ученых (3–6 октября 2011 г.). В II т. Т. II.– Новосибирск: Ин-т горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН.– 2011.– С. 217–221.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Бомбизов А. А.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).– № 2014616038; заявл. 12.03.2014; опубл. 10.06.2014.