

На правах рукописи



Луковенкова Ольга Олеговна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ
ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
НА БАЗЕ РАЗРЕЖЕННОЙ АППРОКСИМАЦИИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, в лаборатории акустических исследований

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент,
Тристанов Александр Борисович

Официальные оппоненты:

Дюк Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, лаборатория биомедицинской информатики, ведущий научный сотрудник

Егоров Владимир Викторович, кандидат технических наук, ПАО «Российский институт мощного радиостроения», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Камчатский государственный технический университет», г. Петропавловск-Камчатский

Защита диссертации состоится 21 июня 2017 года в 15-30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.01 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета или на сайте <http://www.eltech.ru/>

Автореферат разослан 20 апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.238.01



Щеголева Надежда Львовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Подготовка землетрясения является длительным процессом и состоит из нескольких этапов. Первый из них обусловлен накоплением упругой потенциальной энергии в гипоцентральной области, его продолжительность растет с магнитудой готовящегося землетрясения и может измеряться годами. Следующий этап характеризуется пластическими подвижками, образованием микротрещин, форшоками, длится от нескольких часов до нескольких суток, и заканчивается образованием магистрального разрыва, т.е. очага землетрясения. Именно на этом этапе в различных физических полях на расстояниях сотен километров от готовящегося землетрясения наблюдаются краткосрочные предвестники. Несмотря на большое количество работ, посвященных прогнозу сейсмических событий, эта задача современной науки до сих пор не решена. С 1999 года в сейсмоактивном регионе полуострова Камчатка лабораторией акустических исследований ИКИР ДВО РАН ведется непрерывный мониторинг сигналов акустической эмиссии (АЭ). Акустическая эмиссия представляет собой упругие колебания, возникающие в ответ на деформации окружающей среды, при этом характеристики возникающего импульсного излучения напрямую зависят от свойств происходящих пластических процессов. АЭ звукового диапазона, возникающую при деформации горных пород, принято называть мезомасштабной или геоакустической эмиссией (ГАЭ). Исследования, проведенные ИКИР ДВО РАН, показали, что частота следования импульсов ГАЭ зависит от динамики деформационного процесса, наибольшая частота следования импульсов имеет место во время сильных возмущений, предшествующих сейсмическим событиям. Геоакустические сигналы представляют большой интерес при исследовании пластических процессов, связанных с устойчивостью ландшафтов и формированием предвестников землетрясений. По частотному составу сигнала ГАЭ можно определять масштаб порождающего сигнал источника и оценивать расстояние от него до пункта регистрации.

Для анализа и обработки АЭ в различных частотных диапазонах используются частотные и частотно-временные преобразования, наиболее популярные – оценка спектральной плотности мощности дискретным преобразованием Фурье, спектрограммы, построенные с помощью оконного преобразования Фурье или квадратичного преобразования Вигнера-Вилля. Однако процесс исследования ГАЭ данными методами сталкивается с рядом трудностей:

- широкий динамический диапазон регистрируемых сигналов сопряжен с огромными объемами регистрируемой информации, требующими специальных методов хранения, передачи, обработки и анализа;

- существенная неоднородность природных сред и плохое распространение в них упругих колебаний приводит к сильному искажению и ослаблению сигналов, которое ограничивает возможности дистанционных методов исследования;

- в деформационных процессах часто возникают критические процессы, проявляющиеся в резких изменениях интенсивности и направления ГАЭ;

- аномалии четко локализованы по времени, поэтому анализ только в частотной области не предоставляет полной информации о сигналах и не учитывает частных особенностей;

- сильная зашумленность как природными, так и техногенными шумами осложняет анализ внутренней (морфологической) структуры импульсов;

- широкое разнообразие временных форм сигналов осложняет задачу классификации и требует применения адаптирующихся под конкретный сигнал методов анализа;

- главным препятствием для анализа частотно-временной структуры импульсов является их короткая длительность, приводящая к плохому частотно-

временному разрешению. Длительность одиночного импульса не превосходит 200 мс, в среднем составляет около 50 мс при частоте регистрации 48 кГц, что составляет 2400 отсчетов.

В 2011 году для моделирования геоакустических сигналов лабораторией акустических исследований ИКИР ДВО РАН был впервые использован активно развивающийся метод разреженной аппроксимации, позволяющий строить компактные представления по большому в общем случае линейно зависимому набору функций.

Представленная работа посвящена разработке новой описательной модели импульсных сигналов, построенной на основе разреженных аппроксимационных схем, раскрывающей внутреннюю частотно-временную структуру импульса, и настройке данной модели под общие и частные особенности отдельных импульсов ГАЭ.

Работа является актуальной в рамках задач разработки систем мониторинга природных сред в целях обеспечения безопасности населения и хозяйственных объектов при возникновении природных и техногенных катастроф.

Цель исследования – разработка и анализ модели импульсного сигнала, построенной на основе разреженного представления и раскрывающей внутреннюю частотно-временную структуру, на примере сигналов ГАЭ.

Для достижения цели были решены следующие **задачи**:

1) выполнен аналитический обзор методов частотно-временного анализа импульсных сигналов;

2) изучена природа и особенности геоакустических сигналов, выполнен обзор методов регистрации и предварительной обработки;

3) разработана модель импульсного сигнала на базе разреженных аппроксимационных схем, учитывающая особенности природы генерации реальных сигналов;

4) выбран и обоснован словарь функций, обеспечивающий адекватное описание сигнала эмиссии для алгоритмов разреженной аппроксимации;

5) разработан алгоритм идентификации модели импульсного сигнала на базе алгоритма согласованного преследования, решающий задачу разреженной аппроксимации с достаточной точностью;

6) разработан модифицированный алгоритм адаптивного согласованного преследования, обеспечивающий высокую разрешающую способность в условиях ограниченных вычислительных ресурсов;

7) разработан программный комплекс для анализа импульсных сигналов методами разреженной аппроксимации, включающий подсистемы генерации словарей, генерации сигналов, моделирования и визуализации в частотно-временной области;

8) проведено исследование предложенных модели и алгоритмов на реальных и модельных сигналах для оценки их эффективности.

Объектом исследования диссертационной работы являются импульсные сигналы ГАЭ.

Предметом исследования диссертационной работы является модель отдельного импульса ГАЭ, построенная на базе разреженных аппроксимационных схем.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы цифровой обработки сигналов (частотно-временные преобразования, цифровая фильтрация и спектральный анализ сигналов), методы решения оптимизационных задач, методы разреженной аппроксимации, методы математической статистики, а также математическое и компьютерное моделирование.

Методология исследования включает в себя

1) анализ существующих методов обработки импульсных сигналов;

2) анализ методов решения задачи разреженной аппроксимации в обработке сигналов;

3) применение метода согласованного преследования, решающего задачу разреженной аппроксимации, для моделирования и анализа импульсных геоакустических сигналов;

4) проведение серии экспериментов по моделированию импульсов ГАЭ с помощью разработанных модели, алгоритмов и программного комплекса на модельных и реальных сигналах;

5) анализ результатов экспериментальной работы.

Научную новизну работы составляют следующие положения:

1) впервые предложена модель импульсного сигнала на базе разреженного представления, отличающаяся адекватным физической природе описанием структуры сложного импульса и позволяющая описывать сигналы короткой длительности;

2) впервые применен метод разреженной аппроксимации для анализа геоакустических сигналов, использующий комбинированные словари и позволяющий с высокой степенью детализации описывать импульсные сигналы малым числом компонент модели;

3) предложена новая модификация алгоритма согласованного преследования, позволяющая повысить точность разреженной аппроксимации за счет применения численного метода типа покоординатного спуска для итерационного уточнения структуры словаря и отличающаяся высокой разрешающей способностью и вычислительной эффективностью в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Практическую значимость представленной диссертационной работы составляют следующие положения:

1) разработан и зарегистрирован программный комплекс MPCComplex, реализующий алгоритмы анализа импульсных сигналов. Данное программное обеспечение может быть использовано для анализа широкого спектра сигналов импульсной природы. MPCComplex внедрен в лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН на этапе постобработки данных периодов возмущения ГАЭ;

2) получены параметры модели геоакустических сигналов, которые могут использоваться для выделения и классификации импульсов эмиссии;

3) на базе модели разработан алгоритм фильтрации и очистки сигналов от техногенных шумов.

На защиту выносятся следующие основные **положения**:

1) модель импульсного сигнала на базе разреженной аппроксимационной схемы и алгоритм ее идентификации;

2) адаптивный алгоритм согласованного преследования с использованием численного метода типа покоординатного спуска для итеративного уточнения структуры словаря;

3) численная схема расчета адаптивного алгоритма согласованного преследования;

4) программный комплекс анализа и моделирования импульсных сигналов.

Апробация работы

Результаты по теме диссертационной работы обсуждались и докладывались на научных семинарах СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ИКИР ДВО РАН, КамГУ им. В.Беринга.

Работа выполнена в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг., Программами фундаментальных научных исследований Президиума РАН «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы», ОФН РАН «Фундаментальные основы акустической диагностики

искусственных и природных сред», научными темами и планами работ ИКИР ДВО РАН. Работа частично выполнена в рамках гранта Президиума ДВО РАН «Разработка нового подхода к исследованию акустической эмиссии на основе метода разреженной аппроксимации», № 12-III-A-02-030.

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1) 15, 16, 17, 18-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA'2013, DSPA'2014, DSPA'2015, DSPA'2016), г. Москва, 2013-2016 гг.;

2) VI международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» ИКИР ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, 2013 г.;

3) Мероприятии Объединенных конференций IVESC-ICEE-ICSTPEA-BDO-2014 (ICSTPEA, The International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications), г. Санкт-Петербург, 2014 г.;

4) 9-м Открытом немецко-российском семинаре «Распознавание образов и понимание изображений – OGRW-9-2014», г. Кобленц, Германия, 2014 г.;

5) Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2015, SCM'2016), С.-Петербург, 2015-2016 гг.;

6) Региональной конференции «Теория и практика современных гуманитарных и технических наук», г. Петропавловск-Камчатский, 2016 г.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ: в том числе 4 из списка изданий, рекомендованных ВАК (из них 1 статья индексируется в базе WoS), 3 статьи в российских рецензируемых журналах, включенных в базу РИНЦ, 10 докладов в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций (из них 3 доклада, индексируемых в базе Scopus). Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 117 наименований. В работе содержится 130 страниц машинописного текста, 78 рисунков, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определяется актуальность темы исследования, цель, задачи, новизна работы, практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе рассматриваются вопросы частотно-временного анализа импульсных сигналов, формулируется понятие импульсного сигнала, излагаются основные положения теории генерации ГАЭ, как примера импульсного сигнала, приводится сравнительная характеристика классических методов частотно-временного анализа на примере геоакустических сигналов. Обосновывается необходимость разработки новых методов анализа для коротких импульсов ГАЭ.

В **разделе 1.1** показано, что АЭ представляет собой импульсный сигнал, амплитуда и частота следования импульсов которого в различные моменты времени зависит от стадии деформационного процесса. Типичный сигнал эмиссии складывается из последовательности релаксационных импульсов с различным ударным возбуждением и частотным заполнением. Форма импульса напрямую зависит от источника деформации, как правило, импульс имеет крутой фронт и длительный период затухания. В зависимости от масштабов порождающих процессов выделяют три области исследования: коротковолновая область, длинноволновая область и мезомасштабный диапазон. Мезомасштабную АЭ называют ГАЭ. Геоакустические сигналы соответствуют звуковому диапазону

частот и возникают вследствие взаимодействия микро- и макро- дислокаций, поэтому эмиссия звукового диапазона представляет большой интерес при исследовании пластичных процессов в природных средах, связанных с устойчивостью природных ландшафтов и с формированием предвестников землетрясений различной природы. Частота следования импульсов в спокойные периоды составляет единицы в секунду, а во время возмущений эмиссии, предшествующих сейсмическим событиям, достигает десятков или даже сотен в секунду, что показывает важность разработки средств анализа данных сигналов в рамках программы предотвращения природных катастроф. Далее изложена основная информация о средствах регистрации геоакустических сигналов на полуострове Камчатка и характерные особенности импульсного излучения сигналов данного вида.

Раздел 1.2 посвящен сравнительной характеристике подходов частотно-временного анализа импульсных сигналов и их применению к анализу сигналов ГАЭ. Геоакустические сигналы описывают нестационарные процессы, поэтому важнейшей задачей исследования является анализ внутренней структуры сигналов в частотно-временной области и выявление аномальных шаблонов поведения. Часто для решения подобных задач, в том числе и для импульсных сигналов, в различных областях науки используются классические методы частотно-временного анализа. Раздел включает теоретический обзор классических методов частотно-временного анализа нестационарных сигналов. Показаны недостатки использования ряда интегральных частотно-временных преобразований для анализа структуры коротких импульсных сигналов на примере сигналов ГАЭ: преобразования Фурье, методов периодограмм и коррелограмм, параметрических методов спектрального анализа, методов, основанных на анализе собственных векторов и значений матрицы ковариаций, оконного преобразования Фурье, вейвлет-преобразования, вейвлет-пакетов, преобразования Вигнера-Вилля. Особое внимание уделено проблеме частотно-временной локализации базисных функций и избыточности результатов анализа.

Вторая глава посвящена основному инструменту диссертационного исследования – разреженной аппроксимации (РА) и обоснованию возможности его применения к исследованию импульсных сигналов, в частности сигналов ГАЭ.

Раздел 2.1. посвящен постановке задачи РА. Разреженное представление – это модель сигнала, представляющая собой линейную комбинацию элементарных функций (атомов), выбранных из некоторого набора (словаря), и содержащая

минимально возможное количество атомов в разложении, т.е. $s(t) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m g_m(t)$, где

$\|a\|_0 \rightarrow \min$, $g_m(t)$ берется из некоторого словаря D .

В отличие от методов классического частотно-временного анализа, порождающих избыточные разложения сигналов, включающие все элементарные функции из предложенного словаря, РА, не теряя в точности, строит компактные представления, состоящие лишь из наиболее значимых элементарных функций. Еще одним преимуществом подхода РА является возможность разложения сигналов по наборам неортогональных в общем случае функций, принадлежащих разным семействам, что обеспечивает широкие возможности для интерпретации моделей сигнала и объяснения физики процессов генерации сигналов. Ввиду сложности минимизации числа нулевых элементов разложения не существует алгоритма, способного решить задачу РА за полиномиальное время.

Два самых распространенных подхода к решению задачи РА – замена минимизации l_0 -нормы минимизацией l_1 -нормы и замена минимизации l_0 -нормы ее ограничением.

В разделе 2.2 сравниваются два подхода к решению задачи РА: преследование базиса (Basis Pursuit, BP) и согласованное преследования (Matching Pursuit, MP).

Раздел 2.3 посвящен выбору словаря для РА сигналов ГАЭ. Словарь должен быть подобран таким образом, чтобы обеспечивать наилучшее качество аппроксимации. Аппроксимации одного и того же сигнала на различных словарях будут отличаться как по разреженности, так и по точности. Так как главной задачей исследования импульсов ГАЭ является анализ их внутренней структуры, то выбор словаря должен быть обоснован так же и с физической точки зрения.

Для сигналов ГАЭ было рассмотрено два словаря: словарь, составленный из масштабированных, сдвинутых по времени и модулированных функций Гаусса (словарь Габора) и словарь – из функций Берлаге (словарь Берлаге). Атомами словаря Габора (1), имеющими наименьшую площадь частотно-временного окна, могут быть описаны импульсы ГАЭ в первом приближении.

$$g(t) = A \cdot \exp\left(-\left(B_{\text{lim}}(T_{\text{end}}) + \Delta\right) \cdot t^2\right) \cdot \cos(2\pi ft), \quad -T_{\text{end}}/2 \leq t \leq T_{\text{end}}/2, \quad (1)$$

где A – амплитуда, выбирается таким образом, чтобы атом был нормирован $\|g(t)\|=1$, $A > 0$; T_{end} – длина атома; $B = B_{\text{lim}} + \Delta$ – параметр, отвечающий за скорость затухания огибающей, $B > 0$; B_{lim} – критическое значение параметра B , вычисляется относительно T_{end} т.о., чтобы на границе области определения амплитуда импурса составляла не более 5% от максимального значения; f – частота заполняющей гармоники в Гц; Δ – приращение параметра B относительно критического значения.

Функции Берлаге обладают схожей временной формой с типовыми импульсами ГАЭ: во-первых, и импульс ГАЭ, и функция Берлаге несимметричны, во-вторых, имеют короткий передний фронт и длительный срез. Атом словаря Берлаге может быть аналитически описан в виде (2).

$$g(t) = A \cdot t^{n_{\text{lim}}(T_{\text{end}}, t_{\text{max}}) + \Delta} \cdot \exp\left(-\left(n_{\text{lim}}(T_{\text{end}}, t_{\text{max}}) + \Delta\right) / t_{\text{max}} \cdot t\right) \cdot \sin(2\pi ft), \quad 0 \leq t \leq T_{\text{end}}, \quad (2)$$

где A – амплитуда, выбирается таким образом, чтобы атом был нормирован $\|g(t)\|=1$, $A > 0$; T_{end} – длина атома; t_{max} – положение максимума огибающей; $n = n_{\text{lim}} + \Delta$ – параметр, отвечающий за скорость затухания огибающей, $n > 0$; n_{lim} – критическое значение параметра n , вычисляется относительно T_{end} и t_{max} т.о., чтобы на границе области определения амплитуда импульса составляла не более 5% от максимального значения; f – частота заполняющей гармоники в Гц; Δ – приращение параметра n относительно критического значения.

Для предложенных словарей экспериментальным способом подобраны наиболее вероятные диапазоны $[p_i^0; p_i^{\text{end}}]$ для параметров p_i (T_{end} , t_{max} , Δ и f), однозначно определяющих атомы словаря, т.е. $P(p_i \in [p_i^0; p_i^{\text{end}}]) \approx 0.9$.

В ходе серии экспериментов показано, что словарь Берлаге строит более точные аппроксимации для сигналов ГАЭ.

Раздел 2.4 посвящен сравнению эффективности применения различных алгоритмов РА для анализа сигналов ГАЭ. В разделе подробно описан ход вычислительного эксперимента. Показано, что наибольшую эффективность при анализе сигналов ГАЭ показали алгоритмы группы согласованного преследования OMP (Orthogonal Matching Pursuit), MP и gOMP (generalized Orthogonal Matching Pursuit). Выбор между этими тремя алгоритмами определяется требованиями исследователя: самый быстрый алгоритм – gOMP, самое точное решение предоставляет OMP, MP – «золотая середина».

В разделе 2.5. обоснован выбор РА в качестве метода анализа геоакустических сигналов. Из всех рассмотренных в первой и второй главах методов анализа сигналов РА лучше всего отражает физику самого процесса, а полученные представления не зависят от длительности анализируемых сигналов и качества частотно-временного разрешения. Согласно исследованию, описанному в разделе 2.4, можно заключить, что решения, полученные методом согласованного

преследования, обладают лучшей разреженностью и большей точностью по сравнению с решениями, полученными другими алгоритмами, сами алгоритмы требуют меньше вычислительных затрат, и следовательно, их использование в системах анализа сигналов ГАЭ является целесообразным и эффективным. Учитывая эти факторы, в основу разрабатываемой модели импульса ГАЭ был положен метод согласованного преследования, предложенный S.Mallat и Z.Zhang.

$$\begin{cases} R_0(t) = s(t), \\ (m, h) = \arg \left[\max_{k,j} \left| \langle g_k(t - \tau_j), R_i(t) \rangle \right| \right], \\ R_{i+1}(t) = R_N(t) - \langle g_m(t - \tau_h), R_i(t) \rangle \cdot g_m(t - \tau_h). \end{cases} \quad (3)$$

Третья глава посвящена описанию модели импульсного сигнала на базе разреженных аппроксимационных схем на примере импульсов ГАЭ. В самом общем случае математическое описание геоакустического импульса $x(t)$ представляет собой сумму шума $\varepsilon(t)$ и некоторой функции $s(t)$, аналитическое выражение которой неизвестно, $x(t) = s(t) + \varepsilon(t)$, $\|\varepsilon(t)\| \ll \|s(t)\|$.

Пусть функция $s(t)$, описывающая «чистый» сигнал, принадлежит линейному нормированному пространству $L^2(\mathbb{R})$. Из-за сложности внутренней структуры импульсов ГАЭ функция $s(t)$ трудно представима в аналитическом виде, однако ее можно аппроксимировать рядом функций из $L^2(\mathbb{R})$

$$s(t) \approx \sum_{m=0}^{N-1} a_m g_m(t). \quad (4)$$

Для того чтобы аппроксимация (4) была разреженной необходимо выполнение условия $\|a\|_0 \rightarrow \min$.

Пусть имеется запись импульса ГАЭ $x(t)$ на промежутке времени $[t_1, t_L]$ и словарь D функций, удовлетворяющих условиям

- (1)' частотно-временные атомы словаря $g(t)$ принадлежат линейному нормированному пространству $L^2(\mathbb{R})$;
- (2)' система функций D избыточна, $|D| = M$;
- (3)' атомы $g(t)$ представляют собой сдвинутые по времени, модулированные функции Гаусса (1) и Берлаге (2). Каждый атом однозначно определяется набором параметров \vec{p} : частотой f ; параметрами, влияющими на форму огибающей импульса: тип функции, n , B ; т.е. существует однозначное отображение $\Phi: \vec{p} \rightarrow g(t; \vec{p})$;
- (4)' атомы нормированы $\|g(t)\| = 1$.

Тогда для «чистого» сигнала $s(t)$ можно построить разреженное представление по словарю D

$$\begin{cases} s(t) = \sum_{m=0}^{N_1-1} a_m g_m(t; \vec{p}) + R_{N_1}, \quad t_1 \leq t \leq t_L \\ \|R_{N_1}\| \rightarrow \min \\ N_1 \rightarrow \min \end{cases}$$

где a – вектор коэффициентов разложения, $g_m(t) \in D$ – выбранные из словаря D частотно-временные атомы, R_{N_1} – невязка, N_1 – число ненулевых элементов разложения ($N_1 \ll M$).

На практике шумовая составляющая $\varepsilon(t)$ достаточно сильна и для нее также можно построить РА. Тогда регистрируемый сигнал $x(t)$ может быть описан следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{l} x(t) = \sum_{i=0}^{N_1-1} \alpha_i g_i(t; \vec{p}) + \sum_{j=N_1}^{N_1+N_2-1} \beta_j g_j(t; \vec{p}) + R_N, \quad t_1 \leq t \leq t_L \\ \|R_N\| \rightarrow \min \\ N_1 + N_2 \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (5)$$

здесь $g_i(t; \vec{p})$ – атомы, аппроксимирующие импульс, $g_j(t; \vec{p})$ – атомы, аппроксимирующие паразитную составляющую импульса. Величина N_1 характеризует сложность структуры импульса, N_2 – зашумленность импульса. Невязка R_N определяет степень соответствия разложения реальному сигналу $x(t)$, при этом

$$\left\| \sum_{j=N_1}^{N_1+N_2-1} \beta_j g_j(t; \vec{p}) \right\| < \left\| \sum_{i=0}^{N_1-1} \alpha_i g_i(t; \vec{p}) \right\|,$$

$$\|R_N\| \ll \left\| \sum_{i=0}^{N_1-1} \alpha_i g_i(t; \vec{p}) \right\|.$$

Идентификация модели (5) осуществляется методом согласованного преследования (3). На рисунке 1 изображен процесс моделирования сигнала во временной и частотно-временной областях.

Представленная модель впервые предложена для описания геоакустических импульсов. Главными достоинствами модели являются:

- отражение физики генерации геоакустического сигнала: импульс ГАЭ представляет собой сумму импульсов, соответствующих элементарным подвижкам и деформациям;
- в общем случае возможность включения в словарь функций, принадлежащих различным семействам, в случае дискретного времени – возможность включения часто встречающихся элементарных шаблонов, не имеющих аналитического описания;
- уход от избыточности представления сигналов, как следствие – сокращение размерности признакового пространства;
- уход от фиксированного разбиения частотно-временной области;
- возможность использования модели для анализа других импульсных сигналов при условии выбора физически обоснованного словаря.

В разделе 3.2 показано, что использование для моделирования комбинированного словаря, составленного как из функций Гаусса (1), так и из функций Берлаге (2), позволяет повысить точность аппроксимации. Функции Берлаге подходят для описания элементарных импульсов ГАЭ, а функции Гаусса, обладающие минимально возможной площадью частотно-временного окна, хорошо аппроксимируют шум (рисунок 2).

В разделе 3.3 описана модификация классического алгоритма согласованного преследования, позволяющая строить качественные аппроксимации в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, – адаптивное согласованное преследование (Adaptive Matching Pursuit, AMP). Данный алгоритм предложен в качестве метода идентификации модели (5).

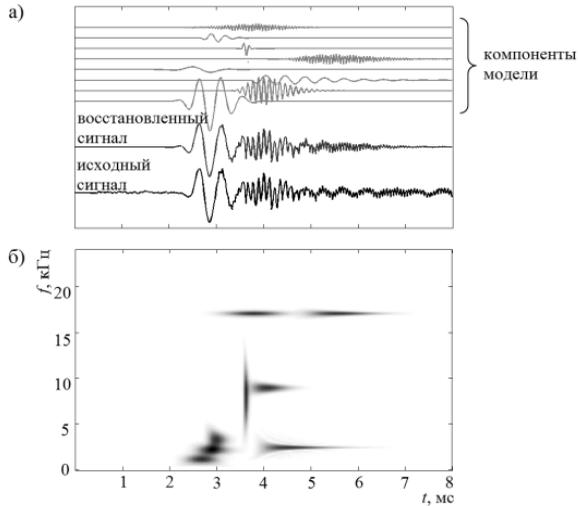


Рисунок 1 – Моделирование сигнала а) во временной и б) частотно-временной областях

Одним из главных недостатков классического алгоритма согласованного преследования (3) является его высокая вычислительная сложность. Наиболее простым способом повышения качества аппроксимации является расширение словаря, включение в него новых атомов с параметрами из выбранных диапазонов. Однако для алгоритма согласованного преследования увеличение размерности словаря сопряжено со значительными затратами временных и пространственных вычислительных ресурсов.

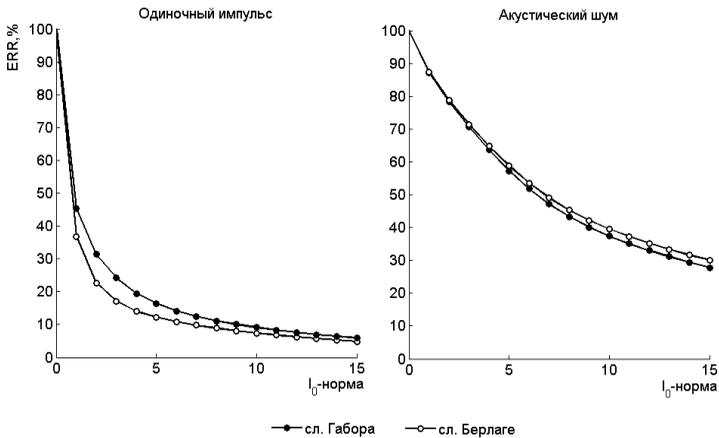


Рисунок 2 – Спад ошибки аппроксимации для словарей Габора и Берлаге

Самой затратной по времени частью алгоритма является вычисление на каждой итерации скалярных произведений всех сдвигов атомов словаря с

сигналом $\langle g_k(t - \tau_j), R_i(t) \rangle$, т.о. объем вычислительных ресурсов, требуемых для выполнения алгоритма, прямо пропорционален размеру словаря M .

Автором предложен способ повышения качества аппроксимации в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, не требующий расширения словаря, заключающийся в применении численного метода типа покоординатного спуска для поиска локального максимума функционала $F(g) = \left\| \langle g(t - \tau_j; \vec{p}), R_i(t) \rangle \right\|$ в пространстве параметров модели. Шаг алгоритма адаптивного согласованного преследования можно описать в виде следующей итерационной процедуры

- 1) просчитать значения $F(g)$ для всех атомов словаря и их смещений и определить первое приближение $g_{\max}(t; \vec{p}^0)$;
- 2) выбрать вектор $\vec{\lambda}$, содержащий длину шага для каждого из параметров вектора \vec{p} (в качестве шага λ_i для параметра p_i рекомендуется выбирать половину шага дискретизации значений параметра), $k=1$;
- 3) вычислить значение $F(g)$ для всех возможных комбинаций параметров из векторов $\vec{p}^{k-1} - \vec{\lambda}$, \vec{p}^{k-1} , $\vec{p}^{k-1} + \vec{\lambda}$, определить $g_{\max}(t; \vec{p}^k)$;
- 4) если $\vec{p}^k = \vec{p}^{k-1}$, то $\vec{\lambda} = 0.5 \cdot \vec{\lambda}$;
- 5) $k = k + 1$;
- 6) повторять процедуру с 3го шага, пока не будет достигнута требуемая точность $\left| F(g_{\max}(t; \vec{p}^k)) - F(g_{\max}(t; \vec{p}^{k-1})) \right| < \varepsilon$.

Применение метода типа покоординатного спуска позволяет итерационно уточнять структуру словаря, найденный уточненный атом и все его сдвиги добавляются в словарь, адаптируя его к конкретным особенностям сигнала. Применение алгоритма адаптивного согласованного преследования позволяет снизить объем затрачиваемых вычислительных ресурсов и получать качественные аппроксимации на словарях меньшего объема (рисунок 3).

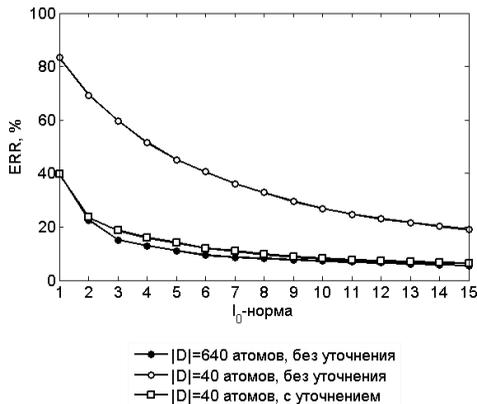


Рисунок 3 – Спад ошибки аппроксимации для классического и адаптивного алгоритмов

В качестве критерия останова адаптивного алгоритма выбрано значение величины, вычисляемой процентным отношением нормы невязки к норме исходного

сигнала $ERR_N = (\|R_N\|/\|s\|) \cdot 100\%$. Для одиночных импульсов ГАЭ требуемая точность аппроксимации достигается для ERR_N около 5-10%.

Модификация классического согласованного преследования с использованием комбинированных словарей и с привлечением методов оптимизации в пространстве параметров существенно повышает качество аппроксимации сигналов ГАЭ, позволяет избежать «грубой» дискретизации значений параметров, включенных в разложение атомов, что показано автором в ходе экспериментального исследования на реальных данных.

Добавление правила останова к алгоритму позволяет снизить временные затраты на эксперимент: вместо вычисления максимального числа повторений для каждого исследуемого сигнала алгоритм «сам решает», когда остановить работу; снизить пространственные затраты: вместо хранения фиксированного числа атомов для каждого разложения хранятся лишь значимые; улучшить адаптивное свойство алгоритма: количество включенных в разложение атомов напрямую зависит от сложности структуры исследуемого сигнала.

В **разделе 3.4** приводятся способы анализа построенной модели сигнала ГАЭ. Рассматривается частотно-временное представление модели с использованием преобразования Вигнера-Вилля и анализируется устойчивость адаптивного согласованного преследования к шуму. Показано, что устойчивость адаптивного согласованного преследования к шуму выше, чем у классического алгоритма и для реальных сигналов ГАЭ ($SNR \geq 15$ дБ) метод дает приемлемый результат (рисунок 4).

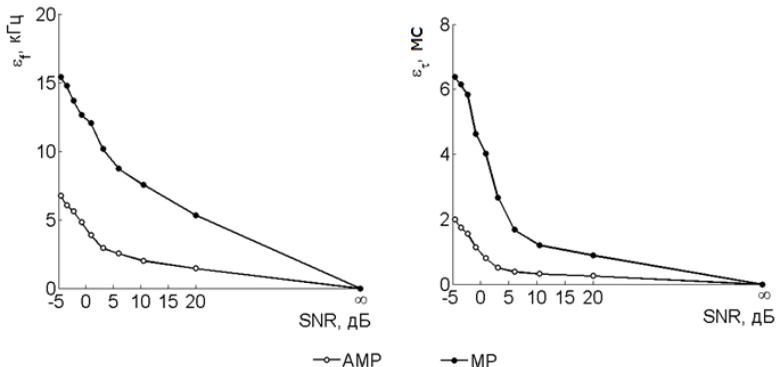


Рисунок 4 – Ошибки локализации по частоте и по времени для различных значений SNR

В **четвертой** главе приведены практические результаты проведенного теоретического исследования. Разработанные модели и алгоритмы протестированы на реальных и модельных сигналах ГАЭ, проиллюстрирована эффективность их применения.

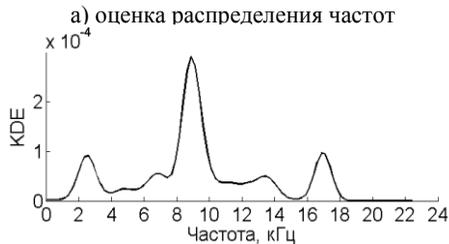
В **разделе 4.1** описан программный комплекс моделирования и анализа импульсных сигналов методами РА, разработанный в среде MATLAB. Данный программный комплекс реализует рассмотренные модели и алгоритмы. MP Complex состоит из пяти подсистем: подсистема генерации словарей, Dictionary Constructor; подсистема анализа сигналов, MPAnalyzer; подсистема моделирования сигналов, Model Constructor; подсистемы визуализации, MPVisualisator и SIG View. Подробно изложена структура каждой из подсистем, алгоритмы и интерфейс взаимодействия подсистем между собой и с пользователем.

В MPCComplex впервые совместно программно реализованы алгоритм генерации словарей путем вариации диапазонов значений для параметров атомов, алгоритм адаптивного согласованного преследования и способ визуализации моделей, построенных на базе разреженных аппроксимационных схем, в частотно-временной области.

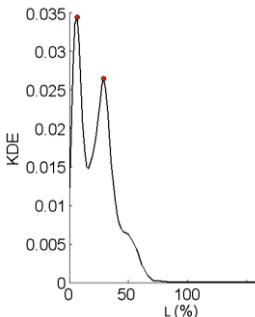
Раздел 4.2 посвящен оценке распределений параметров атомов, входящих в модель сигнала ГАЭ (5). Проведен вычислительный эксперимент на выборке из 2000 реальных импульсов ГАЭ. Построены и проанализированы распределения частот и параметров атомов, зависящих от времени (расстояния между атомами, длина атомов, амплитуда), т.к. данные параметры определяют положение атомов в частотно-временной области, т.е. влияют на частотно-временную структуру сигнала. Оценка распределений проводилась методом гистограмм и методом ядерного сглаживания (рисунок 5а-г).

Полученные распределения полимодальны и не подходят ни под один стандартный закон распределения. Распределения используются для построения модельных импульсов ГАЭ.

Для проверки правильности выбора критического значения ERR_N , было проанализировано распределение получаемых невязок. Характер спектра остаточных шумов позволяет сделать вывод, что невязка не обладает импульсной природой, и следовательно, в аппроксимацию включены все существенные составляющие аппроксимацию атомы (рисунок 5д).

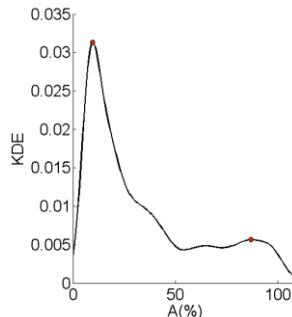


б) оценка распределения длин атомов



г) оценка распределения межатомных расстояний

в) оценка распределения амплитуд атомов



д) оценка распределения остаточных шумов

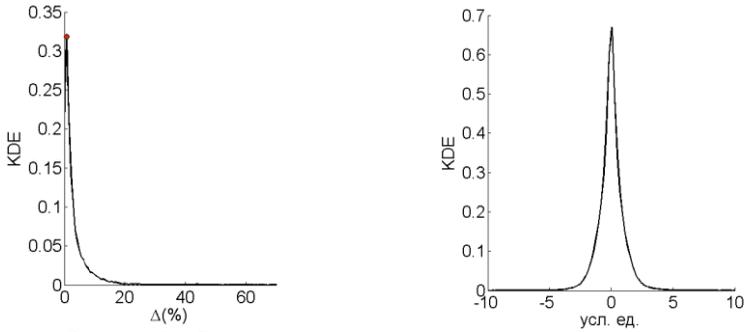


Рисунок 5 – Ядерная оценка плотности вероятности распределений параметров модели

Раздел 4.3 посвящен анализу реальных сигналов. Одной из подзадач анализа сигналов ГАЭ является очистка импульсов от различных паразитных составляющих, т.е. от

$$\varepsilon(t) = \sum_{j=N_1}^{N_1+N_2-1} \beta_j g_j(t).$$

Т.к. большое искажение в сигналы ГАЭ вносят техногенные помехи импульсной природы, в данном разделе описана очистка сигналов ГАЭ на примере удаления из сигналов паразитной импульсной наводки (ПИН), высокочастотной техногенной импульсной составляющей. На рисунке 6 изображены примеры очистки реальных сигналов от ПИН с помощью предложенного алгоритма. В качестве характерного признака паразитных составляющих выбрано значение несущей частоты атома: для ПИН более 15.2 кГц.

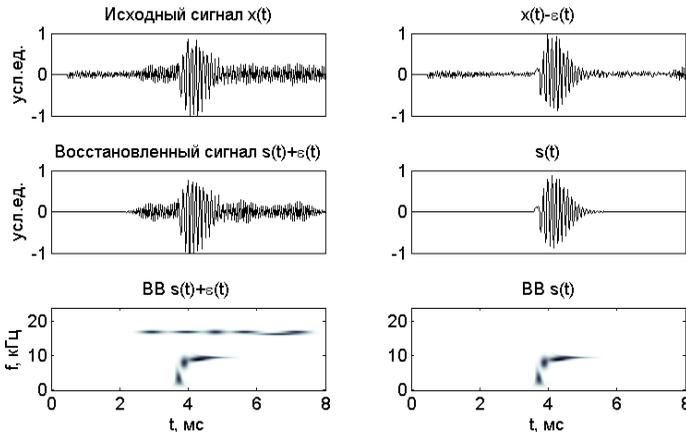


Рисунок 6– ПИН в сигналах ГАЭ

К преимуществам данного подхода можно отнести уход от использования фильтров, меняющих фазу сигнала; возможность адаптивной фильтрации, например, удаление помех имеющих ту же частоту, что и «чистый» сигнал. В качестве критериев отбора атомов могут выступать значения не только частоты, но и других

параметров. Для определения каждого вида помех могут быть сформированы свои собственные решающие правила.

Модель (5) представляет сигнал ГАЭ в виде суммы элементарных сигналов, соответствующих отдельным сдвиговым деформациям. Каждый включаемый в разложение (5) атом характеризуется набором параметров, одним из которых является частота f . Зная скорость продольных колебаний в осадочных породах V_p и частоту порождаемого сигнала, можно оценить длину сдвигового источника l по формуле Дж. Бруна

$$l = 2.34V_p / 2\pi f .$$

Например, на рисунке 7 изображен сильно зашумленный высокочастотный импульс ГАЭ. ПИН видно как по графику временной формы, так и по представлению в частотно-временной области. Из 8 атомов, составляющих модель сигнала, 4 аппроксимируют паразитную составляющую ($f \geq 17$ кГц). Остальные атомы локализованы в частотном диапазоне от 7470 до 9945 Гц ($l \approx 0.07 - 0.12$ м).

Приведенные в разделе оценки масштабов сдвиговых источников соответствуют ожидаемым экспертным оценкам, что говорит об адекватности выбранных методов и разработанной модели.

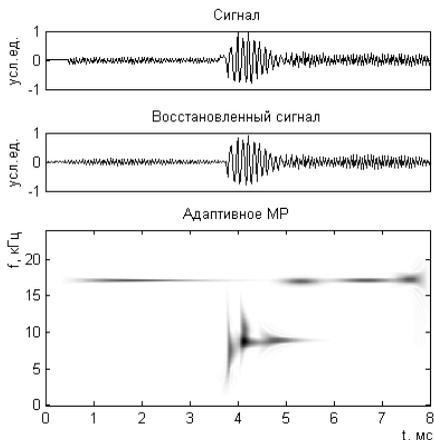


Рисунок 7 – Высокочастотный импульс ГАЭ: $N_1 = 4$, ERR = 3.4%;

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Предложена модель импульса геоакустической эмиссии, построенная на базе разреженных аппроксимационных схем: импульс описан как линейная комбинация минимально возможного числа атомов. Получены оценки распределений частоты и параметров, зависящих от времени: амплитуды, длины атомов и межатомных расстояний, – характерных для отдельных геоакустических импульсов. Приведены оценки распределения масштабов сдвиговых источников реальных сигналов, вычисленные с помощью формулы Дж. Бруна по полученным в результате моделирования значениям частоты.

2. Для анализа геоакустических сигналов методом разреженной аппроксимации синтезирован комбинированный словарь, состоящий из сдвинутых и модулированных функций Гаусса и Берлаге (частотно-временных атомов). Подобраны наиболее вероятные по появлению в реальных сигналах диапазоны значений для независимых параметров атомов.

3. На базе классического согласованного преследования разработан метод идентификации модели импульсного сигнала – адаптивное согласованное преследование, включающее правило останова и процедуру уточнения атомов словаря. Данный метод позволяет строить точные и эффективные модели в рамках ограниченных пространственных и временных ресурсов. С целью подтверждения эффективности предлагаемого метода построены модели реальных геоакустических сигналов. Исследована устойчивость адаптивного согласованного преследования к шуму: метод менее чувствителен к различным шумам и выбросам, чем классическое согласованное преследование.

4. Предложен алгоритм очистки геоакустических сигналов от паразитной импульсной составляющей, разработанный на базе адаптивного согласованного преследования. Данный алгоритм можно обобщить для очистки сигналов от различного вида помех.

5. Разработан программный комплекс обработки и анализа сигналов с использованием методов разреженной аппроксимации (MPCComplex). В состав комплекса входят подсистемы генерации словарей, анализа, моделирования одиночных импульсов, визуализации полученных результатов в частотно-временной области. На данный комплекс получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Афанасьева А.А., **Луковенкова О.О.**, Марапупец Ю.В., Тристанов А.Б. Применение разреженной аппроксимации и методов кластеризации для описания структуры временных рядов акустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2013. №2. С. 30-34.

2. **Луковенкова О.О.**, Тристанов А.Б. Адаптивный алгоритм согласованного преследования с уточнением на смешанных словарях в анализе сигналов геоакустической эмиссии // Цифровая обработка сигналов. 2014. №2. С. 54-57.

3. Тристанов А.Б., **Луковенкова О.О.** Классификация импульсов акустической эмиссии звукового диапазона на базе символического представления частотно-временной структуры // Цифровая обработка сигналов. 2015. №2. С. 35-38.

4. Tristanov A.B., Marapulets Yu.V., **Lukovenkova O.O.**, Kim A.A. A New Approach to Study of Geoacoustic Emission Signals // Pattern Recognition and Image Analysis, 2016, Vol. 26, No. 1, P. 34–44.

Другие статьи и материалы конференций

5. Афанасьева А.А., Луковенкова О.О. Методы обнаружения импульсов геоакустической эмиссии на основе алгоритмов разреженной аппроксимации и кластеризации // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2013. №2(7). С. 68–73.

6. Луковенкова О.О. Сравнение методов разреженной аппроксимации на примере сигналов геоакустической эмиссии // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2014. № 2(9). С. 59-67.

7. Луковенкова О.О. Очистка сигналов геоакустической эмиссии от природных и техногенных шумов методом разреженной аппроксимации // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2015. № 2(11). С. 77-81.

8. Tristanov A.B., Marapulets U.V., Lukovenkova O.O., Afanasyeva A.A. Sparse approximation method in the analysis of acoustic emission signal morphological features // Сборник докладов VI Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2013. С. 354-359.

9. Афанасьева А.А., Луковенкова О.О. Применение метода согласованного преследования для обнаружения импульсов акустической эмиссии звукового диапазона // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: «Цифровая обработка сигналов и её применение». Выпуск: XV. Т. 1. М., 2013. С. 86-89.

10. Луковенкова О.О., Тристанов А.Б. Адаптивный алгоритм согласованного преследования с уточнением на смешанных словарях в анализе сигналов геоакустической эмиссии // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: «Цифровая обработка сигналов и её применение». Выпуск: XVI. М., 2014. С.372-376.

11. Marapulets Yu.V., Tristanov A.B., Lucovencova O.O., Afanaseva (Kim) A.A. The sparse approximation with combined dictionary of the acoustic signals // International Conference "Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA)", IEEE, 2014. P. 102-103.

12. Tristanov A.B., Marapulets Yu.V., Lukovenkova O.O., Kim A.A. New approach to research geoaoustic emission signals // 9th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding, Koblenz, Germany. ID 30, 3 p.

13. Луковенкова О.О., Тристанов А.Б. Алгоритм классификации импульсов акустической эмиссии в частотно-временной области на базе символьной аппроксимации // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: «Цифровая обработка сигналов и её применение». Выпуск: XVII. М., 2015. С.174-178.

14. Тристанов А.Б., Марапулец Ю.В., Луковенкова О.О., Ким А.А. Моделирование сигналов импульсной природы на базе разреженной аппроксимационной схемы // Сборник докладов XVIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2015, 2015. С. 171-173.

15. Луковенкова О.О., Марапулец Ю.В. Частотно-временной анализ акустических сигналов предвестников землетрясений // Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук. Выпуск: 6. Сборник научных статей ежегодной межрегиональной научно-практической конференции, Петропавловск-Камчатский, 2016.

16. Луковенкова О.О., Марапулец Ю.В., Тристанов А.Б. Разреженная аппроксимация для очистки от помех коротких импульсных сигналов // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия: «Цифровая обработка сигналов и её применение». Выпуск: XVIII. М., 2016. С.111-115.

17. Lukovenkova O.O., Marapulets Yu.V., Tristanov A.B. Estimate of displacement-type sources scales of geoaoustic emission according to sparse representation of signal // 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 2016, P. 382 – 385.

Свидетельства

1. **Луковенкова О.О.**, Тристанов А.Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660342 «Программа для визуализации результатов разреженной аппроксимации сигналов геоакустической эмиссии MPVisualisator ver.1.0», дата регистрации 29.09.2015.

2. **Луковенкова О.О.**, Тристанов А.Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015660346 «Программный комплекс обработки сигналов геоакустической эмиссии с использованием модифицированного алгоритма согласованного преследования MPCComplex ver.1.0», дата регистрации 29.09.2015.