

Соловьев Игорь Сергеевич

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ГЕОМАГНИТНЫХ
ДАННЫХ И ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНДЕКСА ГЕОМАГНИТНОЙ
АКТИВНОСТИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Камчатский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Мандрикова Оксана Викторовна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Куприянов Михаил Степанович,
декан факультета компьютерных технологий и информатики, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

кандидат технических наук,
Мельканович Виктор Сергеевич,
начальник научно-исследовательского сектора ОАО «Концерн «Океанприбор»

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Защита диссертации состоится 20 февраля 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 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

Автореферат разослан 28 декабря 2012г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.238.01



Н.Л. Щеголева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Настоящая работа посвящена разработке средств и систем обработки и анализа вариаций магнитного поля Земли, направленных на изучение их характерного хода и геомагнитных возмущений, возникающих в периоды магнитных бурь.

Земля обладает собственным магнитным полем, которое называют так же геомагнитным полем. Геомагнитное поле непрерывно меняется, как во времени, так и в пространстве, его разделяют на главное, локальное и переменное. Регистрируемый временной ход компонент вектора напряженности магнитного поля Земли называют геомагнитными сигналами. Объектом данного диссертационного исследования является составляющая геомагнитного сигнала, определяющая переменное магнитное поле, источником которого являются корпускулярные потоки замагниченной плазмы, приходящие от Солнца вместе с солнечным ветром. Под действием этих источников в геомагнитных сигналах возникают вариации разных спектров и периодов. Формирующиеся локальные структуры характеризуют возмущенность поля и несут информацию об интенсивности и характере развития магнитной бури. Для оценки интенсивности возмущений поля используется индекс геомагнитной активности К (К-индекс), предложенный Дж. Бартельсом. К-индекс вычисляется из геомагнитных сигналов по специальной методике, предполагающей высокий уровень профессиональной подготовки персонала магнитной обсерватории. Основные требования данной методики предъявляются к построению Sq-кривой. Для её построения экспертами определяются самые спокойные дни за текущий месяц (обычно берется пять дней) и по этим дням вычисляется средняя кривая – Sq-кривая. Далее, на основе разницы между наибольшим и наименьшим отклонениями в течение трехчасового интервала реальной магнитограммы от значений Sq-кривой определяют амплитуду возмущения. Эта амплитуда переводится в К-индекс по специальной для каждой обсерватории квазилогарифмической шкале.

Сложная структура геомагнитных сигналов и отсутствие адекватных математических моделей не позволяет в полной мере проводить их анализ. Существующие методы обработки и анализа геомагнитных сигналов основаны на традиционных подходах, используют базовые модели временных рядов и различные операции сглаживания (Головков В.П., Nowozynski K., Menvielle M., Papitashvili N., Nakkinen L. и Sucksdorff C.). Для анализа периодических изменений в данных применяют методы Фурье–анализа (Яновский Б.М, Сарычев. В.Т, Коротков В.К. и др.). Нестационарный характер процесса и наличия разномасштабных особенностей различной формы и длительности, несущих важную информацию о состоянии магнитного поля, делают неэффективными эти методы и их применение не позволяет:

1. идентифицировать локальные особенности, представляющие собой короткопериодные колебания и возникающие в сигнале в периоды повышенной геомагнитной активности;
2. выделить «спокойный» (характерный) хода сигнала и оценить его изменение во время бурь;

3. построить автоматический алгоритм вычисления Sq-кривой и K-индекса в соответствии с методикой Дж. Бартельса.

Поскольку геомагнитные сигналы имеют сложную нерегулярную структуру и содержат разномасштабные локальные особенности, для их описания в диссертационной работе предложена аппроксимирующая вейвлет-схема и на ее основе адаптивная модель геомагнитного сигнала. Эта математическая платформа имеет быстрые схемы преобразования данных и обширный словарь базисов с компактными носителями. В настоящее время вейвлет-преобразование получает развитие при решении некоторых задач анализа геомагнитных данных, в числе которых удаление шума и исключение периодической компоненты, вызванной вращением Земли, вейвлет-анализ особенностей, возникающих перед мощными солнечными вспышками (Иванов В.В., Ротанова Н.М., Смирнова А.С., Zhonghua Xu, Jach A.). В диссертационной работе на его основе разработаны алгоритмы обработки и анализа геомагнитного сигнала, хорошо согласующиеся с предложенной математической моделью и позволяющие в автоматическом режиме выделить геомагнитные возмущения, оценить степень возмущенности поля и решить задачу автоматизации вычисления K-индекса. В качестве схемы преобразования используются вейвлет-пакеты, включающие аппроксимирующую составляющую и детализирующие компоненты. В работе показано, что аппроксимирующая составляющая вейвлет-пакетов позволят описывать характерные изменения геомагнитного сигнала, а детализирующие компоненты дают возможность идентифицировать короткопериодные колебания, возникающие в периоды бурь и характеризующие возмущенность поля. Построенная на основе этого подхода модель геомагнитного сигнала и алгоритмы анализа позволили решить задачу оценки степени возмущенности поля, построения Sq-кривой и вычисления K-индекса по методике Дж. Бартельса. Используя непрерывное вейвлет-преобразование, в работе разработан алгоритм детального анализа тонких структур геомагнитных сигналов, позволяющий в автоматическом режиме выделить периоды повышенной геомагнитной активности, оценить интенсивность и длительность геомагнитных пульсаций.

Таким образом, задачи связанные, с построением моделей и алгоритмов анализа геомагнитных сигналов, а также разработкой соответствующих программных средств являются актуальными и решаются в данной работе.

Целью работы является разработка модели геомагнитного сигнала, описывающей его характерную составляющую и локальные особенности, формирующиеся в периоды возмущений поля, способа ее идентификации, обеспечивающего выделение характерной составляющей и геомагнитных возмущений. Также целью работы является разработка алгоритма детального анализа геомагнитных сигналов, выделения периодов повышенной геомагнитной активности и оценки изменений характеристик поля, и разработка алгоритмов автоматизации вычисления K-индекса.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены **следующие задачи:**

1. Анализ природы геомагнитных сигналов и создание на его основе обобщенной модели геомагнитного сигнала, описывающей его характерную составляющую и локальные особенности, возникающие накануне и во время магнитных бурь.
2. Разработка способа выделения характерной составляющей модели геомагнитного сигнала и локальных особенностей, представляющих собой разномасштабные короткопериодные колебания.
3. Разработка алгоритма детального анализа геомагнитных сигналов, выделения периодов повышенной геомагнитной активности и оценки изменений характеристик магнитного поля Земли.
4. Автоматизация вычисления К-индекса по методике Дж. Бартельса.
5. Разработка программной системы, реализующей разработанные алгоритмы.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования диссертационной работы является переменное магнитное поле Земли в периоды спокойной и повышенной геомагнитной активности.

Предметом изучения являются модели временного хода компонент вектора напряженности магнитного поля Земли, описывающие характерные изменения данных и геомагнитные возмущения и методы их анализа.

Методы исследования. В диссертационной работе используется аппарат теории случайных процессов, математической статистики, цифровой обработки сигналов, вейвлет-преобразования.

Научную новизну работы составляет:

1. Модель геомагнитного сигнала, описывающая его характерную составляющую и локальные особенности, формирующиеся в периоды возмущений поля.
2. Способ выделения характерной составляющей геомагнитного сигнала и локальных особенностей, формирующихся накануне и во время развития магнитной бури, учитывающий его внутреннюю структуру.
3. Вычислительный алгоритм детального анализа геомагнитных сигналов, выделения периодов повышенной геомагнитной активности и оценки изменений характеристик поля, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании.
4. Алгоритмы автоматизации вычисления К-индекса, основанные на конструкции вейвлет-пакетов и пороговых функциях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Адаптивная модель геомагнитного сигнала, описывающая его характерный суточный ход и разномасштабные короткопериодные колебания, возникающие накануне и в периоды магнитных бурь.
2. Способ выделения характерного суточного хода геомагнитного сигнала и разномасштабных короткопериодных колебаний, возникающих в периоды возмущений поля.

3. Вычислительный алгоритм детального анализа геомагнитных сигналов, оценки состояния и характеристик поля, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании.
4. Алгоритмы вычисления К-индекса, основанные на конструкции вейвлет-пакетов и пороговых функциях, позволяющие в автоматическом режиме воспроизвести методику Дж. Бартельса.
5. Программная система анализа геомагнитных данных, выделения периодов повышенной геомагнитной активности, оценки изменений характеристик поля и автоматического вычисления индекса геомагнитной активности.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана программная система анализа геомагнитных данных, выделения периодов повышенной геомагнитной активности и оценки изменений характеристик поля, позволяющая в автоматическом режиме оценивать состояние магнитного поля Земли и выделять предвестники сильных магнитных бурь при проведении прогноза космической погоды.
2. Разработана программная система вычисления К-индекса позволяющая, в отличие от существующих систем, повысить точность его вычисления в автоматическом режиме. Система введена в эксплуатацию в обсерваториях ИКИР ДВО РАН и планируется для внедрения в другие магнитные обсерватории.
3. Предложенная адаптивная модель геомагнитного сигнала, позволяет описать регулярные компоненты и особенности в виде разномасштабных короткопериодных колебаний, и применима для описания сложных сигналов в случае отсутствия априорной информации о виде функциональной зависимости.
4. Предложенный способ выделения характерной составляющей и локальных особенностей геомагнитного сигнала, учитывает его внутреннюю структуру и обеспечивает выделение регулярных компонент и разномасштабных локальных особенностей в виде короткопериодных колебаний. Разработанный алгоритм детального анализа геомагнитных сигналов позволяет изучать структурные особенности сложных сигналов и оценивать их параметры. Данные средства применимы для более широкого круга задач анализа данных со сложной нестационарной структурой, включающей регулярные составляющие и особенности в виде разномасштабных короткопериодных колебаний.

Реализация и внедрение результатов исследований:

Разработанные программные системы используются для анализа геомагнитных данных, оценки характеристик магнитного поля и автоматизации вычисления К-индекса в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН).

Разработанные программные средства используются в учебном процессе при подготовке и проведении лабораторных, курсовых и дипломных работ для студентов специальностей «Управление и информатика в технических системах» в Камчатском государственном техническом университете.

Работа выполнена частично в рамках НИР «Динамические процессы в энергоактивных зонах взаимодействия космоса и геосфер» 2009-2011 г.г., № гос. рег. 01200962504; «Взаимодействие космоса и геосфер в условиях солнечной, циклонической и сейсмической активности» 2012-2014 г.г., № гос.рег. 01201253671, и в рамках проектов по программам фундаментальных исследований Президиума РАН и отделений РАН №12-I-П10-01 «Исследование модуляционных эффектов галактических и солнечных космических лучей в геосферах с помощью наземных, лидарных и космических наблюдений» и №12-I-ОФН-15 «Научное обоснование и разработка технологии комплексного мониторинга эффективности воздействия мощными радиоволнами на ионосферу и плазмосферу Земли»; результаты работы использовались при проведении НИОКР в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» №14.740.11.0966.

Исследования поддержаны грантом Президента РФ МД-2199.2011.9 «Средства и системы анализа ионосферных и геомагнитных данных» 2011-2012 гг.; грантом РФФИ – ДВО РАН №11-07-98514-р_восток_a «Теоретические основы и алгоритмическое обеспечение систем анализа ионосферных и геомагнитных данных» 2011-2013 гг.; грантом федеральной программы «Участник молодежного научно-исследовательского конкурса», «11-1», Госконтракт от 19 апреля 2011 года № 9002р/13172 тема «Разработка систем комплексного исследования природных процессов в Камчатском крае»; грантом победителя конкурса молодых изобретателей Камчатского края по теме «Программный комплекс по обработке магнитных данных и определению К-индекса», 2010 г.

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

1. международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2010), С.-Петербург, 2010г.;
2. 5-ой международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 2010г.;
3. 8-ой, 9-ой международной конференции «Интеллектуализация обработки информации», Пафос, 2010г., Москва, 2012 г.;
4. 10-ой международной конференции «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (РОАИ-10), Санкт-Петербург, 2010г.;
5. 13-ой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA' 2011), Москва, 2011г.;
6. 5-ой международной научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB», Харьков, 2011г.;
7. 2-ой, 3-ей всероссийской научно-практической конференции: «Наука, образование, инновации: Пути развития», Петропавловск-Камчатский, 2011г., 2012 г.;
8. 2-ой международной научно-технической конференции: «Компьютерные науки и технологии», Белгород, 2011 г.;

9. 15-ой всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов (ММРО)», Москва, 2011 г.;
10. 15-ой международной конференции «International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)», Melbourne, Australia, 2011;
11. научной конференции: «Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований», Троицк, 2012 г.;
12. 9-ой научной конференции «The XI Russian-Chinese workshop on space weather», Иркутск, 2012 г.;
13. международной молодежной конференции: «Прикладная математика, управление и информатика», Белгород, 2012 г.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ (в том числе 6 из списка изданий, рекомендованных ВАК, 3 статьи в другом издании, 16 работ в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций, 1 свидетельство об отраслевой регистрации разработки).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы включающего 83 наименований. Содержание работы изложено на 134 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности рассматриваемой работы, сформулированы цели и задачи исследований, показана и обоснована актуальность работы, научная новизна и практическая ценность.

В **первой** главе описаны свойства магнитного поля Земли, физические процессы, происходящие в нём и структура регистрируемых геомагнитных сигналов. Приведены типы вариаций поля и рассмотрены явления и процессы, происходящие в околоземном космическом пространстве на высотах от ионосферы до внешней границы магнитосферы. Сделан обзор методов изучения структуры и динамики токовых систем, ответственных за геомагнитные возмущения. Рассмотрена методика определения К-индекса, характеризующего возмущенность поля, и существующие способы его вычисления. Приведены существующие методы обработки и анализа геомагнитных данных и указаны их недостатки. Предложен способ построения модели геомагнитного сигнала на основе конструкции вейвлет-пакетов и приведены аргументы в пользу её эффективности.

Геомагнитные сигналы включают в себя характерные компоненты, определяющие спокойное состояние поля и разномасштабные флуктуации, характеризующие геомагнитные возмущения. Поэтому они могут быть представлены в следующем виде:

$$f(t) = f_{хар}(t) + \sum_{j_{возм}} g_{j_{возм}}(t) + e(t), \text{ где } f_{хар}(t) - \text{ характеристическая составляющая; } g_{j_{возм}}(t) -$$

геомагнитные возмущения масштаба j , $e(t)$ - шум.

Учитывая нерегулярную структуру геомагнитных данных, наличие локальных особенностей различной формы и длительности, наиболее подходящим пространством для их представления является вейвлет-пространство. Широкий спектр вейвлет-базисов позволяет подобрать функции, обеспечивающие наилучшую

аппроксимацию геомагнитного сигнала. Лучшую частотную локализацию обеспечивает конструкция вейвлет-пакетов. Детализирующие компоненты вейвлет-пакетов содержат в себе информацию о величине отклонений от среднего уровня процесса в локальные моменты времени и позволяют описать разномасштабные локальные особенности. Аппроксимирующая ветка вейвлет-пакетов позволяет описать характерный ход сигнала. Полученное таким образом представление сигнала имеет многокомпонентную структуру, включающую аппроксимирующие и детализирующие составляющие (рис. 1).

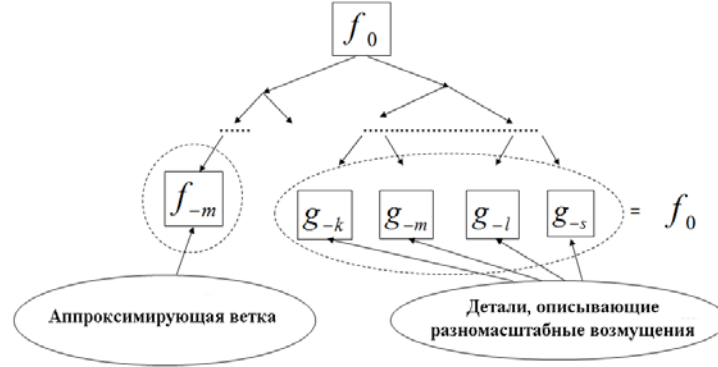


Рис. 1. Схема представления сигнала на основе конструкции вейвлет-пакетов.

Не нарушая общности, будем считать, что исходный дискретный сигнал f_0 имеет разрешение $j = 0$. После отображения в вейвлет-пространство на основе конструкции вейвлет-пакетов получаем **модель сигнала** в виде:

$$f_0(t) = \sum_n c_{j,n} \varphi_{j,n}(t) + \sum_{j \in I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) + \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) \quad (1)$$

где $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$ – вейвлет-базис, $\varphi_j = \{\varphi_{j,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$ – базис, порожденный скейлинг-функцией, коэффициенты $c_{j,n}$ и $d_{j,n}$ определяются соответственно как $c_{j,n} = \langle f, \varphi_{j,n} \rangle$, $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$, I – набор масштабов.

Компонента $f_{хар}(t) = \sum_n c_{j,n} \varphi_{j,n}(t)$ описывает его характерный ход и несет информацию о системе электрических токов, текущих над земной поверхностью, её форма и амплитуда зависят от магнитной широты, времени суток, сезона года и солнечной активности.

Компоненты $g_{j_{возм}}(t) = \sum_n d_{j_{возм},n} \Psi_{j_{возм},n}(t)$ (здесь и далее $j \in I$ будем обозначать как $j_{возм}$) несут информацию о геомагнитных возмущениях и характеризуют возмущенность магнитного поля Земли.

Имея представление геомагнитного сигнала в виде (1), решение задачи по выделению периодов повышенной геомагнитной активности, оценке характеристик поля и вычислению К-индекса можно разбить на следующие взаимосвязанные этапы:

1. Представление геомагнитного сигнала в вейвлет-пространстве.
2. Идентификация характерной составляющей и локальных структур, определяющих геомагнитные возмущения.
3. Оценка характеристик поля и состояния магнитного поля Земли.

4. Определение Sq-кривой и вычисление K-индекса.

Во **второй** главе рассматриваются свойства и методы вейвлет-преобразования по выделению локальных особенностей сложного сигнала. Приводятся конструкции непрерывного вейвлет-преобразования и разложения в вейвлет-пакеты. Основываясь на предложенной модели геомагнитного сигнала, разработан алгоритм выделения характерной составляющей геомагнитного сигнала и локальных особенностей, формирующихся накануне и во время развития магнитной бури. Используя свойства непрерывного вейвлет-преобразования, разработан алгоритм детального анализа геомагнитных сигналов, выделения периодов повышенной геомагнитной активности и оценки характеристик поля.

Способ выделения характерной и «возмущенной» составляющей геомагнитного сигнала

1. Выделение характерной составляющей сигнала. В соответствии с моделью (1) характерная составляющая имеет вид: $f_{хар}(t) = \sum_n c_{j,n} \phi_{j,n}(t)$. Эта составляющая оценивается преобразованием f_0 с помощью оператора решения D . Результирующая оценка есть $\tilde{f}_{хар} = Df_0$. Оптимизация оператора D зависит от априорной информации, имеющейся в нашем распоряжении. Поскольку распределение вероятностей мы не знаем, будем использовать минимаксную процедуру. Тогда задача состоит в нахождении оператора D , обеспечивающего наименьший риск: $r_n(\Theta) = \inf_D r(D, \Theta)$. В качестве оператора решения в работе предложено использовать конструкцию вейвлет-пакетов, в которой характерный ход описывает аппроксимирующая составляющая, определяемая набором коэффициентов $\bar{c}_j = \{c_{j,n}\}_{n=1, \dots, T}$ (см.(1)). Для оценки погрешности в качестве функции-эталона в работе принята Sq-кривая, тогда погрешность оценки $U_j = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{n=1}^T |c_{j,n} - c_{j,n}^{Sq}|^2}$, где $c_{j,n}^{Sq}$ - коэффициенты Sq-кривой на масштабе j . Очевидно, погрешность оценки зависит от масштаба j . Для определения масштаба, обеспечивающего наименьшую погрешность аппроксимации характерной составляющей $f_{хар}$, предложен следующий алгоритм:

1. Делим геомагнитный сигнал f на сегменты длиной T , равные одним суткам: $\{f(t_n)\}_{n=1}^N = (\{f(t_n)\}_{n=1}^T, \{f(t_n)\}_{n=T+1}^{2T}, \dots, \{f(t_n)\}_{n=N-T}^N)$.
2. На основе конструкции вейвлет-пакетов выполняем отображение Sq-кривой и данных каждого сегмента на масштабы $j = \overline{-1, -J}$, где J - максимальный масштаб, определяемый длиной сегмента T : $J \leq \log_2 T$. Получаем компоненты Sq-кривой и данных каждого сегмента в виде: $f_j^{Sq}(t) = \sum_n c_{j,n}^{Sq} \phi_{j,n}(t)$, $f_j^l(t) = \sum_n c_{j,n}^l \phi_{j,n}(t)$, l - номер сегмента.

3. Для каждого масштаба выполняем вейвлет-восстановление компонент f_j^l и f_j^{Sq} до масштаба $j = j_0$, получаем составляющие вида $f_0^{(j),l}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(j),l} \varphi_{0,n}(t)$, $f_0^{(j),Sq}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(j),Sq} \varphi_{0,n}(t)$ и, оцениваем погрешность $U^{(j),l}$: $U^{(j),l} = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{n=1}^T |c_{0,n}^{(j),l} - c_{0,n}^{(j),Sq}|^2}$.
4. Выбираем уровень вейвлет-разложения j^* , обеспечивающий наименьший риск: $\tilde{r}^{(j^*)} = \min_j \max_l U^{(j),l}$.
5. Получаем характерную составляющую геомагнитного сигнала, имеющую вид: $f_{j^*}(t) = \sum_n c_{j^*,n} \phi_{j^*,n}(t)$.

2. Выделение «возмущенной» составляющей сигнала

2.1. Определение «возмущенных» компонент. В качестве меры возмущенности компоненты в вейвлет-пространстве в работе определена величина $A_j = \max_n |d_{j,n}|$, где $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$, $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in Z}$ - вейвлет-базис, на основе которой предложено **правило 1 определения «возмущенных» компонент**: будем считать компоненту дерева вейвлет-пакета масштаба j «возмущенной», если для неё выполняется следующее условие:

$$m(A_j^v) > m(A_j^k) + \varepsilon \quad (2)$$

где m - выборочное среднее, v, k - индексы возмущенной и спокойной вариации, соответственно, $\hat{\varepsilon} = x_{\frac{1-\alpha}{2}} \sqrt{\sigma^{2,k}}$, где $\sigma^{2,k}$ - дисперсия, $x_{\frac{1-\alpha}{2}}$ - квантиль уровня $\frac{1-\alpha}{2}$.

Масштабы $j_{\text{возм}} \in I$, выделенные на основе условия (2), определяют возмущенные компоненты модели $g_{j_{\text{возм}}}$ и характеризуют возмущенность магнитного поля.

В работе рассмотрены три возможных состояния поля: h_0 - поле спокойное; h_1 - поле слабовозмущенное; h_2 - поле возмущенное. В соответствии с которыми получена модель вида:

$$f(t) = f_{\text{хар}}(t) + \sum_{(j_{\text{возм}}, n) \in I_1} d_{j_{\text{возм}}, n} \Psi_{j_{\text{возм}}, n}(t) + \sum_{(j_{\text{возм}}, n) \in I_2} d_{j_{\text{возм}}, n} \Psi_{j_{\text{возм}}, n}(t) + e(t), \quad (3)$$

где компонента $g_{\text{возм},1}(t) = \sum_{(j_{\text{возм}}, n) \in I_1} d_{j_{\text{возм}}, n} \Psi_{j_{\text{возм}}, n}(t)$ описывает слабые геомагнитные возмущения,

компонента $g_{\text{возм},2}(t) = \sum_{(j_{\text{возм}}, n) \in I_2} d_{j_{\text{возм}}, n} \Psi_{j_{\text{возм}}, n}(t)$ описывает сильные геомагнитные возмущения, I_1, I_2 - наборы индексов.

2.2. Оценка параметров «возмущенных» компонент. В соответствии с рассмотренными выше состояниями поля в работе введены следующие *состояния коэффициентов* $\{d_{j_{\text{возм}}, n}\}$: $h_{j_{\text{возм}},0}$ - коэффициент спокойный; $h_{j_{\text{возм}},1}$ - коэффициент слабовозмущенный; $h_{j_{\text{возм}},2}$ - коэффициент возмущенный. Оценку параметров

$\{d_{j_{\text{возм}},n}\}_{(j_{\text{возм}},n) \in I_1}$, $\{d_{j_{\text{возм}},n}\}_{(j_{\text{возм}},n) \in I_2}$ «возмущенных» компонент предложено выполнить на основе применения пороговых функций F_1 и F_2 :

$$f(t) = f_{\text{хар}}(t) + \sum_{j_{\text{возм}},n} F_1(d_{j_{\text{возм}},n}) \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t) + \sum_{j_{\text{возм}},n} F_2(d_{j_{\text{возм}},n}) \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t) + e(t)$$

$$F_1(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{j_{\text{возм}},1} \text{ или } |x| > T_{j_{\text{возм}},2} \\ x, & \text{если } T_{j_{\text{возм}},1} < |x| \leq T_{j_{\text{возм}},2} \end{cases}, \quad F_2(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{j_{\text{возм}},2} \\ x, & \text{если } |x| > T_{j_{\text{возм}},2} \end{cases}.$$

Выбор порогов $T_{j_{\text{возм}},1}$ и $T_{j_{\text{возм}},2}$ в работе выполнен на основе критерия наименьших потерь. Средние потери по апостериорному распределению состояний $h_{j_{\text{возм}},i}$ коэффициентов определены как $J_{j_{\text{возм}},i}(x) = \sum_{i \neq l} P\{h_{j_{\text{возм}},i} / d_{j_{\text{возм}},n}, (j_{\text{возм}},n) \in I_l\}$, где $P\{h_{j_{\text{возм}},i} / d_{j_{\text{возм}},n}, (j_{\text{возм}},n) \in I_l\}$ - апостериорная вероятность состояния $h_{j_{\text{возм}},i}$, i, l - индексы состояний. Выбирались пороги $T_{j_{\text{возм}},1}$ и $T_{j_{\text{возм}},2}$, обеспечивающие наименьшие потери $J = \sum_i J_{j_{\text{возм}},i}(x)$.

Для оценки состояния геомагнитного сигнала предложено **правило 2**:

1. Сигнал имеет спокойное состояние h_0 , если все коэффициенты $\{d_{j_{\text{возм}},n}\}$ имеют состояние $h_{j_{\text{возм}},0}$.
2. Сигнал имеет слабовозмущенное состояние h_1 , если хотя бы один из набора коэффициентов $\{d_{j_{\text{возм}},n}\}_{(j_{\text{возм}},n) \in I_1}$ имеет состояние $h_{j_{\text{возм}},1}$ и коэффициенты $\{d_{j_{\text{возм}},n}\}_{(j_{\text{возм}},n) \in I_2}$ с состоянием $h_{j_{\text{возм}},2}$ отсутствуют.
3. Сигнал имеет сильновозмущенное состояние h_2 , если хотя бы один из коэффициентов $\{d_{j_{\text{возм}},n}\}$ имеет состояние $h_{j_{\text{возм}},2}$.

Детальный анализ геомагнитных сигналов, выделение периодов повышенной геомагнитной активности и оценка характеристик поля. В теореме Жаффара доказано, если вейвлет Ψ имеет n нулевых моментов, и n производных, то для $f \in L^2(R)$, удовлетворяющей равномерному условию Липшица α , $\alpha \leq n$, на отрезке $[a, b]$, существует $A > 0$ такое, что

$$\forall (s, u) \in R^+ \times [a, b], |Wf(s, u)| \leq As^{\alpha+1/2}, \quad (4)$$

где $Wf(s, u) = \int f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt$, R^+ - множество положительных действительных чисел.

При стремлении масштаба s к нулю неравенство (4) является условием асимптотического убывания $|Wf(s, u)|$. Поэтому можно считать, что сигнал f в окрестности точки v содержит локальную особенность, если $|Wf(s, u)|$ не удовлетворяет условию (4) в окрестности точки v . Величина $|Wf(s, u)|$ принята в работе качестве меры возмущенности поля, операцию выделения разномасштабных локальных особенностей сигнала, возникающих в периоды повышенной

геомагнитной активности, предложено выполнять на основе функции

$$P_{T_s}(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \geq T_s \\ 0, & \text{если } |x| < T_s \end{cases}, \quad T_s - \text{порог на масштабе } s.$$

Интенсивность возмущения в момент времени $t = u$ на анализируемом масштабе s в работе предложено оценивать, как $E_{s,u} = |Wf(s,u)|$. На основе введенной *меры возмущенности поля* путем апостериорного риска определены пороги T_{s1} и T_{s2} , определяющие слабые и сильные возмущения поля.

Для оценки изменений интенсивности возмущений поля по масштабам введено в

рассмотрение временное окно $E_{s,\Delta u_0} = \int_{u=u_0-\varepsilon}^{u=u_0+\varepsilon} E_{s,u} du$. Оценку распределения выделенных

возмущений поля по масштабам даст величина $E_s = \int E_{s,u} du$. Максимумы функции E_s

по аналогии с характерными модами Фурье позволят выделить масштабы, вносящие основной вклад в полную энергию сигнала. Масштаб s , на котором наблюдается максимум E_s , будет определять среднюю продолжительность локального возмущения.

Для оценки изменения интенсивности возмущений поля во времени

предложена величина $E_u = \int E_{s,u} ds$. Рассмотрев временное окно $E_{\Delta u_0} = \int_{u=u_0-\varepsilon}^{u=u_0+\varepsilon} E_u du$, мы

можем проанализировать эти изменения в различных временных диапазонах.

Вычислительный алгоритм детального анализа геомагнитных сигналов, оценки состояния и характеристик поля:

1. Отображение данных в вейвлет-пространство: $Wf(s,u) = \int f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt$;

2. Применение к $Wf(s,u)$ пороговых функций и выделение сильных и слабых

геомагнитных возмущений: $P_{T_{s,1}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| < T_{s,1} \\ x, & \text{если } |x| \geq T_{s,1} \end{cases}$, $P_{T_{s,2}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| < T_{s,2} \\ x, & \text{если } |x| \geq T_{s,2} \end{cases}$, пороги $T_{s,1}$,

$T_{s,2}$ -выделяют слабые и сильные возмущения, соответственно;

3. Оценка интенсивности возмущений поля по времени: $E_u = \int E_{s,u} ds$;

4. Оценка интенсивности возмущений поля по масштабам во временном окне:

$$E_{s,\Delta u_0} = \int_{u=u_0-\varepsilon}^{u=u_0+\varepsilon} E_{s,u} du.$$

В **третьей** главе, дано описание предлагаемых алгоритмов автоматизации вычисления К-индекса. Приведены используемые в магнитных обсерваториях способы его вычисления и указаны их недостатки. Основываясь на конструкции вейвлет-пакетов, предложены два алгоритма вычисления К-индекса. Первый алгоритм позволяет выполнить расчет К-индекса в автоматическом режиме по методике, максимально приближенной к методике Дж. Бартельса. Второй алгоритм является развитием первого и позволяет выполнить расчет К-индекса в режиме, близком к реальному времени.

В работе введен следующий *критерий оценки возмущенности компонент сигналов*: на масштабе $j_{\text{возм}}$ компонента $g_{j_{\text{возм}},1}^{(1)}(t) = \sum_{n=\overline{1,L}} d_{j_{\text{возм}},n}^{(1)} \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t)$ является более возмущенной,

чем компонента $g_{j_{\text{возм}},1}^{(2)}(t) = \sum_{n=\overline{1,L}} d_{j_{\text{возм}},n}^{(2)} \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t)$ если $\frac{1}{L} \sum_{n=1}^L |d_{j_{\text{возм}},1,n}^{(1)}| > \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L |d_{j_{\text{возм}},1,n}^{(2)}|$, (5)

где L - длина компонент.

Алгоритм вычисления К-индекса по методике Дж. Бартельса:

1. Загружаем в память суточные вариации магнитного поля за текущий месяц, выполняем их отображение в вейвлет-пакеты и получаем их представление в виде:

$$f(t) = f_{\text{хар}}(t) + \sum_{(j_{\text{возм}},n) \in I_1} d_{j_{\text{возм}},n} \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t) + \sum_{(j_{\text{возм}},n) \in I_2} d_{j_{\text{возм}},n} \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t) + e(t);$$

2. Для вариаций вида: $f(t) = f_{\text{хар}}(t) + \sum_{(j_{\text{возм}},n) \in I_1} d_{j_{\text{возм}},n} \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t) + e(t)$

определяем возмущенные составляющие: $g_{\text{возм},1}(t) = \sum_{(j_{\text{возм}},n) \in I_1} d_{j_{\text{возм}},n} \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t)$;

3. Для полученных составляющих $g_{\text{возм},1}^{(s)}(t)$, $s = \overline{1,S}$, s - номер составляющей, S -

количество составляющих, выполняем проверку условия (5), определяем самые «спокойные» вариации и строим Sq-кривую;

4. Вычисляем разницу между наибольшим и наименьшим отклонениями в течение трехчасового интервала времени текущей вариации поля и построенной Sq-кривой и определяем амплитуду возмущений;

5. Полученную амплитуду возмущений по квазилогарифмической шкале переводим в К-индекс.

Для реализации операции **вычисления К-индекса в режиме реального времени** в работе предложен следующий **алгоритм**:

1. Загружаем в память текущую вариацию магнитного поля, выполняем её отображение в вейвлет-пакеты и получаем ее представление в виде:

$$f(t) = f_{\text{хар}}(t) + \sum_{(j_{\text{возм}},n) \in I_1} d_{j_{\text{возм}},n} \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t) + \sum_{(j_{\text{возм}},n) \in I_2} d_{j_{\text{возм}},n} \Psi_{j_{\text{возм}},n}(t) + e(t).$$

2. На основе *правила 2* оцениваем состояние вариации.

3. Если вариация имеет состояние h_0 , то она замещает самую раннюю по дате вариацию в тройке спокойных вариаций поля, вычисляем Sq*-кривую и выполняем переход на шаг 5.

4. Если имеет состояние h_1 , то, используя тройку самых близких к текущей дате вариаций поля с состояниями h_1 , вычисляем среднюю кривую и выполняем возврат на шаг 1.

5. Вычисляем разницу между наибольшим и наименьшим отклонениями в течение анализируемого интервала времени текущей вариации поля и построенной Sq*-кривой и определяем амплитуду возмущений.

6. Полученную амплитуду возмущений по квазилогарифмической шкале переводим в индекс геомагнитной активности.

В отличие от методики Дж. Бартельса, предложенный алгоритм позволяет учитывать изменчивость хода геомагнитного процесса.

В **четвертой** главе описаны эксперименты с модельными и реальными данными и приведены результаты исследований. Описывается разработанное программное обеспечение. Модельные сигналы по структуре соответствуют геомагнитным вариациям и включают спокойную суточную составляющую, разномасштабные локальные особенности и белый шум.

Результаты экспериментов с модельными сигналами по выделению локальных особенностей представлены в таблице 1. График зависимости вероятности обнаружения особенностей от ее длительности показан на рис. 2.

При проведении экспериментов с реальными данными использовались геомагнитные сигналы (Н компонента) за период 2002-2010гг.. В процессе исследований идентифицирована модель геомагнитного сигнала, имеющая вид:

$$f(t) = \left(\sum_{n \in Z} c_{6,n} \Psi_{6,n}(t) \right) + \sum_J g_J(t), \quad \text{где } \Psi_{6,n} - \text{ базисная вейвлет-функция, } c_{6,n} -$$

коэффициенты аппроксимирующей составляющей вейвлет-пакета, g_J - детализирующие компоненты, содержащие возмущения.

Таблица 1. Результаты экспериментов по выделению локальных особенностей

длительность особенностей	кол-во выявленных	кол-во ложных
5	67%	17%
15	92%	13%
20	97%	8%

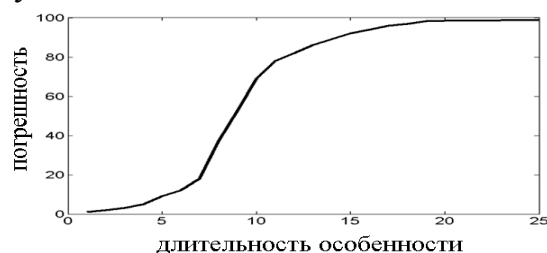


Рис. 2 График зависимости вероятности обнаружения особенностей от ее длительности

На рис.3б показаны результаты применения *способа выделения характерной составляющей геомагнитного сигнала и локальных особенностей, формирующихся накануне и во время развития магнитной бури*. В верхней части рис. 3, над вариацией поля, приведены значения К-индекса. Сопоставление данных К-индекса с полученными компонентами модели показывает, что в периоды возмущений наблюдается существенное увеличение амплитуд флуктуаций, свидетельствующих о наличии локальных особенностей, что подтверждает эффективность предлагаемого способа.

На рис. 4 представлены результаты применения *алгоритма детального анализа геомагнитных сигналов, выделения периодов повышенной геомагнитной активности и оценки изменений энергетических характеристик поля*. Началу главной фазы бурь предшествует слабое возрастание возмущенности, интенсивность которых не превышает значений $T_{s,1}$ (рис.4б). На главной фазе интенсивность возмущений значительно увеличивается и достигает значений $T_{s,2}$ (рис. 4в). Это позволяет в автоматическом режиме фиксировать начальный момент главной фазы магнитосферного возмущения и оценить его интенсивность.

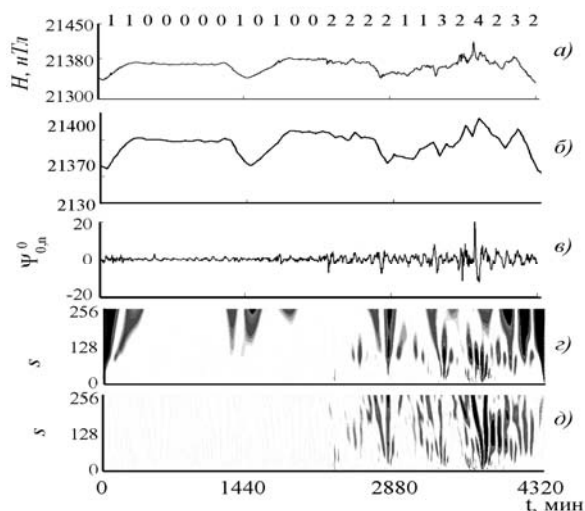


Рис. 3. а) – данные регистрации; б), в) – составляющая $\sum_{n \in Z} c_{6,n} \Psi_{6,n}(t)$ и $g_J(t)$ модели; г) – вейвлет-преобразование исходных данных; д) – вейвлет-преобразование составляющих $g_J(t)$ модели.

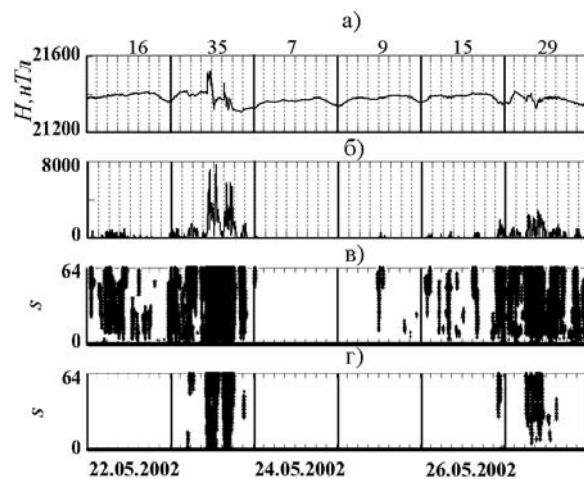


Рис 4. Результат обработки геомагнитных данных за период 22 - 27.05.2002гг. а) – данные регистрации; б) – результат оценки интенсивности возмущений поля; в), г) – результат выделения слабых и сильных возмущений поля.

Результаты вычисления Sq-кривых (рис. 5), полученные предлагаемым методом и «ручным» способами, показали их идентичность, что доказывает эффективность предлагаемого метода автоматического вычисления К-индекса. Статистически доказано, что предлагаемый способ вычисления К-индекса позволяет уменьшить погрешность его расчета на 24% по сравнению с используемым в мировой сети Intermagnet.

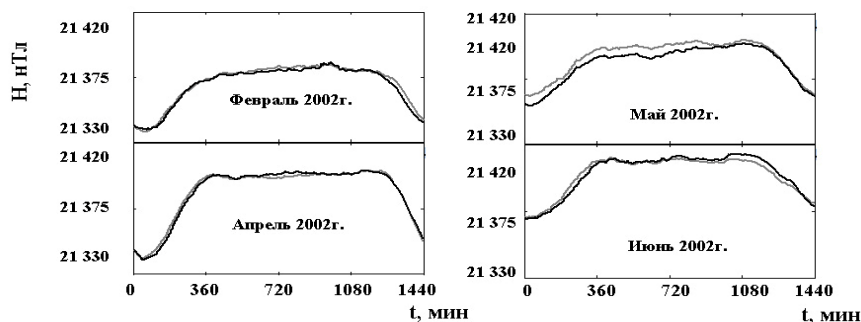


Рис. 5. Результаты расчета Sq-вариации. Черным цветом показан результат расчета Sq-вариации ручным способом, серым цветом программным способом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные научные и практические результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Предложена адаптивная модель геомагнитного сигнала, основанная на вейвлет-базисе и описывающая его характерный ход и разномасштабные короткопериодные колебания, формирующиеся в периоды повышенной геомагнитной активности.
2. Для выделения характерной составляющей геомагнитного сигнала и локальных короткопериодных колебаний, формирующихся накануне и во время развития

магнитной бури, разработан способ, позволяющий определить ход процесса, оценить его состояние и выделить особенности, возникающие в периоды возмущений поля.

3. Для автоматизации выделения периодов повышенной геомагнитной активности и оценки изменений характеристик поля разработан вычислительный алгоритм детального анализа геомагнитных сигналов, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании. Алгоритм позволяет выделить возмущения поля и оценить их длительность, интенсивность и масштабы, и не имеет аналогов.

4. Предложены алгоритмы автоматизации вычисления К-индекса, основанные на конструкции вейвлет-пакетов и пороговых функциях. Один алгоритм *воспроизводит методику* Дж. Бартельса в автоматическом режиме и не имеет аналогов. Второй алгоритм является развитием первого алгоритма и позволяет учитывать изменчивость хода геомагнитного процесса.

5. Создана программная система, в которой реализованы разработанные алгоритмы. Система позволяет выделить периоды повышенной геомагнитной активности, оценить характеристики и состояние магнитного поля Земли в *автоматическом режиме*, что обеспечивает оперативное обнаружение возмущений поля и выделение предвестников сильных магнитных бурь. Также система позволяет воспроизвести методику Дж. Бартельса и вычислить К-индекс, и обеспечивает повышение точности определения индекса геомагнитной активности в автоматическом режиме, по сравнению с используемой системой в мировой сети магнитных обсерваторий.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Вейвлет-технология обработки и анализа вариаций магнитного поля Земли // Информационные технологии. –2011. №1 – С. 34-38.

2. O.V. Mandrikova, I.S. Solovjev, V.V. Geppener, D.M. Klionskiy New wavelet-based approach intended for the analysis of subtle features of complex natural signals (Новый вейвлет-подход анализа тонких особенностей сложных природных сигналов) // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications – 2011, Vol. 21, № 2, pp. 300-303.

3. И.С. Соловьев Метод выделения короткопериодных флуктуаций в геомагнитном сигнале на основе вейвлет-преобразования // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011. № 7 – С. 35-40.

4. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Вейвлет-технология обработки и анализа геомагнитных данных // Цифровая обработка сигналов – 2012 №2 С. 24-29.

5. О.В. Мандрикова, С.Э. Смирнов, И.С. Соловьев Метод определения индекса геомагнитной активности на основе вейвлет-пакетов //Геомагнетизм и аэрономия. – 2012г. Т.52. №1– С.117-127.

6. O.V. Mandrikova, I.S. Solovjev, V.V. Geppener, D.M. Klionskiy Analyzing Subtle Features of Natural Time Series by Means of a Wavelet-Based Approach (Анализ тонких особенностей сложных природных сигналов на основе вейвлет-подхода) // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications – 2012, Vol. 22 , No. 2 – pp. 323-332.

Другие статьи и материалы конференций:

7. И.С. Соловьев, О.В. Мандрикова, Свидетельство об отраслевой регистрации разработки №50201150051 «Программа по обработке геомагнитных данных», дата регистрации 22.11.2010г.

8. Мандрикова О.В., Соловьев И.С., Смирнов С.Э. Автоматизация процедуры определения невозмущенной вариации поля на основе вейвлет-пакетов // Петропавловск-Камчатский: Вестник КамчатГТУ. – 2011. Вып. 15. – С. 19-21.
9. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Вейвлет-технология выделения возмущений в вариациях геомагнитного поля Земли // Петропавловск-Камчатский: Вестник КамчатГТУ – 2011. Вып. 16 – С. 15-19.
10. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Метод выделения характерной суточной составляющей и локальных особенностей в геомагнитном сигнале // Петропавловск-Камчатский: Вестник КамчатГТУ – 2012 Вып. 20. С. 31-36.
11. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Вейвлет-технология обработки и анализа вариаций магнитного поля Земли // 8-я международная конференция «Интеллектуализация обработки информации» (ИОИ-8), Москва: МАКС Пресс – 2010 – С.430-433.
12. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Алгоритм выделения характерной суточной составляющей и локальных особенностей в геомагнитном сигнале // 9-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации» (ИОИ-9) – Москва: Торус Пресс – 2012 С.528-531.
13. О.В. Мандрикова, Ю.А. Полозов, И.С. Соловьев Метод выделения и классификации локальных особенностей в сложных природных сигналах // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2010) – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ" – 2010. Т.2 – С.139-143.
14. О.В. Мандрикова, С.Э. Смирнов, И.С. Соловьев Метод определения индекса геомагнитной активности К на основе вейвлет-пакетов // Солнечно-Земные связи и физика предвестников землетрясений: 5-я международная конференция, Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2010. – С. 212-215.
15. O.V. Mandrikova, I.S. Solovjev, D.M. Klionsky, V.V. Geppener New wavelet-based approach intended for the analysis of subtle features of complex natural signals (Новый вейвлет-подход анализа тонких особенностей сложных природных сигналов) // Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies: Conference proceedings, Saint-Petersburg.– Saint-Petersburg, - 2010, pp. 12-16.
16. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Вейвлет-технология анализа вариаций геомагнитного поля // 13-я международная конференция: цифровая обработка сигналов и ее применение – М.: Информпресс – 2011. т. 2 – С. 247-250.
17. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Автоматизированная система по анализу геомагнитных данных и выделению возмущений на основе вейвлетов // V международная научная конференция: Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB – Харьков.: БЭТ – 2011. С.460-464.
18. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Идентификация геомагнитных возмущений на основе вейвлетов // 2-я международная научно-техническая конференция: Компьютерные науки и технологии – Белгород: ООО «Гик». – 2011. С.621-627.
19. И.С. Соловьев, О.В. Мандрикова Метод выделения геомагнитных возмущений на основе непрерывного вейвлет-преобразования // Международная молодежная конференция «Прикладная математика, управление и информатика» – Белгород: ИД «Белгород» – 2012 – С.525-531.
20. О.В. Мандрикова, И.С. Соловьев Вейвлет-метод выделения геомагнитных возмущений и анализа магнитных данных // 15-я всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов» – М.: МАКС Пресс – 2011 – С.555-557.