

На правах рукописи

Полозов Юрий Александрович

СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ
АНОМАЛИЙ В ИОНОСФЕРНЫХ СИГНАЛАХ

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Мандрикова Оксана Викторовна

Научный консультант: доктор физико-математических наук
Богданов Вадим Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гагарин Юрий Иванович

кандидат технических наук
Мельканович Виктор Сергеевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО)

Защита диссертации состоится 16 февраля 2011 г. в ___ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.238.01 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

Автореферат разослан «27» декабря 2010г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских и
кандидатских диссертаций Д212.238.01, к.т.н.

Щеголева Н.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Настоящая работа посвящена разработке математических моделей и методов анализа сигналов ионосферы, представленных в виде временных последовательностей данных, и построению программных систем их обработки. Наряду с другими методами исследований, анализ природных временных рядов имеет важное значение для решения целого ряда научных задач физики, и в частности геофизики. Качество процедуры анализа определяется адекватностью используемых математических моделей, методов и соответствующего математического аппарата их реализующего. Сложности решения таких задач связаны со сложной структурой регистрируемых сигналов. Они включают большое количество компонент, содержат локальные особенности различной формы и временной протяженности, аномальные эффекты, а также шумовые факторы различной природы. В диссертационной работе рассматриваются задачи, связанные с обнаружением и оценкой параметров аномальных эффектов. Аномальные эффекты содержат полезную и важную для исследователя информацию об изучаемом процессе, и должны быть отражены в модели.

Структура ионосферы, распределение ее параметров по высоте определяется плотностью атмосферы, ее химическим составом и спектральными характеристиками солнечного излучения. Структурно ионосфера разделена на несколько областей (E,D,F). Область F подразделяется на F_1 и F_2 . На состояние ионосферы существенное влияние оказывает солнечная активность. Исследование ионосферы выполняется дистанционными методами, одним из которых является вертикальное радиозондирование. Частота несущей радиоимпульса, для которой данная область ионосферы становится прозрачной, называется критической (f_0F_2) и характеризует концентрацию электронов.

Исследования динамических процессов на всех уровнях атмосферы и в различных областях магнитосферы Земли, изучение влияния солнечной активности на формирование геофизических процессов занимают в настоящее время одно из важных мест в науке о Земле.

Сущность обработки ионосферных данных, применительно к решаемой задаче, сводится к обнаружению аномального поведения параметров ионосферы, предшествующего сильным сейсмическим явлениям на Камчатке. Существующие модели и методы анализа природных временных рядов не являются достаточно эффективными и имеют следующие недостатки:

1. Для аномалий ионосферного сигнала f_0F_2 отсутствует теоретический аппарат по их выделению и оценке параметров.
2. Ввиду отсутствия единой теоретической платформы (а не комбинации отдельных алгоритмических решений), при обработке сложных природных сигналов (в том числе

ионосферного сигнала f_0F2) наблюдается потеря и искажение информации.

В применяемых в настоящее время методах анализа сигнала f_0F2 зачастую используется процедура сглаживания, что влечет потерю информации. Также, основные инструменты определения аномалий, предшествующих землетрясениям, основаны на анализе средних и медианных значений, что не позволяет выявить внутренние зависимости и отдельные аномальные эффекты.

Ионосферные сигналы имеют многомасштабную структуру, содержат суточные и сезонные колебания, а также переходные процессы и аномалии, связанные с активностью Солнца и возникающие накануне сильных землетрясений. Аномалии могут иметь форму резких всплесков различной амплитуды и временной протяженности. Наиболее эффективным способом их идентификации является вейвлет-преобразование. Данный аппарат и имеет широкий спектр базисов различной формы с компактными носителями. Используя вейвлет-преобразование, мы имеем возможность идентифицировать особенности структуры ионосферного сигнала и выполнить их анализ. Это играет важную роль в задачах обработки природных сигналов сложной формы. После разложения сигналов в пространстве вейвлет-признаков в диссертационной работе для их дальнейшей обработки предложен аппарат нейронных сетей. Нейронные сети позволяют решать трудно формализуемые задачи, такие как распознавание образов, кластеризация, прогнозирование. Также, аппарат нейронных сетей служит хорошей основой для построения программных систем анализа данных, в том числе представленных в виде временных рядов. Используя данный аппарат совместно с вейвлет-преобразованием, в диссертационной работе предложен метод идентификации регулярных составляющих структуры сигнала и локальных особенностей.

Таким образом, задачи связанные с построением моделей ионосферных сигналов, выделением в них аномальных особенностей, разработкой соответствующих алгоритмов и программных средств являются актуальными и решаются в данной работе.

Целью работы является разработка модели ионосферного сигнала f_0F2 , методов и численных алгоритмов его обработки, и построение на их основе программной системы анализа и прогноза.

Для достижения этой цели в диссертации решались **следующие задачи:**

1. Разработка модели ионосферного сигнала, учитывающей его регулярные составляющие и аномальные особенности.
2. Разработка метода обнаружения аномалий на основе идентификации компонентов модели.
3. Разработка численных алгоритмов обнаружения и оценки параметров структурных особенностей ионосферных сигналов.

4. Разработка программной системы обработки и анализа ионосферных сигналов.

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

Научную новизну работы составляет:

1. Предложена модель ионосферного сигнала, описывающая его регулярные составляющие и аномальные особенности.
2. Предложен метод выделения регулярных составляющих сложного сигнала и его аномальных особенностей, основанный на совместном применении вейвлет-преобразования и нейронных сетей.
3. Разработан численный алгоритм выделения и оценки параметров локальных особенностей ионосферного сигнала.
4. Разработан численный алгоритм выделения аномалий в ионосфере, основанный на совместной обработке ионосферных (сигнал критической частоты) и геомагнитных (K-индекс) данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель ионосферного сигнала, описывающая его регулярные составляющие и аномальные особенности.
2. Метод выделения регулярных компонент ионосферного сигнала и аномальных особенностей, основанный на вейвлет-преобразовании и нейронных сетях.
3. Численный алгоритм выделения и оценки параметров локальных особенностей ионосферного сигнала, позволяющий выявить аномалии.
4. Численный алгоритм выделения аномалий в ионосфере, основанный на совместной обработке данных критической частоты и K-индекса.
5. Программная система обработки и анализа ионосферных данных, построенная на разработанном методе и алгоритмах.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана программная система, обеспечивающая выявление и оценку параметров аномалий в ионосферных сигналах.
2. Разработана методика и алгоритмы выявления локальных особенностей в виде «ступеней», «всплесков», «пиков», и оценки их параметров в сигналах сложной структуры.
3. Разработанные программные модули применимы для более широкого круга задач анализа сигналов со сложной структурой.

Реализация и внедрение результатов исследований:

Разработанный программный комплекс используется для выявления аномалий ионосферных данных в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН).

Разработанные программные средства использовались в учебном процессе при проведении лабораторных работ для студентов специальностей "Управление и информатика в технических системах" в Камчатском государственном техническом университете.

Исследования поддержаны грантом федеральной программы «Участник молодежного научно-исследовательского конкурса». «УМНИК 10-6», Госконтракт от «30» июня 2010 года № 8283р/10269 тема "Разработка моделей и методов анализа сложных природных сигналов в задачах выделения аномалий в ионосферных параметрах".

Грант победителя конкурса молодых изобретателей Камчатского края. Тема работы «Разработка автоматизированной системы выявления аномалий в сложных сигналах на основе совместного применения теории вейвлет-обработки и нейронных сетей». Договор №7 от 5 апреля 2010 г. о предоставлении целевого финансирования.

Апробация работы: Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: на Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2006), С.-Петербург, 2006г.; на Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2007), С.-Петербург, 2007г.; на IV международной конференции "Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений", П.-Камчатский, 2007г.; на Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008), С.-Петербург, 2008г.; на VI региональной молодежной научной конференции "Исследования в области наук о Земле", П.-Камчатский, 2008г.; на ежегодной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов КамчатГТУ "Научно-технические исследования рыбохозяйственной отрасли Камчатского края", П.-Камчатский, 2008г.; на 5-ой научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2008), С.-Петербург, 2008г.; на первой Международной научно-технической конференции "Компьютерные науки и технологии", Белгород, 2009г.; на Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2010), С.-Петербург, 2010г.; на V международной конференции "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений", с. Паратунка, Камчатский край, 2010г.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ (в том числе 4 из списка изданий, рекомендованных ВАК, 1 статья в другом издании, 10 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 86 наименований. Содержание работы изложено на 134 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана и обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи, научная новизна и практическая ценность работы.

В **первой** главе описана структура ионосферных сигналов и способы регистрации данных. Также рассмотрены физические особенности ионосферы и характер связи ионосферно-литосферных процессов. Дан обзор существующих методов обработки и анализа природных временных рядов с указанием имеющихся недостатков. Выполнен анализ современных подходов и методов к построению модели сигнала сложной внутренней структуры. Рассмотрен способ построения модели ионосферного сигнала с использованием вейвлет-обработки и нейронных сетей. Приводятся аргументы в пользу того, что конструкция, основанная на совмещении вейвлетов и нейронных сетей, является наиболее эффективным методом, позволяющим решить поставленную задачу.

Используя вейвлет-аппарат, имеем возможность представить сигнал в виде суммы образующих его структурных компонент:

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_n(t) + \dots, \text{ где } f_j(t) = \sum_k c_{jk} \Psi_{jk}(t), \quad \Psi_{jk}$$

– базисные вейвлет-функции. Коэффициенты $c_{j,n}$ определяются из

$$\text{соотношения } c_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle.$$

Данное представление позволяет реализовать процедуру выделения структурных компонент ионосферного сигнала. При этом в отличие от традиционных методов сглаживания предлагаемый теоретический аппарат является устойчивым к выбросам, шумам и эффективно выделяет локальные и регулярные структурные особенности, что важно при анализе природных данных и решении задач обнаружения аномалий.

Случайный сигнал y представляет зависимость $y(t) = f(t) + e(t)$, где f – истинное значение измеряемой величины, e – ошибки измерений. Компоненты случайного сигнала y в пространстве вейвлет-образов имеют вид $y_j(t) = f_j(t) + e_j(t)$.

Для дискретного сигнала, не нарушая общности, примем $j = 0$. В качестве базовой конструкции для построения отображения будем использовать конструкцию вейвлет-пакетов, имеющую быстрые алгоритмы преобразования и позволяющую идентифицировать различные типы частотно-временных структур.

Таким образом, общий вид модели ионосферного сигнала будет:

$$y(t) = \sum_{j=0}^J g_j(t) + e(t),$$

где g_j - компоненты сигнала, j - масштаб, $e(t)$ - шум.

Вейвлет-методы позволят идентифицировать особенности структуры ионосферных данных, подавить шум и выполнить детальный анализ компонент разложения. Учитывая нелинейную структуру компонент разложения, дальнейшая обработка будет основана на аппарате нейронных сетей, что позволит выделить регулярные составляющие, выполнить прогноз и выявить аномальные эффекты. Нейронные сети позволяют решать трудно формализуемые задачи, такие как распознавание образов, прогнозирование, моделирование сложных систем. Также, аппарат нейронных сетей служит хорошей основой для построения автоматизированных систем обработки и анализа данных.

Таким образом, решение задачи обработки и анализа ионосферного сигнала с целью выявления и оценки параметров аномальных особенностей можно разбить на следующие взаимосвязанные этапы:

- 1) выделение структурных составляющих ионосферного сигнала на основе вейвлетов;
- 2) идентификация регулярных составляющих сигнала с применением технологии нейронных сетей;
- 3) оценка параметров и анализ локальных особенностей сигнала.

Общая схема решения задачи имеет вид, показанный на рис.1.



Рис. 1. Схема исследования ионосферных процессов

Во **второй** главе рассматриваются основные положения вейвлет-теории. Описываются непрерывное и дискретное вейвлет-преобразования, быстрые алгоритмы вейвлет-разложения. Используя этот аппарат предложены численные алгоритмы выделения и оценки параметров локальных особенностей в структуре сложного сигнала.

В момент возникновения аномального явления в сигнале возникает особенность. Из непрерывного вейвлет-преобразования следует, что вейвлет Ψ имеет нулевое среднее значение и

$$Wf(a, b) = \int f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad \text{измеряет изменение } f \quad \text{в}$$

окрестности точки b , размер которой пропорционален масштабу a . При стремлении масштаба a к нулю вейвлет-коэффициенты характеризуют локальные свойства функции f в окрестности точки b .

Убывание амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования $|Wf(a, b)|$ в зависимости от масштаба a связано с равномерной и точечной гладкостью Липшица сигнала. Когда масштаб a убывает, амплитуды вейвлет-коэффициентов $|Wf(a, b)|$ имеют быстрое убывание до нуля в областях, где сигнал не содержит локальных особенностей. Таким образом, можно считать, что функция f в окрестности точки b имеет локальную особенность, если $|Wf(a, b)|$ не удовлетворяет условию

$$|Wf(a, b)| \leq A' a^{\alpha+1/2}, \quad (1)$$

A' - некоторая константа; α - показатель Липшица, что тождественно равному условию Липшица.

Характеризовать f в точке b бывает достаточно трудно, потому что f может иметь различные виды особенностей, присутствующих в окрестностях точки b . Более ясную интерпретацию здесь дает конус влияния точки ν , который определяется неравенством

$$|b - \nu| \leq Ca \quad (2)$$

Если b находится в конусе влияния ν , то $Wf(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle$ зависит от значения f в окрестности ν .

Рассмотрим дискретный сигнал с шумом:

$$y[n] = f[n] + e[n], \quad (3)$$

где $e[n]$ - шум.

На основе конструкции дискретного вейвлет-разложения сигнала получаем: $y(t) = \sum_{j,n \in Z} d_{j,n} \Psi_n^j(t)$, где $d_{j,n} = \langle y, \Psi_{j,n} \rangle$. Условие (1) примет вид:

$$|d_{j,n}| \leq A' j^{\alpha+1/2} \quad (4)$$

Здесь каждая $\Psi_{j,n}$ определяет свой частотно-временной прямоугольник в частотно-временной плоскости. В этом случае процедура

выделения локальных особенностей функции y может быть построена на анализе детализирующих коэффициентов $\bar{d}^j = \{d_{j,n}\}_{n \in \mathbb{Z}}$, которые для малых j определяют мелкомасштабные компоненты сигнала. Из соотношения (4) следует, что данная процедура может быть легко реализована на основе применения *пороговой функции*:

$$f = \sum_{j,n} P_T(d_{j,n}) \Psi_{j,n}, \quad P_T(z) = \begin{cases} z, & \text{если } |z| \geq T, \\ 0, & \text{если } |z| < T, \end{cases}$$

где T – порог. В этом случае встает вопрос определения порога T .

Имея в наличии разномасштабные составляющие сигнала, порог необходимо определять для каждого масштабного уровня j . Выбор порога T для масштаба j может быть основан на следующей процедуре: $T_j = \min |d_{I_{j,n}}|$, где множество индексов $I_{j,n} = \{(j, n) : |n - \nu^j| \leq C_j' j\}$ (см. (2)), ν^j – момент возникновения аномального явления, C_j' – параметр, определяющий размер интервала длительности аномалии на масштабе j .

Коэффициенты вейвлет-преобразования $d_{j,n}$ содержат шумовую составляющую (см. (3)). Они могут быть выделены на основе применения пороговой функции, где порог $T_e = \sigma^2$, $\sigma^2 \approx \frac{\text{Med}(\langle y, \Psi_{j_{\min}, n} \rangle)}{0,6745}$, где Med

– медиана, j_{\min} – наименьший масштаб, k – длина сигнала. Поэтому при выборе порога необходимо учитывать максимальный уровень коэффициентов шума и при выполнении условия: $T_j > T_e$, процедура (4) обеспечит подавление шумовых составляющих сигнала.

Интервал длительности аномалии и масштабы несут важную информацию о происходящем физическом процессе. Зная момент возникновения особенности, ее длительность и масштабные уровни ее проявления, можно выполнить следующую оценку параметров аномалии:

1. Длительность аномалии: $t_{j_{\max}}$, где j_{\max} – наибольший масштаб ее проявления.
2. Длительность аномалии на масштабе j : t_j .
3. Масштабные уровни аномалии: $j_{\text{мек}} \in I_{j,n}$.
4. Момент возникновения аномалии: $t_{\text{мек}} = b$.

В **третьей** главе рассматриваются основные положения теории нейронных сетей. Описывается классическое решение задачи аппроксимации функций на основе нейронной сети, оцениваются его недостатки. Предлагается метод выделения регулярных составляющих

сигналов, основанный на совместном применении вейвлетов и нейронных сетей. Рассматриваются вопросы построения обучающего множества сети и определения внутренней структуры сети.

Особенностью аппарата нейронных сетей является необходимость правильного выбора входных данных для обучения. Процесс формирования входных образов, позволяет оптимизировать процедуру обучения сети и определяет структуру сети.

В задачах аппроксимации функции методами нейронных сетей при формировании обучающей выборки необходимо учитывать следующие важные особенности:

1. Каждое наблюдение зависит от предыдущих значений данных.
2. При обработке сигналов с шумом необходимо учитывать, что шум может исказить результат обучения сети. Поскольку формирование входных образов основано на применении конструкции вейвлет-преобразования, то шумовые компоненты подавляются.

В работе используется сеть прямой передачи сигнала. Обучение выполняется на основе алгоритма обратного распространения ошибки.

Полученный массив данных $\{f(n)\}_{n=1}^M$ делится на L блоков длины K :

$$\{f(n)\}_{n=1}^N = (\{f(n)\}_{n=1}^K, \{f(n)\}_{n=2}^{K+1}, \dots, \{f(n)\}_{n=M-K}^M).$$

На основе отображения сигнала в пространство вейвлет-образов для каждого блока S имеем представление сигнала f в виде линейной комбинации разномасштабных составляющих:

$$f^s = f_1^s + f_2^s + \dots + f_p^s,$$

где $f_j^s \in W_j^{p_i}$, $W_j^{p_i}$ – пространства вейвлет-пакета.

Составляющие, из которых сформируется обучающая выборка для нейронной сети, должны содержать характерные для сигнала признаки. Эти признаки определяют регулярные составляющие сигнала и могут быть идентифицированы следующим образом:

Строим нейронные сети для различных составляющих f_j^s сигнала f :

Цикл 1: Для каждого блока данных S , используя составляющую f_1^s , выполняем вейвлет-восстановление сигнала (остальные составляющие при восстановлении заменяем нулями) и на основе комбинаций восстановленных данных из различных блоков формируем обучающее множество. Строим сеть 1, выполняем ее обучение и тестирование.

Цикл 2: Для каждого блока данных S , используя составляющие f_1^s , f_2^s , аналогично циклу 1, выполняем вейвлет-восстановление сигнала и на основе комбинаций восстановленных данных из различных

блоков формируем обучающее множество. Строим сеть 2, выполняем ее обучение и тестирование.

И т.д.

Цикл p : Для каждого блока данных S , используя составляющие $f_1^S, f_2^S, \dots, f_p^S$, аналогично циклам 1, 2, выполняем вейвлет-восстановление сигнала и на основе комбинаций восстановленных данных из различных блоков формируем обучающее множество. Строим сеть p , выполняем ее обучение и тестирование.

Цикл $(p+1)$: Для каждого блока данных S , используя составляющие f_1^S, f_3^S , выполняем вейвлет-восстановление сигнала и на основе комбинаций восстановленных данных из различных блоков формируем обучающее множество. Строим сеть $p+1$, выполняем ее обучение и тестирование.

И т.д.

Формирование структуры нейронной сети, при выполнении описанных выше циклов, производится на основе следующего алгоритма:

1. Строим сеть, состоящую из одного нейрона в первом слое и α нейронов во втором (выходном) слое. Производим ее обучение.

2. В первый слой сети добавляем один нейрон и вновь произведем ее обучение.

3. Аналогично нейроны продолжаем добавлять в первый слой, до тех пор, пока они улучшают общее качество аппроксимации сигнала сетью.

4. Если очередной нейрон не дает улучшения характеристик сети, удаляем его, а в сеть добавляем промежуточный слой, состоящий из одного нейрона. Аналогичным образом производим обучение сети, и если добавленный слой повысил уровень аппроксимации, то в него начинаем добавлять нейроны по принципу п.2, 3.

5. Подобным образом создается столько слоев, сколько необходимо для достижения требуемого качества работы сети при заданном массиве входных данных.

Таким образом, для каждой возможной комбинации имеющихся признаков строится нейронная сеть, каждая из которых определяется внутренней структурой входных образов. На основе анализа результатов работы полученных нейронных сетей определяем «наилучшую», т.е. имеющую наименьшую ошибку на тестовых данных:

$$E_{N, \min} = \min_l \left(\frac{1}{D} \sum_{n=0}^{D-1} e_i(n)^2 \right), \text{ где } l - \text{ номер сети, } D - \text{ длина тестовой}$$

выборки. Выделенные на основе «наилучшей» сети компоненты сигнала содержат наиболее характерные для него признаки, и определяют регулярные составляющие сигнала. Если при обучении сети использовать

данные, не содержащие определенных особенностей (например, аномалий), то момент возникновения такой особенности в сигнале может быть выявлен на основе анализа вектора ошибок сети.

Предложенный способ получения регулярных составляющих сигнала позволяет избежать потери и искажения информации в отличие от традиционных методов, и применим для широкого спектра сигналов со сложной внутренней структурой.

В **четвертой** главе приводится описание экспериментов по выявлению и оценке параметров аномальных особенностей в сигналах критической частоты. Описывается используемое программное обеспечение. Приводятся эксперименты с модельными сигналами и их результаты. Описывается полученная программная нейросетевая система прогноза значений ионосферного сигнала и программа для анализа f_0F_2 и K-индекса, приводятся результаты их работы.

При проведении экспериментов с *природными сигналами* использовались часовые данные критической частоты f_0F_2 и трехчасовые данные K-индекса, регистрацию которых ведет Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН. Результаты обработки сопоставлялись с данными оперативного каталога землетрясений Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. По причине того, что сигналы f_0F_2 имеют сложную структуру с сезонным ходом и в данных есть пропуски, проводилась предварительная их обработка. Вектор обучающего множества включал данные одного сезона за сейсмически спокойный период времени. Сигналы были разложены на составляющие с помощью вейвлет-пакета и пропуски заполнялись соответствующими им медианными значениями, рассчитанными по данным предыдущего месяца.

В процессе экспериментов была идентифицирована модель ионосферного сигнала, имеющая вид:

$$f(t) = \varphi_3 \left(\sum_i \omega_{im} \varphi_2 \left(\sum_j \omega_{ij} \varphi_1 \left(\sum_k \omega_{kj} \left(\sum_{l=3, k \in Z} c_{l,k} \Psi_{l,k}(t) \right) \right) \right) \right) + \sum_s g_s(t),$$

где $\varphi_1(z) = \varphi_2(z) = \frac{1}{1 + \exp(-z)}$, $\varphi_3(z) = k * z + b$

ω_{kj} - весовые коэффициенты первого слоя нейронной сети, j - ый нейрон первого слоя, ω_{ij} - весовые коэффициенты второго слоя нейронной сети, i - ый нейрон второго слоя, ω_{im} - весовые коэффициенты выходного слоя нейронной сети, $m = \overline{1,3}$ - выход нейронной сети, $\Psi_{l,k}$ - базисный вейвлет, $c_{l,k}$ - коэффициенты сглаженной составляющей вейвлет-пакета, g_s - локальные особенности.

В соответствии с предложенным алгоритмом выявления аномалий с учетом фонового уровня, сезонных характеристик и величины флуктуаций сигнала для каждого масштаба j было определено следующее пороговое значение:

$$T_j = \text{med}_n(d_{j,n}) + 2,5St_j, \quad \text{где}$$

$$St_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (d_{j,n} - \bar{d}_{j,n})^2}, \quad \bar{d}_{j,n} - \text{среднее значение, } \text{med} -$$

медиана, которая характеризует средний уровень процесса. Коэффициент 2.5 определяется статистически. Расчет производился в пределах скользящего временного окна, равного 720 отсчетам сигнала (что соответствует временному интервалу в один месяц). На рис. 2. показан результат применения данного алгоритма для данных 1986 г. Моменты выявления аномалий в сигнале выделены звездочками. Стрелкой отмечен момент землетрясения (2 марта 1986 г., $E = 12,8$). Анализ рис. 2. показывает, что накануне землетрясения в сигнале выявлена многомасштабная аномалия, которая возникла за 23 дня до события и проявила себя на масштабных уровнях 5-15 и 23-38. Длительность аномалии составляла 6 часов. Аналогичные результаты были получены для данных других лет.

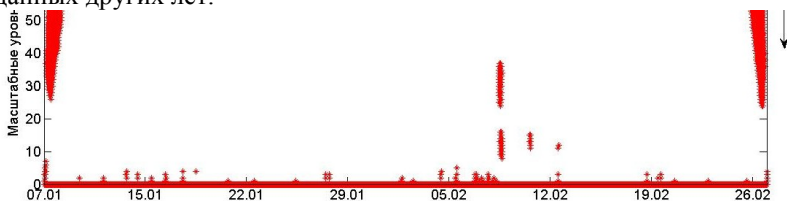


Рис. 2. Результат обработки сигнала критической частоты за январь-февраль 1986 года

Используя предложенный метод выделения регулярных составляющих сигнала, разработана система, включающая трехслойную нейронную сеть прямой передачи сигнала (рис. 3.). Она позволяет выполнить прогноз данных с шагом упреждения, равным 3 отсчетам, что соответствует 3 часам. На вход сети подается вектор, состоящий из 168 отсчетов сигнала, что соответствует 7-ми дням.

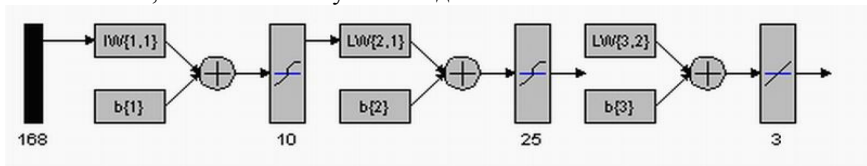


Рис. 3. Система прогноза значений критической частоты

На рис. 4. показаны результаты работы данной системы, обработка выполнялась для данных за 1973 г.: в верхней части показан вектор ошибок сети, в нижней – дисперсия вектора ошибок сети, рассчитанная в

скользящем временном окне, равном 24-м отсчетам. Стрелкой показаны моменты возникновения землетрясений (анализировались землетрясения с энергетическим классом $E > 12,5$). Анализ графиков показывает, что накануне землетрясений наблюдается увеличение ошибки сети. Аномалия была обнаружена за 6 суток до первого землетрясения. Результаты обработки других лет показали, что аномальные особенности в сигналах f_0F2 наблюдаются либо непосредственно перед событием (в случае серии сейсмических событий), либо за 2-6 недель до землетрясений.

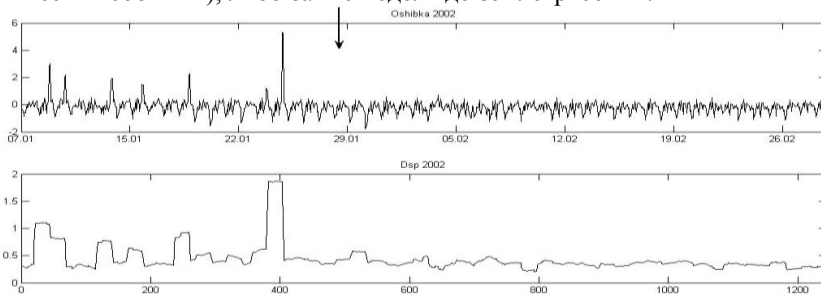


Рис. 4. Ошибка НС при обработке данных за январь-февраль 2002 года.

Также, разработана программная система выявления и оценки параметров аномальных особенностей включающая совместный анализ ионосферного сигнала и данных *индекса геомагнитной активности K*. Данная система основана на экспериментально обнаруженном эффекте, который заключается в превышении критической частотой соответствующих медианных значений на фоне повышенной солнечной активности накануне сейсмических событий на Камчатке. Эффект был отмечен как важное достижение ИКИР ДВО РАН в 2000г.

Система действует по следующему алгоритму:

1. Определяются ряды разностей между текущим значением f_0F2 и соответствующим медианным значением: $u_i = t_{тек} - t_{мед_i}$.

2. В пределах скользящего временного окна выполняется расчет суммы положительных значений ряда разностей: $S_{сумм} = \sum_i u_i : u_i > 0$.

3. Выявление аномалий на основе решающего правила:

$$\begin{cases} S_{сумм} > r_{порог} \\ K_{сумм} > K_{порог} \end{cases}$$

где $r_{порог}$, $K_{порог}$ - пороговые значения, получаемые на основе статистической обработки данных.

4. Выполняется вейвлет-анализ значений ряда f_0F2 : анализируются коэффициенты, абсолютные значения которых превышают пороговое значение.

Система внедрена и в настоящее время используется в ИКИР ДВО РАН. На нее получено свидетельство об отраслевой регистрации разработки. Результат работы системы показан на рис. 5.

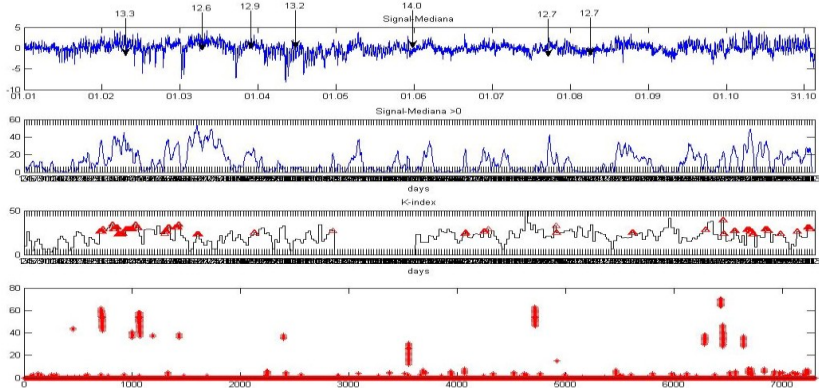


Рис. 5. Результаты работы программной системы выявления и оценки параметров аномальных особенностей сигнала f_oF_2 за период январь-декабрь 1982 года

Для проверки адекватности модели сигнала был разработан *моделирующий алгоритм* и проводилась обработка модельных данных. Модельные сигналы были построены на основе трех компонент: медианные значения ионосферного сигнала, белый шум, многомасштабные аномалии имеющие вид: «всплеска», «пика», «ступени». Длительность внесенных аномалий составляла от 10 до 80 отсчетов, амплитуда – от фонового уровня до 1,3 фонового уровня. На рис. 6. показаны результаты обработки модельных данных. Проведенные эксперименты показали, что эффективность выявления аномалий зависит от длительности, амплитуды, вида аномалии и базисной вейвлет-функции.

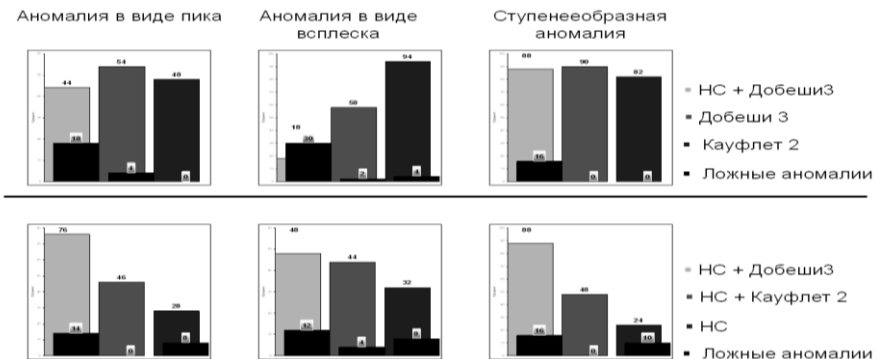


Рис. 6. Результаты экспериментов на модельных сигналах

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные научные и практические результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Предложена модель ионосферного сигнала, описывающая его регулярные составляющие и аномальные особенности.
2. Предложен метод выделения регулярных составляющих сложного сигнала и его аномальных особенностей, основанный на совместном применении вейвлет-преобразования и нейронных сетей.
3. Разработан численный алгоритм выделения и оценки параметров локальных особенностей ионосферного сигнала.
4. Разработан численный алгоритм выделения аномалий в ионосфере, основанный на совместной обработке ионосферных (сигнал критической частоты) и геомагнитных (К-индекс) данных.
5. На основе предложенного метода и алгоритмов разработана программная система анализа и прогноза ионосферных сигналов, внедренная в Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН. При использовании данной системы были выявлены аномалии в поведении ионосферного сигнала накануне сильных землетрясений на Камчатке.
6. Разработана методика и алгоритмы выявления локальных особенностей в виде «всплесков», «пиков», «ступеней» в сигналах сложной структуры.
7. Разработанные программные модули применимы для более широкого круга задач анализа сигналов со сложной структурой.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Полозов Ю.А. Автоматизированный способ обработки сигналов со сложной структурой / Мандрикова О.В., Полозов Ю.А. // Информационные технологии. — Москва. 2008 г. №12, с. 15-19
2. Полозов Ю.А. Способ построения модели временного ряда на основе совместного применения методов нейронных сетей и конструкции вейвлет-преобразования / Мандрикова О.В., Портнягин Н.Н., Полозов Ю.А. // Известия вузов, Северо-Кавказский регион, — Новочеркасск, Серия технические науки. №4. 2008 г. с.5-8.
3. Полозов Ю.А. Моделирование сигналов со сложной структурой на основе конструкции вейвлет-преобразования / Мандрикова О.В., Богданов В.В. Полозов Ю.А. // Информационные технологии. — Москва. 2008 г. №4. с.12-19.
4. Полозов Ю.А. Метод формирования обучающего множества для нейронной сети на основе вейвлет-фильтрации / Полозов Ю.А. //

Известия вузов, Северо-Кавказский регион, — Ростов-на-Дону, Серия естественные науки. №3. 2010 г. — с. 12-16.

Другие статьи и материалы конференций:

5. Полозов Ю.А. Автоматический алгоритм выделения аномальных изменений в ионосферных параметрах на основе обработки сигналов критической частоты f_0F2 и индексов геомагнитной активности К / Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А. // Вестник КамчатГТУ. Выпуск 7. — П.Камчатский, 2008. с. 47-52.

6. Полозов Ю.А. Автоматизированный метод выделения аномальных изменений в ионосферных параметрах накануне сильных землетрясений на Камчатке / Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А. // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2008): [сб. докл.]. — Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ", СПб, 2008. с.122-125.

7. Полозов Ю.А. Выявление аномальных изменений в ионосферных параметрах на основе модельного представления сигналов критической частоты f_0F2 / Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А. // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV международная конференция 16-21 августа 2007г. с. Паратунка: [сб. докл.]. — П.-Камчатский. 2007. с. 213-216.

8. Полозов Ю.А. Моделирование сигнала критической частоты на основе нейронных сетей с целью поиска аномального поведения / Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А. // Proc. of SCM'2006 (International Conference on Soft Computing and Measurements). Санкт-Петербург /Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", СПб, 2006. Т.2. с.158-160.

9. Полозов Ю.А. Анализ изменений, происходящих в ионосферных параметрах накануне сильных землетрясений на Камчатке, на основе вейвлет-преобразования сигналов критической частоты. / Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А. // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2007): [сб. докл.]. — Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ", СПб, 2007, с. 213-216.

10. Полозов Ю.А. Система прогноза ионосферных данных на основе нейронной сети / Полозов Ю.А. // Материалы VI региональной молодежной научной конференции "Исследования в области наук о Земле" 26-27 ноября 2008 г. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В.Беринга. 2008. - с.78-83

11. Полозов Ю.А. Метод обработки сигналов со сложной структурой на основе совмещения конструкции вейвлет-преобразования и нейронных сетей / Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А. // 5-я научная конференция «Управление и информационные технологии» (УИТ-2008), сб. докладов — Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ", СПб, 2008, с. 207-209.

12. Полозов Ю.А. Выявление и анализ аномальных изменений в параметрах критической частоты на основе модельного представления с

использованием нейронных сетей / Полозов Ю.А. // Материалы ежегодной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов КамчатГТУ (15-25 апреля 2008 г.) "Научно-технические исследования рыбохозяйственной отрасли Камчатского края". Ч.1 – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2009. – с. 73-75.

13. Полозов Ю.А. Выделение в геофизических полях аномалий приуроченных к сильным камчатским землетрясениям на основе комплексного анализа экспериментальных данных / Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А. // Сборник трудов первой Международной научно-технической конференции "Компьютерные науки и технологии". Ч.2 – Белгород: ГиК, 2009. – с. 191-194.

14. Полозов Ю.А. Метод выделения и классификации локальных особенностей в сложных природных сигналах / Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Соловьев И.С. // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2010): [сб. докл.]. — Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ", СПб, 2010, т. 2, с. 139-143.

15. Полозов Ю.А. Методы обработки и анализа сложных природных сигналов / Мандрикова О.В., Полозов Ю.А. // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: V международная конференция 2-7 августа 2010г., с. Паратунка: [сб. докл.]. – П.-Камчатский. 2010, с. 189-193.

16. Полозов Ю.А. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки №12205 «Автоматизированная система совместной обработки сигналов критической частоты f_0F2 и индексов геомагнитной активности К с целью выделения аномальных периодов накануне землетрясений», дата регистрации 29.01.2009 / Мандрикова О.В., Богданов В.В. Полозов Ю.А.

Подписано в печать 23.12.2010. Формат 60x84/16

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЗАО «КопиСервис».

Печать ризографическая. Заказ № 1/1223.

П. л. 1.00. Уч.-изд. л. 1.00. Тираж 100 экз.

ЗАО «КопиСервис»

Адрес: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 3.

тел.: (812) 327 5098