



ВЕЙВЛЕТ-ТЕХНОЛОГИЯ АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНЫХ ДАННЫХ

О. В. МАНДРИКОВА
Ю. А. ПОЛОЗОВ
А. С. ПЕРЕЖОГИН

*Институт космofизических исследований и распространения радиоволн
ДВО РАН*

*e-mail: oksa-
nam1@mail.kamchatka.ru*

Для изучения временных особенностей ионосферных параметров предложена вейвлет-технология, позволяющая в автоматическом режиме выделить аномальные особенности и выполнить их анализ и идентификацию. Апробация технологии выполнена по данным различных станций регистрации и выделены аномалии, возникающие в периоды повышенной солнечной и сейсмической активности.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, ионосферные параметры, аномальные особенности.

Данная работа направлена на создание средств и систем по анализу ионосферных параметров и выделению аномальных особенностей, возникающих в ионосфере в периоды повышенной солнечной или сейсмической активности. Ионосферные параметры, представленные в виде временных зависимостей данных, имеют сложную нестационарную структуру [1, 2], что делает неэффективным для решения поставленной задачи применение традиционных методов анализа [3, 4]. Данные методы позволяют выделить некоторые характерные особенности данных, но не дают информации о происходящих во временном ряде локальных изменениях и их масштабных характеристиках.

Наиболее подходящим пространством для представления таких временных рядов является вейвлет-пространство [5, 6], позволяющее получить детальную информацию о локальных структурах, формирующих временной ряд. На основе вейвлет-преобразования в данной работе предложены численные алгоритмы по выделению и анализу особенностей, возникающих во временном ряде в периоды ионосферных возмущений обусловленных повышенной солнечной или сейсмической активностью. Отображение данных выполняется на основе схемы непрерывного вейвлет-преобразования. В качестве базисных функций используется класс ортогональных вейвлетов семейства Добеши [6], позволяющих получить аппроксимации с наименьшей погрешностью для ионосферных данных [7].

Используя свойства вейвлет-преобразования по выделению локальных особенностей функции, основанные на непрерывных разложениях, в работе [8] показано, что характеристикой интенсивности ионосферного возмущения, на фоне которого формируется аномальная особенность, в вейвлет-пространстве являются амплитуда вейвлет-коэффициентов. Настоящая работа фактически является ее продолжением, где описан процесс выделения и анализа аномалий в ионосферной плазме, основанный на применении пороговых функций для данных различных станций регистрации.

Описание технологии

Так как вейвлет Ψ имеет нулевое среднее значение, то вейвлет-преобразование

$$Wf(s, u) = \int f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt, \text{ где } \Psi - \text{вейвлет}$$

измеряет изменение функции f в окрестности точки u , размер окрестности пропорционален масштабу s [5, 6]. При стремлении масштаба s к нулю вейвлет-коэффициенты характеризуют свойства функции f в окрестности точки u .



Если вейвлет Ψ имеет компактный носитель, равный $[-C, C]$, то множество точек (s, u) таких, что некоторая точка ν содержится в носителе $\Psi_{u,s}(t) = s^{-1/2}\Psi((t-u)/s)$, определяют конус влияния точки ν масштабно-пространственной плоскости [5]. Так как носитель $\Psi((t-u)/s)$ на масштабе s равен $[u - Cs, u + Cs]$, то конус влияния ν определяется неравенством $|u - \nu| \leq Cs$. Поэтому, если функция f имеет различные виды особенностей, присутствующих в окрестностях точки ν , характеризовать ее свойства в точке $t = \nu$ достаточно трудно.

Если функция f в окрестности точки ν имеет локальную особенность, то $|Wf(s, u)|$ не удовлетворяет условию асимптотического убывания $|Wf(s, u)|$ при $s \rightarrow 0$ в окрестности точки ν [5]. В работе [8] показано, что тогда операция выделения локальных особенностей может быть реализована на основе проверки условия

$$|Wf(s, u)| > T', \tag{1}$$

где T' – некоторое пороговое значение.

Амплитуда вейвлет-преобразования $|Wf(s, u)|$ в этом случае является характеристикой интенсивности возмущения, которая на анализируемом масштабе s в момент времени $t = u$ может быть определена как

$$E_{s,u} = |Wf(s, u)|. \tag{2}$$

Будем считать, что функция f в окрестности точки ν имеет аномальную особенность, если $|Wf(s, u)|$ в окрестности точки ν удовлетворяет условию:

$$|Wf(s, u)| > T_s, \tag{3}$$

где T_s – пороговое значение на анализируемом масштабе s .

Выделение аномальной особенности может быть реализовано на основе применения пороговой функции:

$$P_{T_s}(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \geq T_s \\ 0, & \text{если } |x| < T_s \end{cases}, \tag{4}$$

где T_s – порог на масштабе s .

Обработка дискретных данных базируется на дискретной схеме вейвлет-преобразования, используя которую функция f может быть представлена в следующем виде [5, 6]:

$$f(t) = \sum_{j,n} \langle f, \Psi_{j,n} \rangle \Psi_{j,n}(t), \Psi_{j,n}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^j t - n), s = \frac{1}{2^j}, j \in Z.$$

Характеристикой интенсивности возмущения в соответствии с равенством (2) тогда будет величина $E_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$.

Аналогично условию (3) будем считать, что функция f в окрестности точки ν имеет аномальную особенность, если в окрестности точки ν

$$E_{j,n} > T_j, \tag{5}$$

где T_j – пороговое значение на масштабе j . Размер аномальной особенности будет соответствовать конусу влияния точки ν и определяться неравенством

$$|n - \nu| \leq C \frac{1}{2^j}. \tag{6}$$



Анализ ионосферных параметров

При обработке и анализе использовались данные критической частоты fOF2, регистрируемые на станциях «Паратунка» (п-ов Камчатка), «Геофизическая обсерватория Магадан» (п. Стекольный) и «Якутск». В процессе анализа для идентификации выделенных аномальных особенностей использовались данные магнитного поля Земли (Hz – компонента), характеризующие солнечную активность.

Определение пороговых значений T_j (см. условие (5)) выполнялось программой автоматически по следующему алгоритму. Учитывая фоновый уровень процесса, величину флуктуаций и их сезонный характер для каждого масштаба j в пределах скользящего временного окна, равного 336 отсчетам данных (что соответствует временному интервалу в 14 дней), пороговые значения T_j определялись как

$$T_j = med_n \left(\langle f, \Psi_{j,n} \rangle \right) + 3St_j, \quad (7)$$

где med – медиана, $St_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left(\langle f, \Psi_{j,n} \rangle - \overline{\langle f, \Psi_{j,n} \rangle} \right)^2}$, $\overline{\langle f, \Psi_{j,n} \rangle}$ – среднее значение вейвлет-коэффициентов в пределах анализируемого скользящего временного окна, N – размер окна.

Исходные данные и результаты их обработки на основе операции (4) представлены на рис. 1-3. Частотно-временные интервалы, содержащие аномальные особенности, показаны оттенками серого цвета. Моменты возникновения землетрясений отмечены на рис.1-3 стрелками (рассматривались события энергетического класса с $k \geq 12,5$ в радиусе $R \sim 300$ км от станции регистрации).

В 1977г. на Камчатке накануне землетрясения, произошедшего весной, в параметрах ионосферы наблюдаются аномальные особенности (выделены на рис.1 пунктирной линией), отсутствующие в других анализируемых районах, что позволяет их идентифицировать как предвестники будущего землетрясения. Накануне землетрясения, произошедшего 21 сентября, наблюдаются значительные пропуски данных, что не позволяет получить результат их обработки. Также результаты анализа данных за 1077г. показывают, что в периоды повышенной солнечной активности, которую характеризуют представленные на рис.1 Hz – компоненты, наблюдаются идентичные аномальные особенности во всех анализируемых районах. Наиболее яркое отражение солнечной активности в параметрах ионосферы на всех анализируемых станциях наблюдается в летний период.

Результаты анализа данных за 1982г. (рис.2) показывают, что на Камчатке накануне землетрясений, произошедших зимой и летом, в параметрах ионосферы возникают аномальные особенности (выделены на рис.2 пунктирной линией), отсутствующие в других анализируемых районах. Накануне землетрясений, произошедших весной (март, апрель) выделение аномальных особенностей затруднительно в связи с происходящими в этот период в ионосфере переходными процессами.

На рис.3 показан результат обработки ионосферных данных станции «Паратунка» за 2011 год. Учитывая суточный ход процесса в пределах скользящего временного окна, равного 720 отсчетам данных (что соответствует временному интервалу в 30 дней), дополнительно по формуле (7) были определены соответствующие каждому часу пороговые значения T_j (рис.3а) и применена операция (4). Анализ рис. 3а показывает наличие суточного хода ионосферного процесса, определяемого на масштабах $j = 1 - 40$. Сопоставление результатов применения различных пороговых функций показывает наличие в ионосферных данных аномальных особенностей длительностью 12 – 36 часов (см. формулу (6)), наблюдаемых в периоды возрастания сейсмической активности.

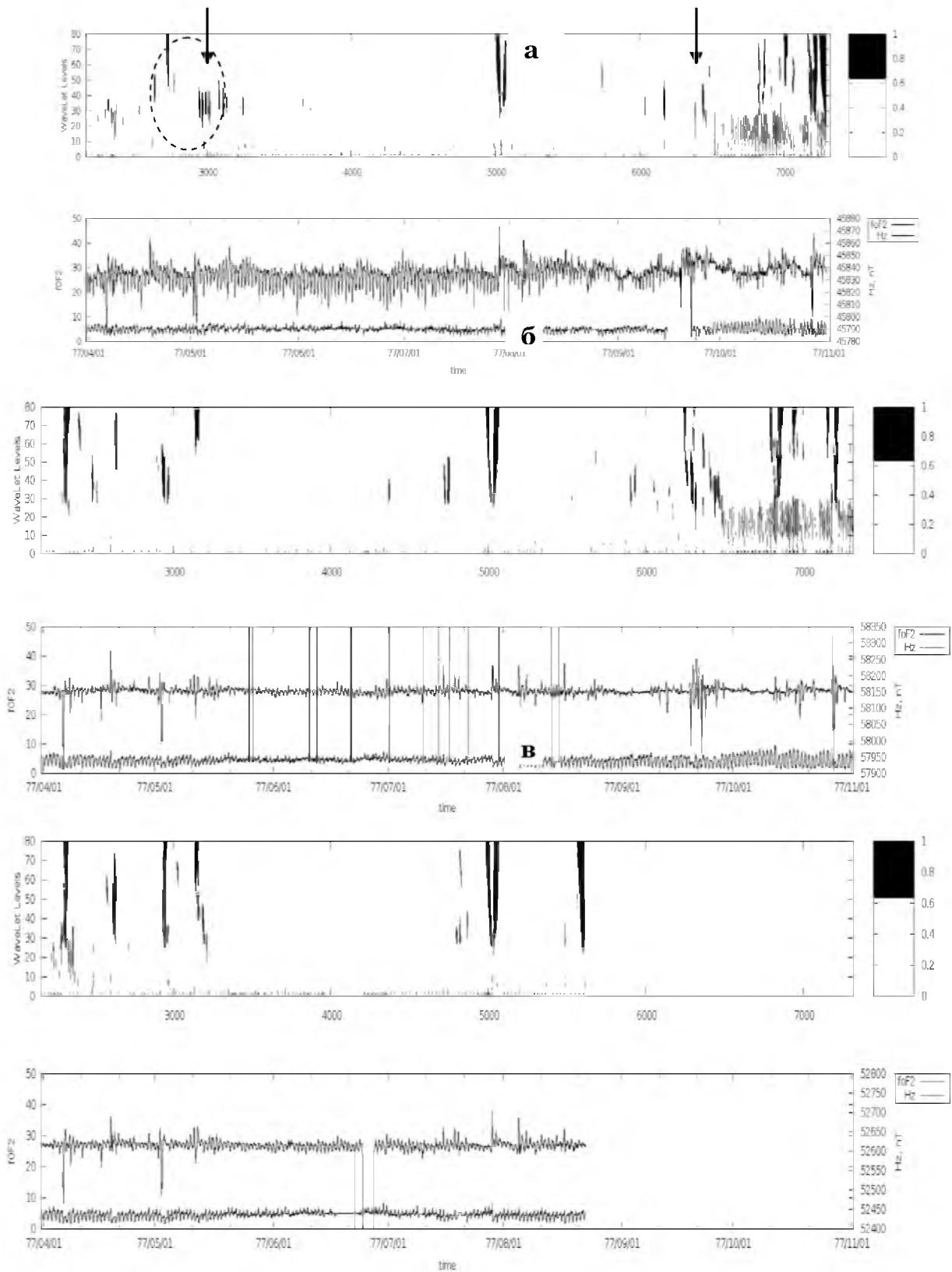


Рис. 1 Результаты обработки данных различных станций регистрации за 1977 г.: а – «Паратунка»; б – «Геофизическая обсерватория Магадан»; в – «Якутск»

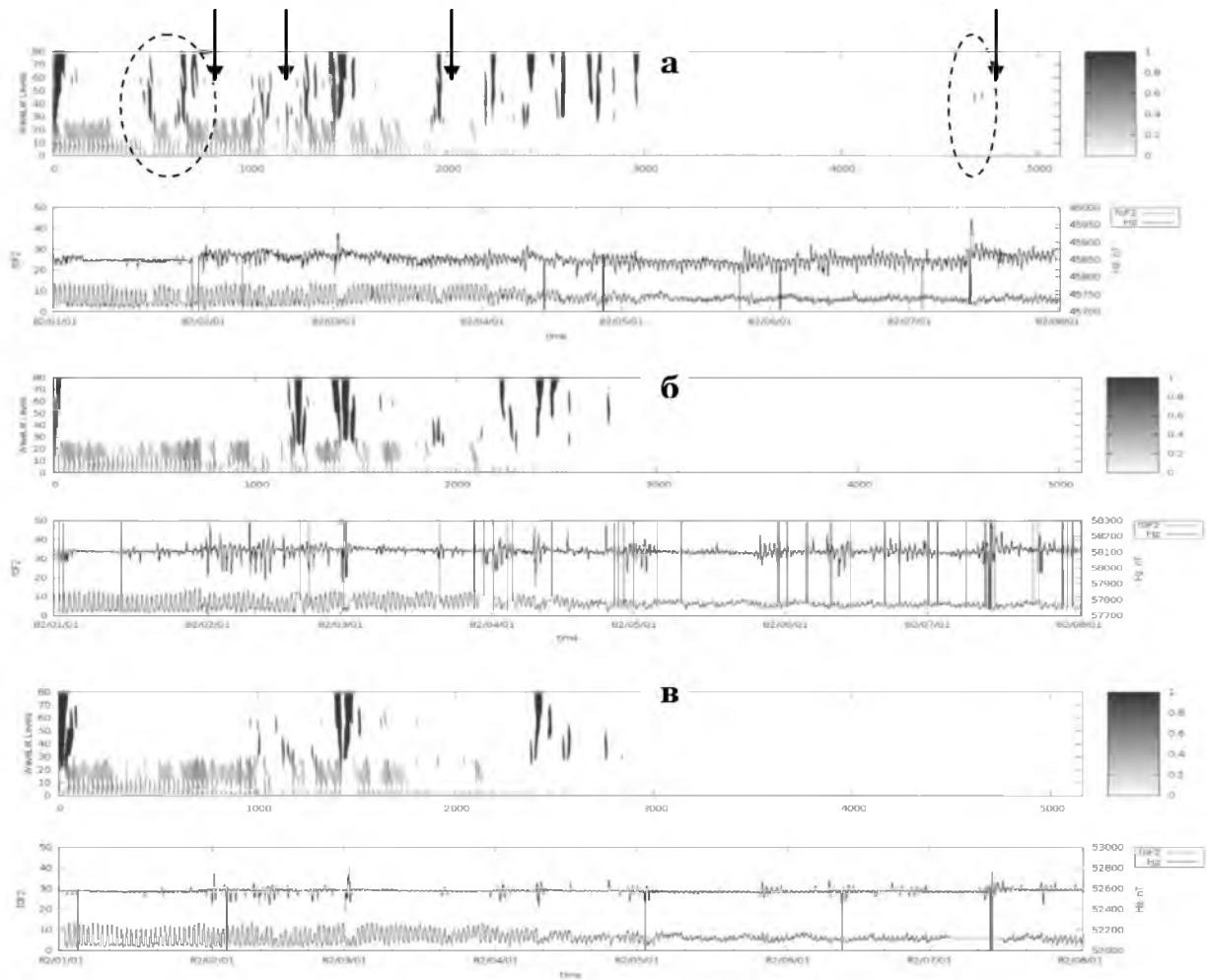


Рис. 2. Результаты обработки данных различных станций регистрации за 1982 г.: а – «Паратунка»; б – «Геофизическая обсерватория Магадан»; в – «Якутск»

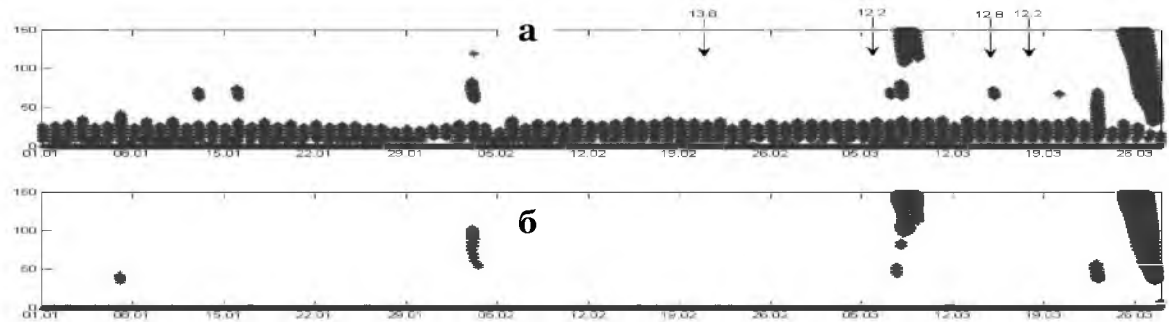


Рис. 3. Результаты обработки ионосферных данных за 2011 год. а – результаты выполнения операции (4) в пределах скользящего временного окна, равного 720 отсчетам данных; б – результаты выполнения операции (4), в пределах скользящего временного окна, равного 336 отсчетам данных

Выводы. Для изучения временных особенностей параметров ионосферы предложена вейвлет-технология, позволяющая выделить аномалии, возникающие во временном ряде в периоды повышенной солнечной или сейсмической активности. Апробация технологии на данных различных станций регистрации подтвердила ее эффективность и позволила выделить аномальные особенности, возникающие в периоды возрастания солнечной активности и накануне сильных землетрясений на Камчатке.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации МД-2199.2011.9, грантом РФФИ – ДВО РАН №11-07-98514-р_восток_а и грантом «У.М.Н.И.К.»-2009 г.



Данные сейсмического каталога любезно предоставлены Камчатским филиалом геофизической службы РАН (г. Петропавловск-Камчатский).

Литература

1. Дёмин М.Г. Ионосфера Земли. Плазменная гелиогеофизика. – М.: Физматлит, 2008. Т. II. – С.92-163.
2. Богданов В.В., Геппенер В.В., Мандрикова О.В. Моделирование нестационарных временных рядов геофизических параметров со сложной структурой. – С.-Петербург: ЛЭТИ. 2006. – 107 с.
3. Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. – М: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. – 688 с.
4. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
5. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 672 с.
6. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Пер. с англ. -Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
7. Мандрикова О.В., Горева Т.С. Метод идентификации структурных компонентов сложного природного сигнала на основе вейвлет-пакетов. – Москва: Цифровая обработка сигналов.- 2010 г.-№1.- с.45-50.
8. Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Пережогин А.С. Метод выделения аномальных особенностей в параметрах ионосферы на основе вейвлет-преобразования // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2011): Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ". – СПб., 2011, т. 2 – С. 144-147.

WAVELET ANALYSIS ALGORITHM OF IONOSPHERIC DATA

O.V. MANDRIKOVA
Y.A. POLOZOV
A.S. PERZHOGIN

*Institute of Cosmophysical
Researches and Radio Wave
Propagation*

e-mail:
oksanam1@mail.kamchatka.ru

Wavelet analysis algorithm is represented to study time characteristics of ionospheric data, to detect anomalies of time series automatically and to analyse data features. Algorithm is put to an evaluation test for experimental data of several ionospheric stations. Anomalies of ionospheric parameters are found at periods of solar and seismic activities.

Key words: wavelet transform, parameters of the ionosphere, anomalies.