

ВЕЙВЛЕТ-ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

Мандрикова О.В., д.т.н., ведущий научный сотрудник Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН; профессор Камчатского государственного технического университета, профессор кафедры систем управления, e-mail: ikir@ikir.ru

Соловьев И.С., аспирант Камчатского государственного технического университета, e-mail: kamigsol@yandex.ru

Ключевые слова: геомагнитные данные, вейвлет-преобразование, пространство Лебега, обработка данных, идентификация, подавление шума.

Введение

Воздействие солнечного ветра на магнитосферу Земли приводит к изменению параметров магнитного поля, вызывает возбуждение разного рода волн [1-2]. В моменты магнитных бурь в геомагнитных данных наблюдаются вариации разных частотных спектров и периодов. Анализ этих особенностей позволяет оценить силу магнитной бури, характеризующей воздействие Солнца на околоземное пространство. Задача их выделения и идентификации в автоматическом режиме является весьма сложной [1, 3-5]. Содержащиеся в регистрируемых геомагнитных сигналах негладкие локальные структуры, несущие главную информацию об исследуемом процессе, делают неэффективным применение традиционных методов анализа временных рядов [6], которые позволяют изучить низкочастотные вариации параметров магнитного поля, но не дают информации о локальных изменениях, протекающих в физическом процессе, и их масштабных характеристиках [1, 4-5].

Учитывая нерегулярную структуру геомагнитных данных, наличие локальных особенностей различной формы и длительности наиболее подходящим пространством для их представления является пространство, натянутое на базис смещенных функций или вейвлет-базис [7-9]. В работах [7, 8] введен специальный класс фильтров, называемых зеркально-сопряженными фильтрами, и показано, что дискретный сигнал может быть восстановлен на основе неполной выборки. Зеркально-сопряженный фильтр характеризует некоторую функцию – вейвлет. В этих же работах был получен алгоритм быстрого дискретного вейвлет-преобразования с помощью каскада таких фильтров и показана эквивалентность теории непрерывных временных вейвлетов и дискретных наборов фильтров, что позволило понять такие важные свойства дискретных алгоритмов как выделение и идентификация локальных особенностей сигналов. Это привело к новому плодотворному контакту между цифровой обработкой сигналов и гармоническим анализом [9].

Процедура анализа геомагнитного сигнала на осно-

Работа посвящена созданию программных систем по анализу геомагнитных данных, выделению и идентификации локальных особенностей, обусловленных солнечной активностью. Предложены алгоритмы, основанные на вейвлет-преобразовании, позволяющие в автоматическом режиме выделить формирующие регистрируемый геомагнитный сигнал локальные структуры, выполнить их анализ и идентификацию. Апробация технологии выполнена на данных магнитного поля Земли, полученных на обсерватории «Паратунка» (с. Паратунка, Камчатский край).

ве вейвлет-преобразования может быть представлена в виде следующих взаимозависимых этапов:

1. Подавление шума и идентификация информативных вейвлет-компонент сигнала.
2. Определение и анализ информативных частотных временных интервалов.
3. Идентификация локальных структур, формирующих процесс в периоды повышенной геомагнитной активности и оценка характеристик поля.

Качество работы конечных систем, основанных на вейвлет-преобразовании, зависит от выбора конструкции и уровня разложения сигнала, процедуры построения аппроксимирующего базиса и способа подавления шума [5, 9-12]. Для построения адаптивных аппроксимирующих схем геомагнитных сигналов в вейвлет-пространстве в данной работе используются нелинейные вейвлет-схемы [9]. Отображение сигнала реализуется на основе конструкции вейвлет-пакетов [7-9]. Определение базиса, обеспечивающего наименьшую погрешность аппроксимации, удаление шума и выделение структурных компонент сигнала выполняется на основе алгоритмов, предложенных в работе [12]. Полученное таким образом представление геомагнитного сигнала в вейвлет-пространстве имеет многокомпонентную структуру, включающую аппроксимирующие и детализирующие составляющие. Аппроксимирующие составляющие характеризуют регулярные изменения процесса, детализирующие – несут локальный характер и характеризуют возмущенность магнитного поля в периоды магнитных бурь [4, 5]. Процедура автоматического выделения геомагнитных возмущений на основе конструкции вейвлет-пакетов описана в работе [4]. Настоящая работа фактически является ее продолжением, где предложены алгоритмы выделения локальных особенностей геомагнитных данных и расчета характеристик поля. Анализируется длительность процесса, характер протекания и рассчитываются энергетические параметры поля. Для ап-

робации предложенных алгоритмов были использованы вариации геомагнитного поля, полученные на обсерватории «Паратунка» (с. Паратунка, Камчатский край).

Основная часть

Структура разложения пространства Лебега $L^2(R)$, порождённая ортогональным вейвлетом $\Psi \in L^2(R)$, имеет вид [7-9]:

$$L^2(R) = \sum_{j \in Z} W_j := \dots \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \dots,$$

где $W_j := \text{clos}_{L^2(R)}(\Psi_{j,n}; n \in Z)$.

Функция f при этом представляется в виде суммы компонент:

$$\forall f \in L^2(R) \exists! f(t) = \dots + v_{-1}(t) + v_0(t) + v_1(t) + \dots, v_j \in W_j, j \in Z. \quad (1)$$

Каждая компонента v_j из (1) имеет единственное представление в виде вейвлет-ряда:

$$v_j = \sum_{n \in Z} c_{j,n} \Psi_{j,n}(t),$$

где $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in Z}$ – ортонормированный базис пространства W_j , n – отсчеты сигнала, j – масштабный параметр, t – время. Коэффициенты $c_{j,n}$ определяются из соотношения: $c_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$.

Если $\Psi_{j-1}^0(t) = \sum_n h_n \Psi_j(2^j t - n)$ и $\Psi_{j-1}^1(t) = \sum_n q_n \Psi_j(2^j t - n)$ – пара сопряженных зеркальных фильтров [9], то семейство $\{\Psi_{j-1}^0(2^{j-1}t - n), \Psi_{j-1}^1(2^{j-1}t - n)\}_{n \in Z}$, где Z – множество целых чисел, является ортонормированным базисом пространства W_j . Конструкция вейвлет-пакетов [9] предполагает рекурсивное расщепление пространства W_j , которое называют деревом пространств вейвлет-пакетов: $W_j^0 = \bigoplus_{i=1}^j W_{j_i}^{p_i}$. С каждым узлом (j_i, p_i) двоичного дерева связывают пространство $W_{j_i}^{p_i}$, которое до-

пускает ортонормированный базис $\{\Psi_{j_i}^{p_i}(2^{j_i}t - n)\}_{n \in Z}$ при движении вниз по дереву. Каждый узел-родитель делится на два ортогональных подпространства. На корне дерева $W_j^0 = W_j$. Объединение соответствующих базисов вейвлет-пакетов $\{\Psi_{j_i}^{p_i}(2^{j_i}t - n)\}_{n \in Z, 1 \leq i \leq j}$ определяет ортонормированный базис W_j , что позволяет полностью восстановить сигнал.

На основе конструкции вейвлет-пакетов геомагнитный сигнал представляется в виде суммы компонент [4]:

$$f_0(t) = \sum_{j_i} g_{j_i}(t) + f_{-m}(t), \quad (2)$$

где $g_{j_i}, f_{-m} \in W_{j_i}^{p_i}$, $g_{j_i}(t) = \sum_n d_{j_i,n}^{p_i} \Psi_{j_i,n}^{p_i}(t)$,

$$d_{j_i,n}^{p_i} = \langle f_0, \Psi_{j_i,n}^{p_i} \rangle, \quad f_{-m}(t) = \sum_n c_{-m,n}^0 \Psi_{-m,n}^0(t),$$

$c_{-m,n}^0 = \langle f_0, \Psi_{-m,n}^0 \rangle$. Компоненты g_{j_i} в соотношении (2)

являются детализирующими, включают в себя приращения порядка 2^{-j_i} и содержат информацию о локальных особенностях сигнала, f_{-m} – аппроксимирующая составляющая.

Как показано в работах [5, 12,] операция подавления шума и идентификации структурных компонент сигнала может быть реализована на основе применения пороговой функции для каждой компоненты разложения

$$P_{T_{j_i}}(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \geq T_{j_i} \\ 0, & \text{если } |x| < T_{j_i} \end{cases}, \quad (3)$$

где T_{j_i} – порог на масштабе j_i , $T_{j_i} \geq \sigma^2$, σ^2 – дисперсия шума.

Погрешность аппроксимации в этом случае есть:

$$\varepsilon = \|f - f_{I_T}\|^2 = \sum_{j \in I_T} \left| \langle f, \Psi_{j,n} \rangle \right|^2, \quad \text{где} \quad (4)$$

$$I_T = \{(j_i, n) : |\langle f, \Psi_{j_i,n} \rangle| \geq T_{j_i}\}.$$

В качестве меры магнитной возмущенности, согласно методике Бартельса [2], будем рассматривать амплитуду возмущения, определяемую на трехчасовом временном интервале и равную разности между наибольшим и наименьшим отклонениями реальной магнитограммы от невозмущенной вариации поля [1-3]. Тогда характеристикой *интенсивности возмущений* в вейвлет-пространстве будет являться амплитуда вейвлет-коэффициентов [4]. Определение пороговых значений $T_{j_i,1}$, обеспечивающих выделение геомагнитных возмущений в сигнале, может быть выполнено на основе следующего алгоритма 1:

1. Спокойным днем будем считать день, в который суточный К-индекс [1-4], характеризующий возмущенность магнитного поля в месте регистрации, не превышает значения 8. Построим полное дерево разложения для каждой вариации геомагнитного поля *спокойного* дня: $W_j^0 = \bigoplus_{i=1}^j W_{j_i}^{p_i}$.

2. Определим пороговые значения T_{j_i} для каждого масштабного уровня j_i по правилу: $T_{j_i,1} = \max_k \max_n |d_{j_i,n}^{p_i,k}|$, где $d_{j_i,n}^{p_i,k}$ значения вейвлет-коэффициентов компоненты g_{j_i} за k -й анализируемый *спокойный* день.

Каждая детализирующая компонента $g_{j_i} \in W_{j_i}^{p_i}$ в (2) определяет свой частотно-временной прямоугольник в частотно-временной плоскости. Процедура (3) с порогом $T_{j_i,1}$ обеспечит выделение в геомагнитном сигнале частотно-временных интервалов, содержащих возмущения. В результате выполнения этой операции на каждом уровне j_i будут сохранены вейвлет-коэффициенты, абсолютные значения которых превышают пороговое значение $T_{j_i,1}$:

$$|d_{j_i,n}^{p_i}| \geq T_{j_i,1}, \quad n = \overline{t_1, t_2} \quad (5)$$

Временная протяженность выделенной локальной окрестности составляет $l = (t_2 - t_1) \cdot 2^{j_i}$.

Абсолютные значения вейвлет-коэффициентов де-

тализирующих компонент сигнала g_{j_i} в (2) несут информацию о величине отклонений от среднего уровня процесса в момент времени $t = n$ и характеризуют возмущенность магнитного поля. На рис.1. а-г, в качестве примера, показаны геомагнитные данные за спокойный и возмущенный (период магнитной бури) периоды времени и результаты выделения возмущений предлагаемыми алгоритмами. Выделение возмущений было выполнено на основе операции (5) с использованием *алгоритма 1*. Анализ рис.1 показывает, что в периоды магнитных бурь наблюдается значительное увеличение амплитуды флуктуаций процесса, которое находит отражение в полученных компонентах преобразования данных.

Для восстановления исходной размерности данных и анализа характера протекания магнитной бури может быть выполнена операция вейвлет-восстановления полученных на основе операции (5) составляющих.

Более детальную информацию о сигнале позволяет получить непрерывное вейвлет-преобразование

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

результатом которого является двумерный массив коэффициентов, дающих представление о составляющих разного масштаба и их изменении во времени. Из непрерывного вейвлет-преобразования следует, что вейвлет Ψ имеет нулевое среднее значение и $Wf(a, b)$ измеряет изменение f в окрестности точки b , размер окрестности пропорционален масштабу a . Как показано в [7], $Wf(a, b)$ дает локальную информацию об аналоговом сигнале f с временным окном

$$[b + at^* - a\Delta\Psi, b + at^* + a\Delta\Psi], \text{ где } t^* - \text{центр окна.}$$

При стремлении масштаба a к нулю вейвлет-коэффициенты характеризуют локальные свойства функции f в окрестности точки b .

Интенсивность возмущений в момент времени $t = b$ на масштабе a определим как

$$I_{a,b} = |Wf(a, b)|.$$

Аналогично, на основе операции (1) получаем представление сигнала в пространстве W_j , где интенсивность возмущения на масштабе j может быть определена как

$$I_{j,n} = |c_{j,n}|. \quad (6)$$

Выделение возмущений в вейвлет-пространстве W_j может быть реализовано на основе следующего *алгоритма 2*:

1. Для каждой вариации геомагнитного поля *спокойного* и *слабовозмущенного* дня выполним отображение в вейвлет-пространство W_j . *Слабовозмущенным* днем будем считать день, в который суточный индекс геомагнитной активности K находится в интервале $8 < K \leq 18$.

2. Определим пороговые значения $T_{j,1}$ и $T_{j,2}$ по правилу: $T_{j,1} = \max_r \max_n |c_{j,n}|$, где r - индекс анализируемого *спокойного* дня; $T_{j,2} = \max_s \max_n |c_{j,n}|$, где s - индекс анализируемого *слабовозмущенного* дня.

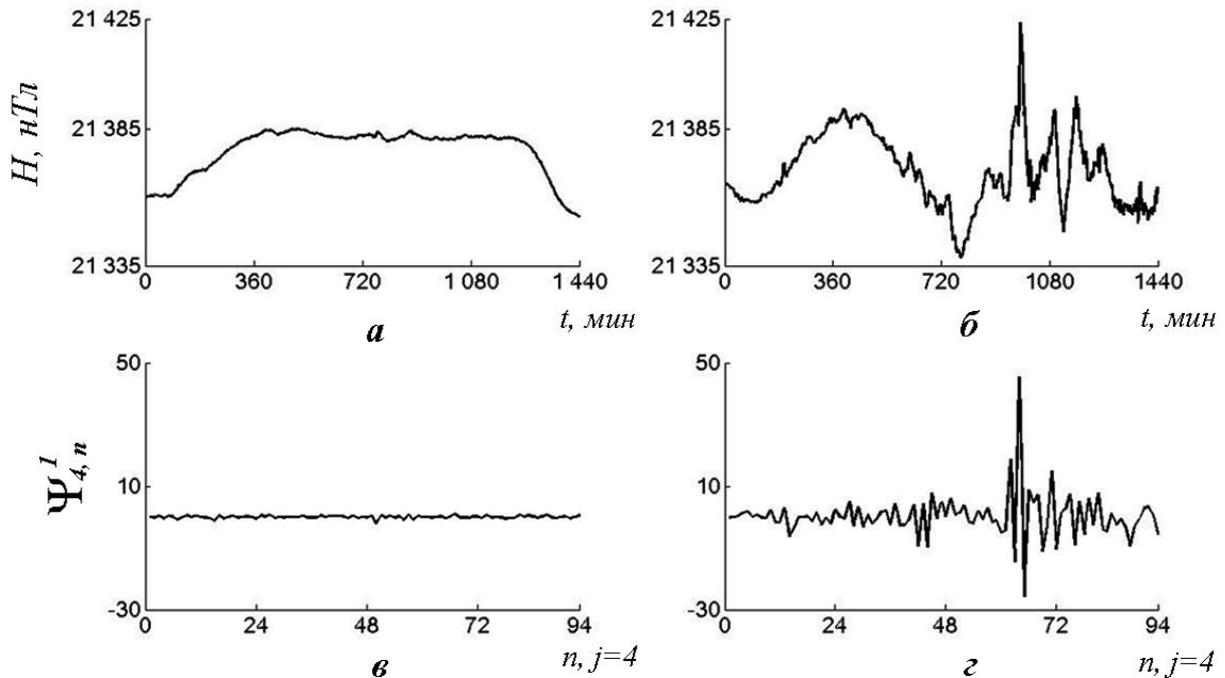


Рис. 1. а – спокойная суточная вариация геомагнитного поля; б – возмущенная суточная вариация; в – компонента вейвлет-разложения $d_{4,n}^1$ спокойной суточной вариации; г – компонента вейвлет-разложения $d_{4,n}^1$ возмущенной суточной вариации.

Результаты экспериментов

При проведении анализа использовались ортонормированные вейвлеты класса Добеши. Путем минимизации погрешности аппроксимации (см. равенство (4)) было определено, что *наилучшими* аппроксимирующими функциями для геомагнитных сигналов являются вейвлеты Добеши порядка 3. Разложение осуществлялось до пятого уровня полного вейвлет-дерева. На основе *алгоритма 1*, в геомагнитных сигналах были выделены частотно-временные интервалы, содержащие возмущения, и получены *возмущенные компоненты* вейвлет-дерева. Анализ полученных компонент показал, что выделенные локальные особенности возникают в сигнале в периоды магнитных бурь. Для анализа магнитных бурь была выполнена операция вейвлет-восстановления данных компонент и получены *возмущенные составляющие* сигнала (рис. 2.-4.б). Используя данные составляющие путем обработки *слабовозмущенных* дней (суммарные суточные значения K -индекса которых не превышают значения 18), было определено пороговое значение $T_j = 4$ (сплошная линия

на рис. 1-4.б), позволяющее выделить сильные геомагнитные возмущения. Это дает возможность в автоматическом режиме фиксировать момент формирования предстоящей бури и выделить отдельные фазы ее протекания. С целью проведения более детального анализа было выполнено вейвлет-преобразование исходных сигналов на основе операции (1) и, используя *алгоритм 2*, идентифицированы частотно-временные интервалы, содержащие слабые и сильные геомагнитные возмущения. Полученные результаты представлены на рис.2-4 в, г, (выделенные интервалы показаны черным цветом). В верхней части рис. 2-4 отображены трехчасовые значения K -индекса. Результаты анализа показывают, что в периоды магнитных бурь интенсивность возмущений возрастает, и в сигналах возникают локальные особенности различной длительности и структуры. Накануне бурь в данных наблюдаются слабые возмущения, интенсивность которых на каждом масштабе j не превышает значений $T_{j,1}$. Во время протекания бурь интенсивность возмущений значительно увеличивается и достигает значений $T_{j,2}$ и более (рис. 1-4 г).

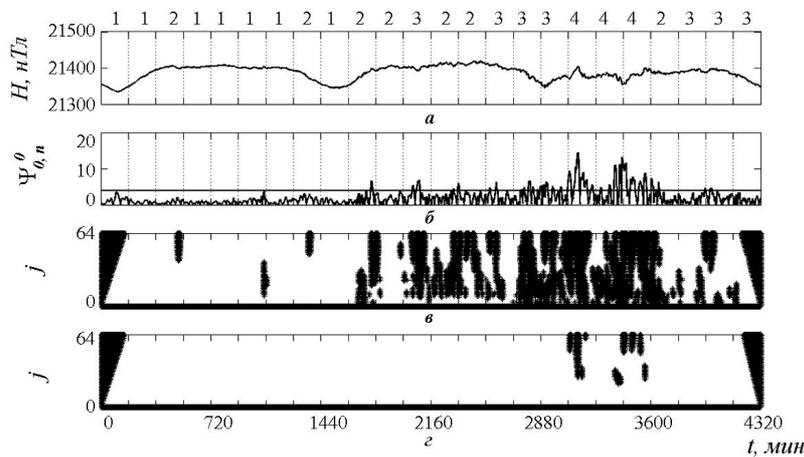


Рис.2. Результат обработки геомагнитных данных

за период 26.04.2002г. - 28.04.2002г. (станция регистрации «Паратунка», Камчатский край).

а) данные регистрации; б) возмущенные составляющие; в) результат обработки данных на основе алгоритма 2 (пороговое значение $T_{j,1}$); г) результат обработки данных на основе алгоритма 2 (пороговое значение $T_{j,2}$).

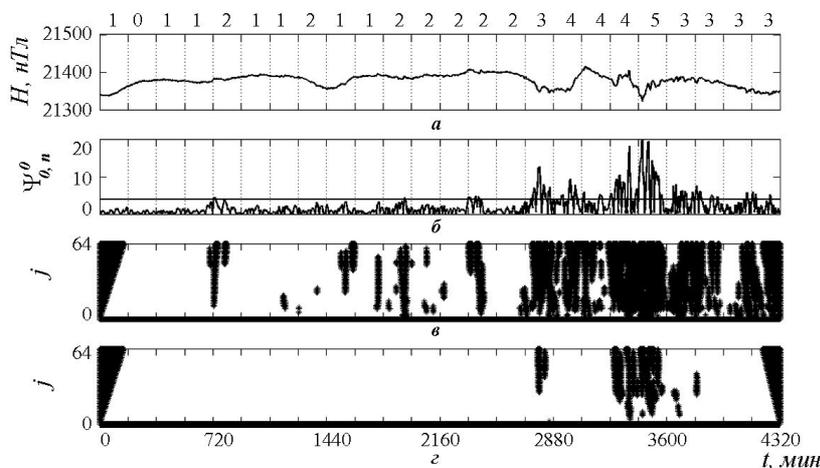


Рис.3. Результат обработки геомагнитных данных

за период 25.05.2002г. - 27.05.2002г. (станция регистрации «Паратунка», Камчатский край).

а) данные регистрации; б) возмущенные составляющие; в) результат обработки данных на основе алгоритма 2 (пороговое значение $T_{j,1}$); г) результат обработки данных на основе алгоритма 2 (пороговое значение $T_{j,2}$).

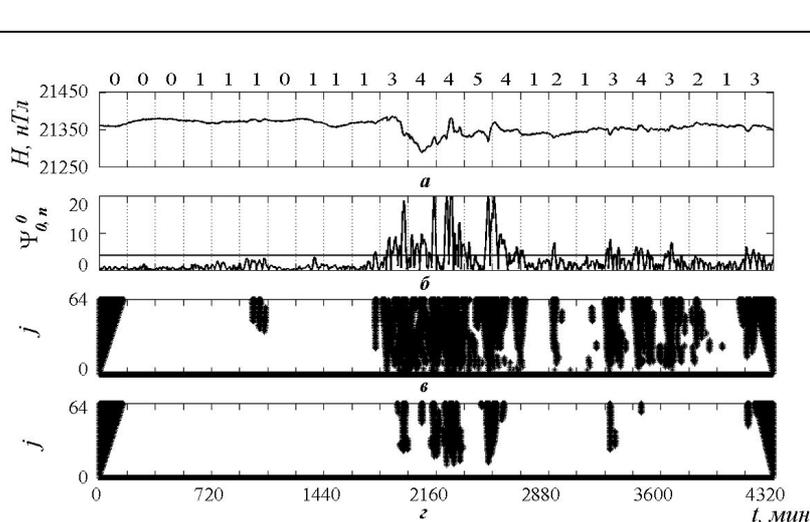


Рис.4. Результат обработки геомагнитных данных за период 10.10.2008г. - 12.10.2008г. (станция регистрации «Паратунка», Камчатский край). а) данные регистрации; б) возмущенные составляющие; в) результат обработки данных на основе алгоритма 2 (пороговое значение $T_{j,1}$); г) результат обработки данных на основе алгоритма 2 (пороговое значение $T_{j,2}$).

Заключение

В работе предложены алгоритмы обработки и анализа геомагнитных данных, основанные на вейвлет-преобразовании, позволяющие в автоматическом режиме выделить периоды повышенной геомагнитной активности и определить интенсивность возмущений. Результаты обработки статистических данных, полученных на обсерватории «Паратунка» (Камчатский край), показали, что в периоды бурь в вариациях магнитного поля возникают локальные разномасштабные периодичности, имеющие неравномерное распределение и по времени, и по масштабам. Во время развития бури интенсивность геомагнитных возмущений значительно увеличивается, что позволяет фиксировать момент предстоящей бури.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации МД-2199.2011.9

Литература

1. Будько Н., Зайцев А., Карпачев А., Козлов А., Филиппов Б. Космическая среда вокруг нас. Троицк: ТРОВАНТ, 2006. - 232 с.
2. Bartels, J., 1938. Potsdamer erdmagnetische Kennziffern, 1 Mitteilung. Zeitschrift für Geophysik, 14:68–78, 699–718.
3. Menvielle M., Papitashvili N., Hakkinen L., Sucksdorff C. Computer production of K indices: review and comparison of methods, Geophys. J. Int., V. 123, p. 866-886, 1995
4. Мандрикова О.В., Соловьев И.С. Вейвлет-технология обработки и анализа вариаций магнитного поля Земли. – Москва: Информационные технологии. 2011. №1. С. 34 – 38.
5. Mandrikova. O.V. Solovyev I.S. Automatic method of the Geomagnetic Activity Index K calculation on the basis of wavelet-packets– 8 International Conference Intelligent information processing IIP-2010 Republic of Cyprus, Paphos October 17-24, с.430-433
6. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. -М.: Мир, 1990. 265 с.

7. Charles K. Chui. An Introduction to Wavelets. Пер. с английского – М.: Мир, 2001.-412с.

8. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. Пер. с английского – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика».– 2001.

9. Stephane Mallat, A Wavelet tour of signal processing. Пер. с английского, – М.: Мир, 2005, 671с.

10. Мандрикова О.В. Моделирование геохимических сигналов на основе вейвлет-преобразования. – Владивосток: Дальнаука. 2007. – 123с.

11. Богданов В.В., Геппенер В.В., Мандрикова О.В. Моделирование нестационарных временных рядов геофизических параметров со сложной структурой. – С.-Петербург: «ЛЭТИ». 2006. – 107с.

12. 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.

WAVELET-BASED APPROACH TO PROCESSING AND ANALYZING GEOMAGNETIC DATA

Mandrikova O.V., Solovyev I.S.

The present paper is directed at creating automated systems for the analysis of geomagnetic data. Due to strong variability, irregularity and complex structure of the geomagnetic data in question the problem of automatic processing (in an automatic mode) is rather complicated and needs further investigation to produce better solutions than those existing at present. In this paper we have suggested a new wavelet-based approach, which allows one to extract subtle structural features from a geomagnetic data in an automatic mode. After that it becomes possible to identify these features and analyze them. Our methods and approaches have been successfully tested on the Earth's magnetic field data obtained in the Paratunka observatory (village Paratunka, Kamchatka region, Far East of Russia).