

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДЕКСА ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ К НА ОСНОВЕ
ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТОВ**
**METHOD FOR DETERMINING THE GEOMAGNETIC ACTIVITY INDICES K
BASED ON WAVELET PACKETS**

Мандрикова О.В., Смирнов С.Э., Соловьев И.С.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Камчатский Государственный Технический Университет

In the present paper an automatic method of the Geomagnetic Activity Index K calculation is proposed. This method is based on wavelet-packets and allows one to determine a solar quiet daily variation Sq-curve in the automatic mode, which utterly corresponds to the manual mode. The novel method suggested in the paper includes the extraction of informative components of a geomagnetic signal and the identification of disturbances. The effectiveness of the method has been proven by numerous experiments on real data.

В качестве широко распространённого индекса геомагнитной активности используется К-индекс. Он был введен Бартельсом в 1938 г. [1] и определяет меру магнитной возмущенности за 3-х часовой интервал времени по 9-бальной квазилогарифмической шкале, которая индивидуальна для каждой станции наблюдения. К-индекс вычисляется из магнитограмм по специальной методике и предполагает высокий уровень профессиональной подготовки персонала магнитной обсерватории [2]. Основные требования данной методики предъявляются к выделению не возмущенной вариации геомагнитного поля, которая называется Sq-кривой.

Существующие методы автоматизации процедуры определения К-индекса [3] не обеспечивают требуемую точность. Существенные погрешности некоторых из предложенных методов связаны с отсутствием средств адаптации к изменчивости Sq-кривой с течением времени. Другие [4] основаны на предварительной обработке исходных магнитных данных, преобразующей их и, как следствие, искажающей конечный результат получения К-индекса.

Магнитный сигнал имеет сложную внутреннюю структуру, включает трендовые компоненты и различные по длительности, амплитуде и частоте флуктуации, характеризующие меру интенсивности возмущений магнитного поля и определяющие наличие, либо отсутствие, возмущений. Это существенно затрудняет определение спокойной вариации геомагнитного поля в автоматическом режиме. Авторами предложен метод автоматической идентификации возмущений в магнитном сигнале, основанный на конструкции вейвлет-пакетов. Ортонормированные базисы вейвлет-пакетов используют сопряженные зеркальные фильтры для разбиения частотной оси на отдельные интервалы различных размеров [5, 6], что позволяет идентифицировать различные типы частотно-временных структур, формирующих сигнал, и провести их детальный анализ. Это дает возможность исследовать магнитные сигналы с достаточной степенью локализации, выделить содержащиеся в нем возмущения и определить их интенсивность, а, следовательно, реализовать процедуру определения спокойной суточной вариации в автоматическом режиме.

Описание метода

Если $\{\Psi_j(2^j t - n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ является ортонормированным базисом пространства U_j с разрешением 2^{-j} , и h, g – пара сопряженных зеркальных фильтров, определяемых формулами

$$\Psi_{j-1}^0(t) = \sum_n h_n \Psi_j(2^j t - n) \text{ и } \Psi_{j-1}^1(t) = \sum_n g_n \Psi_j(2^j t - n),$$

то семейство $\{\Psi_{j-1}^0(2^{j-1} t - n), \Psi_{j-1}^1(2^{j-1} t - n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ является ортонормированным базисом U_j .

Рекурсивное расщепление пространств на основе этой процедуры представляют в виде двоичного дерева [5], которое в вейвлет-теории называют деревом пространств вейвлет-пакетов. Ветка дерева с верхним индексом 0 – U_j^0 является аппроксимирующей и $\Psi_j^0 = \phi_j$, где ϕ_j – скейлинг-функция [5,6].

Применяя рекурсивное расщепление вдоль ветвей двоичного дерева, мы получаем взаимно ортогональные пространства $\{U_j^p\}_{1 \leq p \leq l}$, такие что $U_j^0 = \bigoplus_{p=1}^l U_j^p$.

Объединение соответствующих базисов вейвлет-пакетов $\{\Psi_j^p(2^j t - n)\}_{n \in \mathbb{Z}, 1 \leq p \leq l}$ определяет ортонормированный базис пространства сигнала, что позволяет полностью его восстановить. Не нарушая общности, будем считать, что исходный магнитный дискретный сигнал f_0 имеет разрешение $j = 0$. Тогда схема представления его на основе конструкции вейвлет-пакетов будет иметь вид, показанный на рис.1.

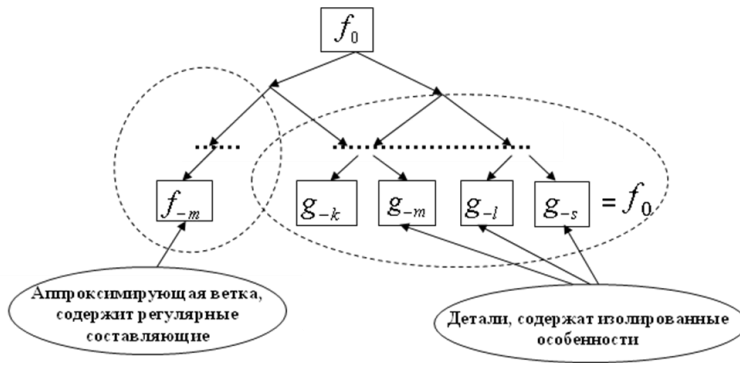


Рис.1. Схема представления сигнала f_0 в пространстве вейвлет-пакетов.

Используя конструкцию вейвлет-пакетов, получаем представление магнитного сигнала f_0 в виде

$$y_0(t) = \sum_j g_j(t) + f_{-m}(t), \quad g_j \in U_j^p, \quad f_{-m} \in U_{-m}^0 \quad (1)$$

Каждая компонента в (1) единственным образом определяется последовательностями коэффициентов

$$\bar{d}^j = \{d_n^j\}_{n \in \mathbb{Z}}, \quad \bar{c}^{-m} = \{c_n^{-m}\}_{n \in \mathbb{Z}}: \quad d_n^j = \langle f, \Psi_j^p \rangle, \quad c_n^{-m} = \langle f, \phi_{-m} \rangle.$$

Одни из выделенных компонент магнитного сигнала являются регулярными составляющими, другие – изолированными особенностями и содержат в себе информацию о величине отклонений от среднего уровня процесса в локальные моменты времени [5, 6], характеризующими здесь возмущенность магнитной составляющей. В работе [5] доказано, что изолированные особенности в сигнале могут быть идентифицированы на основе превышения абсолютных значений вейвлет-коэффициентов $|d_n^j|$ детализирующих компонент g_j порогового значения T_j . Проведенные исследования с магнитными сигналами показали, что геомагнитные возмущения являются многомасштабными структурами и, как следствие, проявляют себя на нескольких масштабных уровнях $j, j \in I_M$ (I_M – множество индексов компонент, содержащих многомасштабные особенности). Первые из указанных могут быть выделены путем проверки условия

$$|d_n^j| = |\langle f, \Psi_j^p \rangle| > T_{j, \text{спок}}, \quad j \in I_B \quad (2)$$

где $T_{j, \text{спок}}$ – пороговые значения, определяющие наличие в сигнале возмущений, I_B – множество индексов компонент, содержащих возмущения.

Процедуру выделения многомасштабных возмущений построим на основе проверки условия

$$\sum_{j \in I_M} |d_n^j| > T_{\text{спок}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{спок}}$ – пороговое значение, определяющее наличие в сигнале многомасштабного возмущения.

Идентификация структуры дерева вейвлет-пакета и значений $T_{j, \text{спок}}$ и $T_{\text{спок}}$ для каждой геомагнитной обсерватории может быть выполнена путем анализа возмущенных и спокойных дней на основе следующего алгоритма:

1. Построение полного дерева разложения: $U_j^0 : U_j^0 = \bigoplus_{i=1}^l U_j^p$,
2. Идентификация информативных компонент $U_{j_{\text{инф}}}^p, j_{\text{инф}} \in (I_M \cup I_B)$: Для каждой компоненты сигнала g_j
 - 2.1 определение максимальных значений функции $|d_n^j|$:
$$c_k^j = \max_n |d_n^j|$$
 - 2.2 сопоставление моментов k возникновения изолированных особенностей в сигнале с моментами геомагнитных бурь, в случае их совпадения (хотя бы для одного дня) данная компонента является информативной $g_{j_{\text{инф}}}$.
3. По данным нулевых дней определение значений $T_{j, \text{спок}}$ и $T_{\text{спок}}$:

$$T_{j, \text{спок}} = \max_l c_{k_l}^{j_{\text{инф}}}, T_{\text{спок}} = \max_l \sum_{j_{\text{инф}}} c_{k_l}^{j_{\text{инф}}},$$

где l - номер анализируемого нулевого дня.

Далее процедура определения спокойного дня в автоматическом режиме может быть реализована на основе разложения сигнала в вейвлет-пакет и сравнения значений $T_j = c_k^{j_{\text{инф}}}$, $T = \sum_{j_{\text{инф}}} c_k^{j_{\text{инф}}}$ текущего дня со значениями $T_{j, \text{спок}}$, $T_{\text{спок}}$ спокойного дня. Если $\forall j T_j \leq T_{j, \text{спок}}$ и $T \leq T_{\text{спок}}$, то текущий день является спокойным днем, в противном случае – возмущенным днем.

Результаты экспериментов

На основе обработки магнитные данные, полученных на обсерватории «Паратунка» (с. Паратунка, Камчатский край), выполнена апробация предложенного метода. При проведении экспериментов использовались базисные вейвлет-функции классов Добеши, койфлеты, биортогональные. Разложение осуществлялось до пятого уровня полного вейвлет-дерева включительно. Результаты обработки магнитных данных обсерватории «Паратунка» показали:

- для выполнения процедуры идентификации спокойного дня информативными являются ветки дерева вейвлет-пакета $U_{-3}^1, U_{-4}^1, U_{-4}^3, U_{-4}^5, U_{-4}^6, U_{-5}^1, U_{-5}^2, U_{-5}^3, U_{-5}^5, U_{-5}^6, U_{-5}^7$.
- анализ различных базисных функций показал, что наименьшую погрешность расчетов обеспечивает функция Добеши 3-го порядка.

На рис. 3 показан результат расчета значений функций $|d_n^{-5}|$ и $\sum_{j \in I_M} |d_n^j|$ для спокойных и

возмущенных дней. На рис. 4 показан результат восстановления информативных составляющих сигнала для возмущенного и спокойного дней. Предварительно эти сигналы были разложены до пятого уровня в базисе Добеши 3-го порядка и удалены неинформативные компоненты, после чего они были восстановлены. Анализ графиков подтверждает эффективность предложенного метода. В таблице 1 приведены результаты определения К-индекса соответственно предлагаемым методом и методом intermagnet [4] за десять дней ноября 2008г. Серым цветом отмечены полученные значения К-индекса, которые отличаются от метода intermagnet.

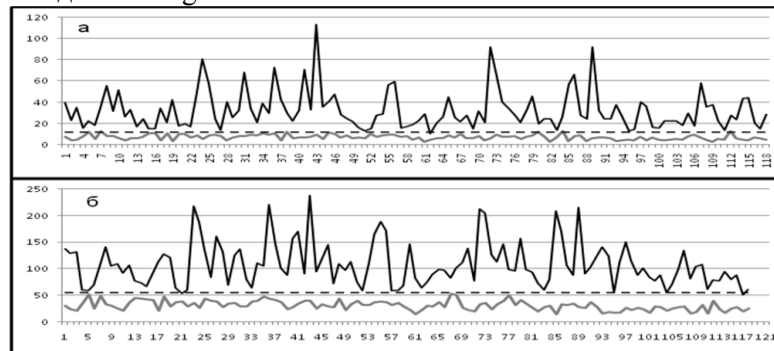


Рис.3. Результат обработки магнитных данных обсерватории «Паратунка» за 2008г. На оси ox отмечены отсчеты сигнала, на оси oy : а – значения функции $|d_n^{-5}|$; б – значения функции $\sum_{j \in I_M} |d_n^j|$. Черной линией отмечены возмущенные дни, серой - спокойные дни.

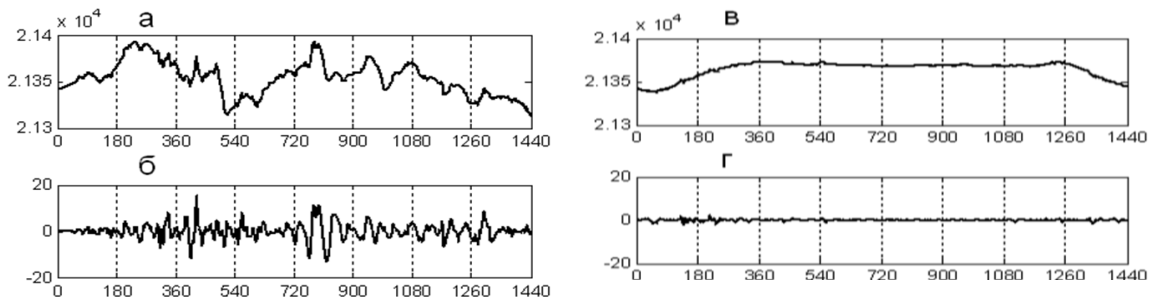


Рис.4. Выделение информативных составляющих сигнала. а – магнитные данные за 23.04 2008 (К-индекс: 3 3 4 4 4 5 3 3). б, г – восстановленная информативные составляющая сигнала. б - магнитные данные за 14.04 2008 (К-индекс: 1 1 0 0 0 0 0 1).

Таблица 1. Результаты расчета К-индекса.

Результат intermagnet	Результат предложенным способом
2008.11	2008.11
1. 1 0 1 0 0 0 0 1	1. 0 0 1 0 0 0 1 0
2. 0 0 1 2 1 0 0 1	2. 0 0 1 2 1 1 1 1
3. 0 0 0 0 0 0 0 1	3. 1 0 0 0 0 0 0 1
4. 0 0 0 0 0 0 0 0	4. 0 0 0 0 0 0 0 0
5. 0 0 0 0 1 0 0 0	5. 0 0 0 0 0 0 0 1
6. 1 0 0 0 0 0 1 0	6. 1 0 0 0 0 0 1 1
7. 0 2 2 2 2 1 2 4	7. 1 2 2 3 2 2 2 3
8. 3 2 3 4 3 2 1 1	8. 3 2 3 4 3 2 2 1
9. 3 2 2 3 1 2 1 3	9. 2 3 2 3 1 1 2 2
10. 0 1 1 1 2 2 0 0	10. 0 1 1 0 2 1 0 0

Выводы: На основе конструкции вейвлет-пакета разработан способ обработки и анализа магнитных данных, который позволяет выделить возмущения в регистрируемом сигнале в периоды магнитных бурь. Разработаны численные алгоритмы, реализующие этот метод. Результаты обработки магнитных данных обсерватории «Паратунка» подтвердили эффективность метода и позволили в автоматическом режиме идентифицировать возмущения и вычислить К-индекс способом, который полностью соответствует способу, предложенному Дж. Бартельсом.

Литература

- Bartels, J., 1938. Potsdamer erdmagnetische Kennziffern, 1 Mitteilung. Zeitschrift für Geophysik, 14:68–78, 699–718.
- Будько Н., Зайцев А., Карпачев А., Козлов А., Филиппов Б. Космическая среда вокруг нас. Троицк: ТРОВАНТ, 2006. - 232 с.
- Головков В.П., Папаташвили В.О., Папаташвили Н.Е. Автоматизированное вычисление К-индексов с использованием метода естественных ортогональных составляющих. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 4. С. 667-670.
- Krzysztof Nowozynski. Calculate geomagnetic activity K indices using the Adaptive Smoothing method. http://www.intermagnet.org/Software_e.html
- Stephane Mallat, A Wavelet tour of signal processing. Пер. с английского, – М.: Мир, 2005.
- Мандрикова О.В. Моделирование геохимических сигналов на основе вейвлет-преобразования. – Владивосток: Дальнаука. 2007. – 123с.