

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК [519.6 + 004.4]:550.3

О. В. Мандрикова^{1, 3}, д-р техн. наук, зав., лаб., e-mail: oksanam1@mail.ru,

И. С. Соловьев^{1, 2}, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: kamigsol@yandex.ru,

Т. Л. Заляев¹, мл. науч. сотр., e-mail: tim.aka.geralt@mail.ru

¹ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка

² Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

им. В. И. Ульянова, г. Санкт-Петербург

Методы анализа вариаций геомагнитного поля и данных космических лучей

Предложен метод моделирования вариации геомагнитного поля, основанный на вейвлетах, и вычислительные решения по оценке энергетических характеристик поля. На основе совмещения вейвлетов с нейронными сетями построены аппроксимации временного хода космических лучей. С использованием разработанных средств выполнен анализ данных, выделены возрастания интенсивности геомагнитных возмущений, предшествующие магнитной буре, и аномалии во временном ходе космических лучей в период основной фазы бури.

Ключевые слова: геомагнитное поле, космические лучи, вейвлет-преобразование, нейронные сети, магнитные бури

Введение

Работа направлена на изучение процессов в околоземном пространстве в периоды возмущений на основе создания методов и алгоритмов анализа, распознавания и интерпретации регистрируемых данных. В возмущенные периоды анализируемые данные имеют сложную нестационарную структуру, содержат негладкие локальные особенности, возникающие в случайные моменты времени и несущие главную информацию об исследуемых процессах. Отсутствие теоретического аппарата, обеспечивающего адекватное описание данных, приводит к неизбежной потере и искажению информации и требует применения современных методов, среди которых важное значение имеют методы распознавания образов и цифровой обработки сигналов [1–9].

В периоды магнитных бурь в вариациях геомагнитного поля наблюдаются колебания в разных частотных диапазонах. Формирующиеся локальные структуры определяются возмущенностью поля и свидетельствуют об интенсивности и характере развития магнитной бури. Сложная структура геомагнитных данных ограничивает возможности методов спектрального анализа, не дающих информации о локальных изменениях, протекающих в физическом процессе, и их масштабных характеристиках.

В данной работе для анализа геомагнитных данных предлагается использовать вейвлет-преобразование. Аппарат вейвлет-преобразования в на-

стоящее время получает широкое распространение в задачах обработки и анализа сложных структур данных. На основе вейвлет-преобразования предложены способы анализа особенностей, возникающих в геомагнитном поле в периоды мощных солнечных вспышек [1, 9], разработаны алгоритмы автоматического определения периодов начальной фазы бури [2], созданы алгоритмы удаления шума и исключения периодической компоненты, вызванной вращением Земли [3, 4]. Разработан метод выделения аномальных изменений в геомагнитных данных [10]. Авторами данной статьи на основе вейвлет-преобразования впервые создана технология автоматического выделения невозмущенного уровня горизонтальной составляющей магнитного поля Земли [11, 12], которая позволила значительно уменьшить погрешности процедуры автоматического вычисления индекса геомагнитной активности (K-индекса) по сравнению с рекомендуемым в INTERMAGNET методом адаптивного сглаживания (KAsm — Adaptive Smoothing method), и в настоящее время используется в обсерваториях "Паратунка" (п-ов Камчатка, ИКИР ДВО РАН) и "Якутск" (г. Якутск, ИКФИА СО РАН). В данной статье описан разработанный авторами метод описания вариации геомагнитного поля (на примере H-компоненты), основанный на вейвлетах, и построенные с его использованием вычислительные решения по выделению геомагнитных возмуще-

ний, оценке их интенсивности и определению периодов повышенной геомагнитной активности. Предлагаемые теоретические средства могут быть реализованы в автоматическом режиме, близком к реальному времени, и адаптированы для различных магнитных обсерваторий.

Ценную информацию об изменении топологии геомагнитного поля во время магнитных бурь дают исследования динамики потока космических лучей [13]. Наблюдаемые на поверхности Земли вариации космических лучей являются интегральным результатом различных солнечных, гелиосферных и атмосферных явлений и имеют сложную внутреннюю структуру. Наиболее существенные изменения в параметрах космических лучей вызывают выбросы коронарной массы и следующие за ними изменения в параметрах межпланетного поля и солнечного ветра [14].

Для изучения динамики потока космических лучей в настоящее время получают развитие методы адаптивной аппроксимации, вейвлет-преобразование и нейронные сети [6, 7, 13, 16]. Преимущество нейросетевого представления аппроксимируемой функции заключается в большой гибкости базовых функций и их способности к адаптации [15]. Использование нейронных сетей при первичной обработке данных космических лучей позволило повысить эффективность процедуры подавления шума по сравнению с медианными методами [5]. На использовании нейронных сетей основан метод автоматического определения внезапного начала магнитных бурь [16]. Авторами статьи на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений с нейронными сетями разработан метод аппроксимации временного хода космических лучей и выявления аномальных изменений, связанных с повышенной активностью Солнца. Метод описан в данной работе, он позволяет подавить шум, выделить характерные вариации и детально изучить их структуру.

На основе предлагаемых средств выполнен совместный анализ данных геомагнитного поля и космических лучей в период сильной магнитной бури 5 сентября 2012 г. В анализе использовались минутные данные международной сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET (www.intermagnet.org) и данные нейтронных мониторов, полученные в рамках проекта NMDB (www.nmdb.eu/). При моделировании вариаций космических лучей выделены аномальные изменения (Форбуш-эффекты), возникающие на фоне повышенной геомагнитной активности. На основе детального анализа геомагнитных данных в периоды, предшествующие развитию главной фазы бури, в геомагнитном поле выделены локальные возрастания интенсивности возмущений, возникающие в разных частотных диапазонах. Наиболее сильные геомагнитные возмущения наблюдаются в периоды аномальных изменений хода космических лучей.

2. Описание методов

2.1. Описание вариации геомагнитного поля на основе вейвлетов

Вариация геомагнитного поля (Н-компонента напряженности магнитного поля Земли) в вейвлет-пространстве может быть представлена в виде [11]

$$f_0(t) = \sum_n c_{-m,n} \varphi_{-m,n}(t) + \sum_{j \in I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) + \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) = f_{\text{спок}}(t) + f_{\text{возм}}(t) + e(t). \quad (1)$$

Здесь компонента $f_{\text{спок}}(t) = \sum_n c_{-6,n} \varphi_{-6,n}(t)$ описывает невозмущенный уровень вариации, а компонента $f_{\text{возм}}(t) = \sum_{j \in I} g_j(t)$, где $g_j(t) = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$ описывает возмущения, возникающие в периоды возрастания геомагнитной активности; $e(t) = \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$ является шумовой компонентой; $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in Z}$ — вейвлет-базис; $\varphi_j = \{\varphi_{j,n}\}_{n \in Z}$ — скэйлинг-функция; $c_{j,n} = \langle f, \varphi_{j,n} \rangle$, $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$, I — набор индексов возмущенных компонент, j — масштаб.

В качестве меры магнитной возмущенности компоненты $g_j(t)$ на масштабе j определена величина $A_j = \max_n (|d_{j,n}|)$ [11, 12]. Для определения набора индексов I можно использовать следующий критерий:

$$j \in I, \text{ если } m(A_j^v) > m(A_j^k) + \varepsilon, \quad (2)$$

где m — выборочное среднее; v — индекс возмущенной вариации поля; k — индекс спокойной вариации поля; ε — некоторое положительное число.

Предполагая, что величина A_j^k имеет нормальное распределение с некоторыми средними μ^k и дисперсией $\sigma^{2,k}$, величину ε можно оценить как $\hat{\varepsilon} = x_{\frac{1-\alpha}{2}} \sqrt{\sigma^{2,k}}$, где $x_{\frac{1-\alpha}{2}}$ — квантиль уровня $\frac{1-\alpha}{2}$ стандартного нормального распределения.

В частности, для данных станции Паратунка (Камчатский край) оценка набора индексов I выполнялась с использованием геомагнитных данных за периоды 2002, 2005, 2008 гг., содержащие 63 возмущенных вариаций поля и 64 спокойных вариаций поля.

В работе рассматривались три возможных состояния геомагнитного поля: состояние h_0 — поле спокойное; состояние h_1 — поле слабовозмущенное; состояние h_2 — поле возмущенное. В соответствии с данными состояниями поля введены следующие состояния коэффициентов $d_{j,n}$:

$$\begin{aligned} h_j^0 & \text{ — коэффициент спокойный;} \\ h_j^1 & \text{ — коэффициент слабовозмущенный;} \\ h_j^2 & \text{ — коэффициент возмущенный.} \end{aligned}$$

В качестве *меры магнитной возмущенности коэффициента* в соответствии с работой [17] логично определить его амплитуду. Тогда, в соответствии с введенными состояниями коэффициентов, из соотношения (1) получим следующее представление вариации геомагнитного поля:

$$f(t) = f_{trend}(t) + \sum_{j,n} F_0(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t) + \sum_{j,n} F_1(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t) + \sum_{j,n} F_2(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t) + e(t); \quad (3)$$

$$F_0(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \leq T_{j,1}; \\ 0, & \text{если } |x| > T_{j,1}; \end{cases} \quad (4)$$

$$F_1(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{j,1} \text{ или } |x| > T_{j,2}; \\ x, & \text{если } T_{j,1} < |x| \leq T_{j,2}; \end{cases}$$

$$F_2(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{j,2}; \\ x, & \text{если } |x| > T_{j,2}, \end{cases}$$

где компонента $g_1(t) = \sum_{j,n} F_1(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t)$ описывает слабые геомагнитные возмущения (коэффициенты компоненты $g_1(t)$ имеют *слабовозмущенное* состояние), компонента $g_2(t) = \sum_{j,n} F_2(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t)$ описывает сильные геомагнитные возмущения (коэффициенты компоненты $g_2(t)$ имеют *возмущенное* состояние), $T_{j,1} > T_{j,2}$. Коэффициенты $d_{j,n}$, для которых $|d_{j,n}| \leq T_{j,1}$, будем считать *спокойными*.

Пороговые функции $F_0(x)$, $F_1(x)$ и $F_2(x)$ в (4) определяют *правила выбора решения* о состоянии коэффициентов. В силу случайной природы исследуемого объекта использование любого правила неминуемо связано с возможностью ошибочных решений. В работе использовалось *правило выбора решения*, определяемое путем минимизации *апостериорного риска* [18].

Пороги $T_{j,1}$ и $T_{j,2}$ разбивают пространство коэффициентов X на три непересекающиеся области X_0 , X_1 и X_2 , а *правило выбора решения* устанавливает соответствие между решениями о состоянии коэффициента и областями. Для заданного состояния h_j^i средняя величина потерь может быть определена как

$$J_j^i(x) = \sum_{l=0}^2 \Pi_{il} P\{x \in X_l / h_j^i\},$$

где Π_{il} — функция потерь, $P\{x \in X_l / h_{j,возм}^i\}$ — условная вероятность попадания выборки в область X_l , если в действительности имеет место состояние h_j^i , $i \neq l$, i, l — индексы состояний (знак "/" означает условную вероятность). Усредняя условную функцию риска по всем состояниям h_j^i , $i = 0, 1, 2$, получаем

средний риск: $J = \sum_{i=0}^2 p_i J_j^i$, где p_i — априорная веро-

ятность состояния h_j^i . Наилучшим правилом будет такое, для которого средний риск будет наименьшим (*байесовский риск*). Поскольку мы не знаем априорное распределение состояний p_i , для выбора наилучшего правила будем использовать *апостериорный риск*. В этом случае апостериорные вероятности $P\{h_j^i/x\}$, $i = 0, 1, 2$, представляют наиболее полную характеристику состояний h_j^i при располагаемых априорных данных. Для простой функции потерь $\Pi_{il} = \begin{cases} 1, & i \neq l; \\ 0, & i = l, \end{cases}$ апостериорный риск

$J_l(x) = \sum_{i \neq l} P\{h_j^i/x \in X_l\}$ и критерием качества выбора решения является критерий наименьшей частоты ошибок.

Путем минимизации апостериорного риска $J_l(x)$ в работе были оценены пороги $T_{j,1}$ и $T_{j,2}$, $j \in I$ для районов Камчатки и Якутска. Критерием оценки состояния коэффициентов являлся К-индекс. В оценках было принято, что:

- 1) коэффициенты принадлежат области X_0 (имеют *спокойное состояние*), если текущее значение К индекса равно 0 или 1;
- 2) коэффициенты принадлежат области X_1 (имеют *слабовозмущенное состояние*), если текущее значение К-индекса равно 2, 3 или 4;
- 3) коэффициенты принадлежат области X_2 (имеют *возмущенное состояние*), если текущее значение К-индекса более 4.

Введенные состояния коэффициентов характеризуют состояние геомагнитного поля и их оценка (на основе принятого *правила выбора решения*) позволяет фиксировать моменты возрастания геомагнитной активности. Ниже в данной работе (см. п. 2.3) с использованием этого подхода предложены вычислительные решения по оценке изменений энергетических характеристик поля и выделению периодов повышенной геомагнитной активности. В целях получения более детальной информации о состоянии геомагнитного поля применяют непрерывные вейвлет-преобразования.

2.2. Оценка изменений энергетических характеристик поля и выделение периодов повышенной геомагнитной активности

Относительно каждого базисного вейвлета Ψ непрерывное вейвлет-преобразование определяется формулой [19]

$$(W_\Psi f)(b, a) := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

$$f \in L^2(\mathbb{R}), a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0.$$

Так как вейвлет Ψ имеет нулевое среднее значение, при стремлении масштаба a к нулю коэффи-

циенты $(W_\Psi f)(b, a)$ характеризуют свойства функции f в окрестности b . Это свойство непрерывного вейвлет-преобразования позволяет получать детальную информацию о локальных свойствах функции f .

Учитывая эквивалентность дискретных и непрерывных вейвлет-преобразований [19], в соответствии с введенной выше мерой магнитной возмущенности коэффициента, интенсивность геомагнитных возмущений в момент времени $t = b$ на анализируемом масштабе a будем оценивать на основе величины

$$e_{b,a} = |(W_\Psi f)(b, a)|. \quad (5)$$

Тогда путем применения пороговых функций к величине $e_{b,a}$ на анализируемом масштабе a можно оценить состояния коэффициентов и выделить частотно-временные интервалы, содержащие слабые и сильные геомагнитные возмущения:

$$P_{T_{a,1}}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T_{a,1}; \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T_{a,1}; \end{cases}$$

$$P_{T_{a,2}}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T_{a,2}; \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T_{a,2}, \end{cases}$$

где порог $T_{a,1}$ позволяет выделить слабые и сильные возмущения, а порог $T_{a,2}$ — сильные возмущения.

На основе (5) получаем, что интенсивность возмущений поля в $t = b$ определяется формулой

$$E_b = \sum_a e_{b,a}.$$

2.3. Аппроксимация временного хода космических лучей на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей

В качестве $f_j(t)$ рассмотрим временной ход космических лучей. Предположим, что пространство исходных дискретных данных есть $V_0 = \text{clos}_{L^2(R)}(\varphi(2^0 t - n))$ (т. е. $j = 0$). Выполним кратномасштабное вейвлет-разложение функции $f_0(t)$ до уровня m и получим ее представление в виде [19]:

$$f_0(t) = g_{-1}(t) + g_{-2}(t) + \dots + g_{-m}(t) + f_{-m}(t) =$$

$$= \sum_{j=-1}^{-m} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) + \sum_n c_{-m,n} \varphi_{-m,n}(t). \quad (6)$$

Для сглаженной компоненты $f_{-m}(t) = \sum_n c_{-m,n} \times \varphi_{-m,n}(t)$ выполним операцию вейвлет-восстановления: $f_0^{(-m)}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(-m)} \varphi_{0,n}(t)$, где верхний индекс $(-m)$ соответствует разрешению компоненты до выполнения операции вейвлет-восстановления.

Далее, на основе нейронной сети для компоненты $f_0^{(-m)}$ строим отображение: $y: f_0^{(-m)} \rightarrow \hat{f}_0^{*(-m)}$.

Для построения отображения используем прямо-направленную нейронную сеть переменной структуры (нейронная сеть переменной структуры — это сеть, структура которой определяется путем минимизации ошибки на обучающем множестве [20]). Обучающее множество формируем из данных, регистрируемых в периоды спокойного геомагнитного поля, которое характеризует состояние околоземного пространства. В этом случае обученная нейронная сеть будет воспроизводить регулярные изменения аппроксимируемых данных (характерные для спокойных условий околоземного пространства). Обучение сети выполняем на основе алгоритма обратного распространения ошибки [15].

Если в построенном отображении $\hat{f}_0^{*(-m)}$ — действительный выход сети, а $f_0^{*(-m)}$ — желаемый, то $f_0^{*(-m)} = y(f_0^{(-m)})$ — неизвестная функция, а $\hat{f}_0^{*(-m)}$ — ее аппроксимация, которую воспроизводит нейронная сеть. При подаче на вход обученной сети значений функции $f_0^{(-m)}$ из интервала $[t_n - Q + 1, t_n]$ сеть становится способной вычислить упрежденные ее значения на временном интервале $[t_n + 1, t_n + S]$, где Q — число нейронов входного слоя сети; t_n — текущий дискретный момент времени; S — длина интервала упреждения.

Ошибка сети (ошибка аппроксимации) в момент времени t_n определяется как разность между желаемым $f_0^{*(-m)}$ и действительным $\hat{f}_0^{*(-m)}$ выходными значениями функции: $e_m[t_n] = \sum_{i=1}^S |f_{0,i}^{*(-m)}[t_n] - \hat{f}_{0,i}^{*(-m)}[t_n]|$, где i — шаг упреждения данных, квадратные скобки обозначают дискретные моменты времени.

Алгоритм построения сети и выбора уровня вейвлет-разложения, основанный на минимизации ошибки аппроксимации, приведен ниже.

Если во временном ходе данных возникает аномальное изменение, то абсолютные значения ошибок сети возрастут [21]. Поэтому путем аппроксимации данных и оценки ошибок сети может быть выполнено обнаружение аномальных изменений, которое может быть основано, например, на проверке условия

$E_{m,U} = \frac{1}{U} \sum_{n=1}^U e_m[t_n] > T$, где U — длина окна наблюдения; T — некоторое наперед заданное пороговое значение.

2.4. Алгоритм построения нейронной сети и выбора уровня вейвлет-разложения

Шаг 1. Получаем представление сглаженной компоненты ряда в виде

$$f_0^{(-m)}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(-m)} \varphi_{0,n}(t),$$

где $m = 1$.

Шаг 2. Массив данных $\{c_{0,n}^{(-m)}\}_{n=1}^N$, где N — длина массива, делим на блоки:

$$\{c_{0,n}^{(-m)}\}_{n=1}^Q, \{c_{0,n}^{(-m)}\}_{n=n+1}^{Q+1}, \dots, \{c_{0,n}^{(-m)}\}_{n=N-Q}^N.$$

Длина блока $Q = 6$.

Шаг 3. Из полученных блоков данных формируем обучающую матрицу размерности $Q \times V$, где Q — длина входного вектора сети, V — число обучающих векторов.

Шаг 4. Строим сеть переменной структуры.

Шаг 5. Используя тестовые данные $\{c_{0,l}^{(-m)}\}_{l=l_0}^L$, оцениваем ошибку сети:

$$E_m = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^S |\varepsilon_i^{(-m)}[l]|,$$

где $\varepsilon_i^{(-m)}[l] = \hat{c}_{0,l}^{i,(-m)} - c_{0,l}^{i,(-m)}$ — ошибка сети в дискретный момент времени l с шагом упреждения i , $c_{0,l}^{i,(-m)}$ — желаемое, $\hat{c}_{0,l}^{i,(-m)}$ — действительное выходные значения сети в дискретный момент времени l с шагом упреждения i , S — длина выходного вектора сети, L — длина массива тестовых данных.

Шаг 6. Оцениваем разницу $\Delta = E_m - E_{m-1}$. Если $\Delta \leq 0$, то переходим к шагу 7. Если $\Delta > 0$, то искомый уровень разложения $m^* = m - 1$, шаг 7 не выполняем.

Шаг 7. Если $m \leq \log_2 N$ (максимальный допустимый уровень разложения M определяется длиной массива данных N : $M \leq \log_2 N$), увеличиваем на 1 уровень разложения ($m = m + 1$) и выполняем шаги 2—5. Если $m > \log_2 N$, искомый уровень разложения $m^* = m$.

2.5. Выбор вейвлета

В данной работе *кратномасштабное вейвлет-разложение* функции $f_0(t)$ (формула (6)) выполнялось с использованием вейвлетов семейства Койфлеты. Койфлеты — единственные из ортогональных функций, которые имеют носитель наименьшего размера при достаточном числе нулевых моментов в *масштабирующей функции* φ [19]: $\int_{-\infty}^{+\infty} t^r \varphi(t) dt = 0$ при $r = \overline{1, p}$.

Данное свойство обеспечивает наилучшее приближение функции в сглаженных компонентах кратномасштабных вейвлет-разложений [19]: если функ-

ция f принадлежит C^r (C^r — пространство функций, r раз непрерывно дифференцируемых) в окрестности $2^{-m}n$ с $r \leq p$, то $2^{-m/2} \langle f, \varphi_{-m,n} \rangle \approx f(2^{-m}n) + O(2^{-m(r+1)})$. Порядок приближения возрастает с ростом p , результирующей Койфлет имеет носитель размера $3p - 1$.

Аппроксимацию данных космических лучей с наименьшей ошибкой позволили получить Койфлеты порядка $p = 3$.

На основе предлагаемого метода для станций Новосибирск и Афины были построены нейронные сети, аппроксимирующие временной ход сглаженной компоненты космических лучей по данным нейронных мониторов. Результаты работы нейронных сетей представлены ниже. В обучении сетей использовались минутные данные за период 2005—2013 гг. Для учета солнечного цикла и связанного с ним изменения уровня космических лучей обучение сетей выполнялось отдельно для каждого года. Построенные нейронные сети имеют трехслойную структуру и выполняют следующее преобразование данных:

$$c_{j,n+1}(t) = \alpha_\chi^3 \left(\sum_\phi \omega_{\chi\phi}^3 \alpha_\phi^2 \left(\sum_\beta \omega_{\phi\beta}^2 \alpha_\beta \left(\sum_n \omega_{\beta n}^1 c_{j,n}(t) \right) \right) \right),$$

где $\omega_{\beta n}^1$ — весовые коэффициенты нейрона β входного слоя сети; $\omega_{\phi\beta}^2$ — весовые коэффициенты нейрона ϕ скрытого слоя сети; $\omega_{\chi\phi}^3$ — весовые коэффициенты нейрона χ выходного слоя, $\alpha_\beta^1(z) = \alpha_\phi^2(z) = \frac{2}{1 + \exp(-2z)} - 1$, $\alpha_\chi^3(z) = a * z + b$, $j = -5$.

3. Результаты применения разработанных средств

На рис. 1, 2 (см. вторую и третью стороны обложки) представлены результаты обработки данных геомагнитного поля и космических лучей в период магнитной бури 5—6 сентября 2012 г. Анализируемая магнитная буря была зафиксирована на Земле 5 сентября 2012 г. Скорость солнечного ветра достигла значений 500...600 км/с в связи с приходом ускоренного потока от СМЕ 2 сентября 2012. Детальный анализ рис. 1, 2 показывает, что накануне бури на анализируемых станциях в разных частотных диапазонах возникли локальные увеличения интенсивности геомагнитных возмущений и сформировались периоды слабой геомагнитной активности (примерно 06:00—08:00 по мировому времени (UT), 10:30—12:30 UT, 17:00—18:00 UT 4 сентября и с 22:00 UT до момента начала бури). Приход ударной волны произошел 05 сентября в 1:00 UT и одновременно на обеих станциях зафиксировано начало Форбуш-эффекта (на станции Новосибирск наблюдалось возрастание ошибки ней-

ронной сети). Максимальные значения интенсивности возмущений поля зафиксированы 5 сентября в период с 6:43 до 6:48 по мировому времени (UT), которые совпадают с периодами сильной геомагнитной активности (на станции Новосибирск наблюдалось максимальное понижение уровня космических лучей и возрастание ошибки нейронной сети в 10 раз, по сравнению со спокойным периодом). Можно отметить, что на станции Афины зафиксированы короткие Форбуш-эффекты с быстрым восстановлением, а на станции Новосибирск — более длительный Форбуш-эффект.

Выводы

С использованием предложенной модели вариации геомагнитного поля, описывающей ее спокойный ход и геомагнитные возмущения, построены вычислительные решения, позволяющие фиксировать моменты возникновения геомагнитных возмущений и получать количественные оценки степени возмущенности поля.

На основе совмещения вейвлет-преобразования с нейронными сетями разработан метод аппроксимации временного хода космических лучей по данным нейтронных мониторов и выделения аномальных изменений, возникающих в периоды повышенной солнечной активности. Метод позволяет детально изучать структуру данных космических лучей и выделять аномальные изменения в их временном ходе в периоды Форбуш-эффектов. На основе метода для станций Новосибирск и Афины построены нейронные сети, аппроксимирующие временной ход сглаженной компоненты космических лучей.

Совместный анализ данных геомагнитного поля и космических лучей в периоды сильных магнитных бурь показал, что наиболее сильные возмущения геомагнитного поля наблюдаются в периоды аномального изменения хода космических лучей и фиксируются на основе предложенного метода. Замечено, что накануне бурь в локальные моменты времени в разных частотных диапазонах может наблюдаться слабое возрастание геомагнитной активности, связанное с приближающейся бурей. Данный результат повысит точность оценки состояния околоземного пространства при выполнении прогноза космической погоды.

В будущем планируется адаптация разработанных средств для большего числа станций регистрации и создание на их основе интегрированной программной среды, обеспечивающей возможности проведения пространственно-временного анализа данных.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-11-00194 и при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0058 от 12.02.2013 г.

1. **Nayar S. R. P., Radhika V. N. and Seena P. T.** Investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet Techniques // Proceedings of the ILWS Workshop Goa, India, February 19–24. 2006.
2. **Hafez A. G., Ghamry E., Yayama H. and Yumoto K.** Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis // Advances in Space Research. 2013. N. 51. P. 39–49.
3. **Xu Z., Zhu L., Sojka J., Kokoszka P., Jach A.** An assessment study of the wavelet-based index of magnetic storm activity (WISA) and its comparison to the Dst index // J. Atmos. Solar–Terr. Phys. 2008. N. 70. P. 1579–1588.
4. **Jach A., Kokoszka P., Sojka J. and Zhu L.** Wavelet-based index of magnetic storm activity // J. Geophys. Res. 2006. Res. 111. DOI: 10.1029/2006ja011635.
5. **Paschalis P., Sarlanis C. and Mavromichalaki H.** Artificial Neural Network Approach of Cosmic Ray Primary Data Processing // Solar Physics. 2013. N. 182 (1). P. 303–318.
6. **Macpherson K. P., Conway A. J. and Brown J. C.** Prediction of solar and geomagnetic activity data using neural networks // J. Geophys. Res. 2001. N. 100. P. 735–744.
7. **Woolley J. W., Agarwal P. K. and Baker J.** Modeling and Prediction of Chaotic Systems with artificial neural networks // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2010. Vol. 63. P. 2117. DOI: 10.1002/flid.2117.
8. **Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A. and Heumez B.** Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory // Earth Planets Space. 2012. N. 64 (9). P. 743–752.
9. **Роганова Н. М., Бондарь Т. Н., Иванов В. В.** Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэронаука. 2004. № 2. С. 276–282.
10. **Zaouar N., Hamoudi M., Manda M., Balasis G. and Holschneider M.** Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance // Earth Planets Space. 2013. N. 65 (12). P. 1525–1540.
11. **Мандрикова О. В., Соловьев И. С.** Вейвлет-технология обработки и анализа вариаций магнитного поля Земли // Информационные технологии. 2011. № 1. С. 34–38.
12. **Mandrikova O. V. and Solovev I. S.** The method of the extracting disturbance and estimates of the Earth's magnetic field is based on the wavelet-packet // Proceedings of 11th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis, Samara, Russia, September 23–28. 2013.
13. **Козлов В. И., Марков В. В.** Вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах // Геомагнетизм и аэронаука. 2007. № 1. С. 56–65.
14. **Vecchio A., Laurenza M., Storini M. and Carbone V.** New Insights on Cosmic Ray Modulation through a Joint Use of Nonstationary Data-Processing Methods // Advances in Astronomy. 2012. DOI: 10.1155/2012/834247.
15. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1104 с.
16. **Segarra A., Curto J. J.** Automatic detection of sudden commencements using neural networks // Earth Planets Space. 2013. N. 65 (7). P. 791–797.
17. **Мандрикова О. В., Богданов В. В., Соловьев И. С.** Вейвлет-анализ данных магнитного поля Земли // Геомагнетизм и аэронаука. 2013. Т. 53. № 2. С. 282–288.
18. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Изд. 2-е. М.: Сов. радио, 1975. 392 с.
19. **Daubechies I.** Ten Lectures on Wavelets. Пер. с англ. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001.
20. **Агеев А. Д., Балухто А. Н., Бычков А. В. и др.** Нейроматематика: учеб. пособие для вузов / Общая ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2002. 448 с.
21. **Мандрикова О. В., Полозов Ю. А.** Аппроксимация и анализ ионосферных параметров на основе совмещения вейвлет-преобразования с коллективами нейронных сетей // Информационные технологии. 2014. № 7. С. 61–65.

O. V. Mandrikova^{1, 3}, Head of Laboratory, e-mail: oksanam1@mail.ru,
I. S. Solov'ev^{1, 2}, Research Associate, e-mail: kamigsol@yandex.ru,
T. L. Zalyaev¹, Research Associate, e-mail: tim.aka.geralt@mail.ru
¹ Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation
(Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences), Paratunka
² Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky
³ Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETT", Saint-Petersburg

Methods of Analysis of Geomagnetic Field Variations and Cosmic Ray Data

Based on the model of the geomagnetic field variations developed by the authors we created computing solutions that allow locating moments of occurrence of geomagnetic disturbances and obtaining quantitative estimates of the degree of disturbance of geomagnetic field.

We propose a method for modeling the cosmic ray time course according to the data from neutron monitors, and, on the basis of the proposed method, computing solutions for allocation of the anomalous changes (Forbush effects) that occur in cosmic rays time variation during periods of high solar activity. According to our method we created neural networks that perform approximation of the smoothed component of cosmic ray time series for stations Novosibirsk and Athens.

Joint analysis of the geomagnetic field and cosmic rays during strong magnetic storms showed that the strongest geomagnetic field perturbations were observed in periods of abnormal changes in cosmic ray level and could be recorded on the basis of the proposed method. Assessment of the energy characteristics of the geomagnetic field on the eve of and during magnetic storm development allowed us to highlight local increases in intensity of the geomagnetic field occurring at different frequency ranges prior to the development of the storm's main phase. Implementation of the proposed method with theoretical tools in combination with other methods will improve the estimation accuracy of the geomagnetic field state during space weather forecasting.

Keywords: geomagnetic field, cosmic rays, wavelet transform, neural networks, magnetic storms

References

1. Nayar S. R. P., Radhika V. N. and Seena P. T. Investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet Techniques. *Proceedings of the ILWS Workshop Goa, India, February 19–24, 2006.*
2. Hafez A. G., Ghamry E., Yayama H. and Yumoto K. Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis, *Advances in Space Research*, 2013, no. 51, pp. 39–49.
3. Xu Z., Zhu L., Sojka J., Kokoszka P., Jach A. An assessment study of the wavelet-based index of magnetic storm activity (WISA) and its comparison to the Dst index, *J. Atmos. Solar–Terr. Phys.*, 2008, no. 70, pp. 1579–1588.
4. Jach A., Kokoszka P., Sojka J. and Zhu L. Wavelet-based index of magnetic storm activity, *J. Geophys.*, 2006. Res. 111. DOI: 10.1029/2006ja011635.
5. Paschalis P., Sarlanis C. and Mavromichalaki H. Artificial Neural Network Approach of Cosmic Ray Primary Data Processing, *Solar Physics*, 2013, no. 182 (1), pp. 303–318.
6. Macpherson K. P., Conway A. J. and Brown J. C. Prediction of solar and geomagnetic activity data using neural networks, *J. Geophys. Res.*, 2001, no. 100, pp. 735–744.
7. Woolley J. W., Agarwal P. K. and Baker J. Modeling and Prediction of Chaotic Systems with Artificial Neural Networks, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2010, vol. 63. DOI: 10.1002/flid, pp. 2117.
8. Solov'ev A., Chulliat A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A. and Heumez B. Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory, *Earth Planets Space*, 2012, no. 64 (9), pp. 743–752.
9. Rotanova N. M., Bondar' T. N., Ivanov V. V. Vejvlet-analiz vekovykh geomagnitnykh variacij, *Geomagnetizm i ajeronomija*, 2004, no. 2, pp. 276–282 (in Russian)
10. Zaourar N., Hamoudi M., Manda M., Balasis G. and Holschneider M. Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance, *Earth Planets Space*, 2013, no. 65 (12), pp. 1525–1540.
11. Mandrikova O. V., Solov'ev I. S. Vejvlet-tehnologija obrabotki i analiza variacij magnitnogo polja Zemli, *Informacionnye tehnologii*, 2011, no. 1, pp. 34–38.
12. Mandrikova O. V. and Solov'ev I. S. The method of the extracting disturbance and estimates of the Earth's magnetic field is based on the wavelet-packet, *Proceedings of 11th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*, Samara, Russia, September 23–28, 2013.
13. Kozlov V. I., Markov V. V. Vejvlet-obraz geliosfernoj buri v kosmicheskikh luchah, *Geomagnetizm i ajeronomija*, 2007, no. 1, pp. 56–65 (in Russian).
14. Vecchio A., Laurenza M., Storini M. and Carbone V. New Insights on Cosmic Ray Modulation through a Joint Use of Nonstationary Data-Processing Methods, *Advances in Astronomy*, 2012. DOI: 10.1155/2012/834247.
15. Hajkin S. Nejrorny seti: polnyj kurs, Moscow: Izdatel'skij dom "Vil'jams", 2006, 1104 p. (in Russian).
16. Segarra A., Curto J. J. Automatic detection of sudden commencements using neural networks, *Earth Planets Space*, 2013, no. 65 (7), pp. 791–797.
17. Mandrikova O. V., Bogdanov V. V., Solov'ev I. S. Vejvlet-analiz dannykh magnitnogo polja Zemli, *Geomagnetizm i ajeronomija*, 2013, vol. 53, no. 2, pp. 282–288 (in Russian).
18. Levin B. R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Izd. 2-e, Moscow: Sov. radio, 1975, 392 p. (in Russian).
19. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Per. s anglijskogo, Izhevsk: NIC "Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika", 2001 (in Russian).
20. Ageev A. D., Baluhto A. N., Bychkov A. V. i dr. Nejrornematika: Ucheb. posobie dlja vuzov, Moscow: IPRZhR, 2002, 448 p. (in Russian).
21. Mandrikova O. V., Polozov Ju. A. Approksimacija i analiz ionosfernykh parametrov na osnove sovmeshhenija vejvlet-preobrazovanija s kolektivami nejronnykh setej, *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 7, pp. 61–65. (in Russian).