

Моделирование и анализ вариаций космических лучей в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активности*

О. В. Мандрикова, Т. Л. Заляев, Ю. А. Полозов, И. С. Соловьев

oksanam1@mail.ru, tim.aka.geralt@mail.ru, up_agent@mail.ru, kamigsol@yandex.ru

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Россия, Камчатский край, Елизовский район, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

Описан способ анализа вариаций космических лучей (КЛ), позволяющий выделять аномальные изменения и получать количественные оценки о моментах их возникновения, временной длительности и интенсивности. Способ включает декомпозиции данных нейтронных мониторов на основе вейвлет-преобразования и их аппроксимацию на основе адаптивных нейронных сетей переменной структуры. На основе применения способа выполнен анализ вариаций КЛ в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активности и выделены аномальные изменения, возникающие за несколько часов до геомагнитных бурь, во время бурь происходили длительные и глубокие Форбуш-понижения (анализировались данные нейтронных мониторов станций Апатиты и Мыс Шмидта). Совместно с данными КЛ анализировались вариации геомагнитного поля и ионосферные параметры, обработка которых выполнялась на основе методов, предложенных авторами.

Ключевые слова: *космические лучи; магнитная буря; ионосферные параметры; анализ данных; вейвлет-преобразование; нейронные сети*

DOI: 10.21469/22233792.2.1.07

1 Введение

Наблюдаемые на поверхности Земли вариации КЛ являются интегральным результатом различных солнечных, гелиосферных и атмосферных явлений и имеют сложную структуру [1, 2]. Наиболее существенные изменения в параметрах КЛ вызывают выбросы коронарной массы и следующие за ними изменения в параметрах межпланетного поля и солнечного ветра [3, 4]. Их интенсивность зависит от метеорологических параметров, электромагнитной обстановки в Солнечной системе и физических условий в Галактике [1]. Также в вариациях КЛ находит отражение 11-летний цикл и 27-дневный солнечный период вращения [2] и присутствует суточный ход, обусловленный асимметрией формы магнитосферы, которая изменяется во времени при изменении параметров солнечного ветра [5].

Наблюдения КЛ используются при проведении ряда фундаментальных и прикладных исследований, связанных с мониторингом и прогнозом космической погоды [1, 3]. Анализ КЛ позволяет получать ценную информацию о состоянии околоземного космического пространства в периоды экстремальных солнечных событий. Весьма актуальной задачей является выделение аномальных изменений в динамике КЛ накануне сильных геомагнитных бурь [3, 6, 7]. Данные КЛ имеют сложную структуру, и традиционные методы обработки статистических данных не являются достаточно эффективными для их исследования [4, 5, 8, 9]. Для изучения вариаций КЛ в настоящее время получают развитие методы адаптивной аппроксимации [4], вейвлет-преобразование [4, 9–14] и нейронные сети

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №14-11-00194.

(НС) [8, 14–16]. Использование НС при первичной обработке данных нейтронных мониторов позволило повысить эффективность процедуры подавления шума, по сравнению с медианными методами [8]. На основе совмещения вейвлет-преобразования с методом разложения на эмпирические моды в долгосрочных временных изменениях хода КЛ выделены доминирующие временные масштабы (периоды 11 лет, 22 года, 6 лет и двухлетние колебания) и определена их физическая природа [4]. Исследования данной работы основаны на совместном применении методов вейвлет-преобразования и адаптивных НС переменной структуры. Вейвлет-преобразование позволяет выполнять детальный анализ локальных структур данных [17, 18] и является эффективным средством изучения сложных нестационарных процессов [10–13, 19–21]. Преимущество нейросетевого представления аппроксимируемой функции заключается в большой гибкости базовых функций и их способности к адаптации [22, 23]. Совместное применение кратномасштабного вейвлет-преобразования с НС, впервые предложенное в работе [14] для анализа КЛ, показало эффективность данного подхода в задачах изучения их структуры и выделения аномальных изменений в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активности. Данная статья является продолжением этой работы. Для получения более детальной и достоверной информации об изменениях в параметрах КЛ совместно с разработанными решениями в статье предложено использовать непрерывное вейвлет-преобразование и пороговые функции.

2 Описание способа

2.1 Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабного вейвлет-преобразования и нейронных сетей

1. На основе кратномасштабного анализа (КМА) вейвлет-преобразования до уровня разложения получаем представление вариации КЛ в виде [17, 24]:

$$f_0(t) = \sum_{j=-1}^{-m} f^d[2^j t] + f^a[2^{-m} t].$$

Здесь $f^d[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$, где $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ — разномасштабные детализирующие компоненты, $f^d[2^j t] \in W_j$, $W_j = \text{clos}_{L^2(R)}(2^{j/2} \Psi(2^j t - n) : n \in Z)$, Ψ — базисный вейвлет, j — разрешение; $f^a[2^{-m} t] = \sum_k c_{-m,n} \theta_{-m,n}(t)$, где $c_{-m,n} = \langle f, \theta_{-m,n} \rangle$ — сглаженная составляющая, $f^a[2^{-m} t] \in V_{-m}$, $V_j = \text{clos}_{L^2(R)}(2^{j/2} \theta(2^j t - n) : n \in Z)$, θ — сглаживающая скэйлинг-функция. Представление вариации КЛ в вейвлет-пространстве на основе КМА до 6-го масштабного уровня разложения показано на рис. 1.

2. Используя обратное вейвлет-преобразование, восстанавливаем исходное разрешение компонент:

$$f_0^{a,(-m)}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(-m)} \theta_{0,n}(t), \quad f_0^{d,j}(t) = \sum_n d_{0,n}^j \Psi_{0,n}(t),$$

верхние индексы $(-m)$ и j соответствуют уровню разложения и разрешению компонент до выполнения операции обратного вейвлет-преобразования. Получаем вариацию КЛ в виде:

$$f_0(t) = f_0^{a,(-m)}(t) + \sum_{j=-1}^{-m} f_0^{d,j}(t). \quad (1)$$

В соответствии с представлением (1) вариация КЛ включает сглаженную составляющую $f_0^{a,(-m)}(t)$, характеризующую уровень КЛ, и разномасштабные детализирующие компоненты $f_0^{d,j}(t)$, характеризующие локальные вариации относительно уровня.

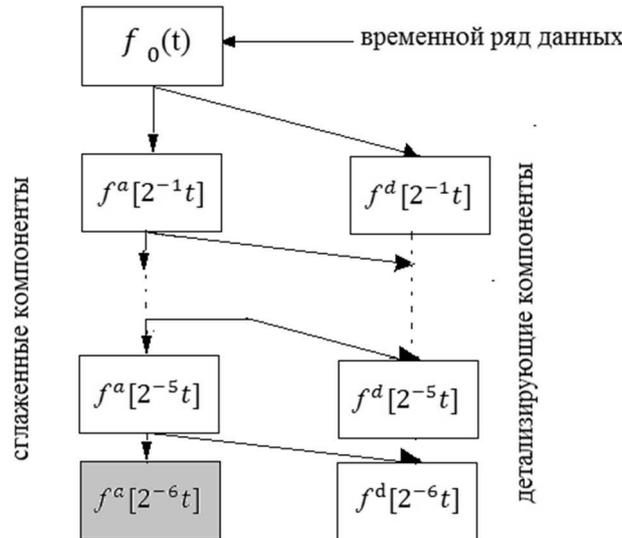


Рис. 1 Схема разложения данных КЛ на основе КМА

3. Для сглаженной составляющей КЛ на основе НС переменной структуры строим отображение (задача статистической экстраполяции, [9])

$$y: f_0^{a,(-m)} \rightarrow f_0^{*a,(-m)}, \tag{2}$$

где $f_0^{a,(-m)}$ — вход НС; $f_0^{*a,(-m)}$ — выход НС. При подаче на вход обученной НС значений функции $f_0^{a,(-m)}$ из интервала $(l - Q + 1, l)$ сеть вычисляет упрежденные ее значения на временном интервале $(l + 1, l + I)$, где l — текущий дискретный момент времени; I — длина интервала упреждения. Ошибка НС определяется как разность между желаемым $f_0^{*a,(-m)}$ и действительным $\hat{f}_0^{*a,(-m)}$ выходными значениями функции:

$$e(t) = \hat{f}_0^{*a,(-m)}(t) - f_0^{*a,(-m)}(t).$$

Алгоритмы выбора уровня разложения КМА m (см. п. 1) и построения нейросетевой схемы представлены в работах [9, 14]. При выполнении данной работы аппроксимирующие нейросетевые схемы, выполняющие отображение (2), строились отдельно для каждой станции регистрации данных КЛ. Учитывая долгосрочные временные изменения хода КЛ (периоды 11 лет, 22 года, 6 лет и двухлетние колебания), данные за разные годы моделировались отдельно. Поскольку динамика КЛ существенно зависит от электромагнитной обстановки в Солнечной системе и в периоды аномальных изменений находит отражение в геомагнитном поле [25], с целью экстраполяции характерного (фоновое) хода КЛ в оценках использовались данные за временные интервалы относительно спокойного геомагнитного поля (интервалы, в которые суммарный за сутки К-индекс не превышает значения 18). При выполнении КМА использовались вейвлеты семейства Койфлеты порядка 3, которые были определены путем минимизации погрешности аппроксимации. Были построены нейросетевые схемы для выделенной сглаженной составляющей масштабного уровня $m = -6$ (данная составляющая показана на рис. 1 серым цветом), их архитектура представлена на рис. 2. Полученные нейросетевые схемы выполняют преобразование данных вида:

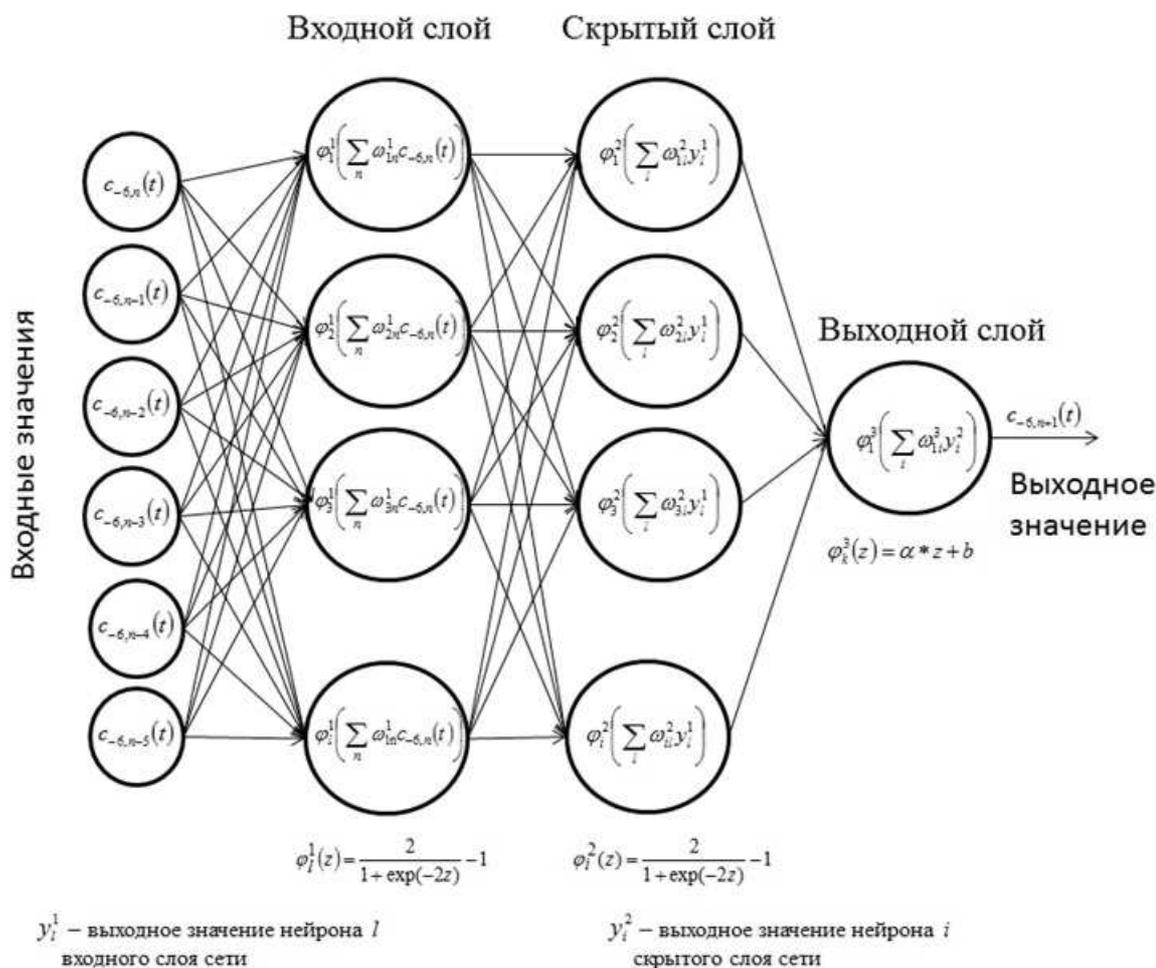


Рис. 2 Архитектура построенных нейросетевых схем

$$c_{-6,n+1}(t) = \varphi_k^3 \left(\sum_i \omega_{ki}^3 \varphi_i^2 \left(\sum_l \omega_{il}^2 \varphi_l^1 \left(\sum_n \omega_{ln}^1 c_{-6,n}(t) \right) \right) \right),$$

где ω_{ln}^1 – весовые коэффициенты нейрона l входного слоя сети; ω_{il}^2 – весовые коэффициенты нейрона i скрытого слоя сети; ω_{ki}^3 – весовые коэффициенты нейрона k выходного слоя; $\varphi_l^1(z) = \varphi_i^2(z) = 2/(1 + \exp(-2z)) - 1$; $\varphi_k^3(z) = az + b$.

Применение нейросетевой схемы позволяет воспроизводить характерные вариации сглаженной составляющей КЛ $f_0^{a(-m)}$ (аппроксимирует характерный уровень вариаций КЛ). В период аномальных изменений временного хода КЛ абсолютные значения ошибок обученной НС возрастут, поэтому операция их выделения может быть основана, например, на проверке следующего условия:

$$|e(t)| > T,$$

где T – пороговое значение, определяющее наличие аномалии.

На рис. 3 в качестве примера показаны результаты работы построенной нейросетевой схемы для станции Апатиты за 2013 г. Анализ рис. 3 показывает хорошие аппроксими-

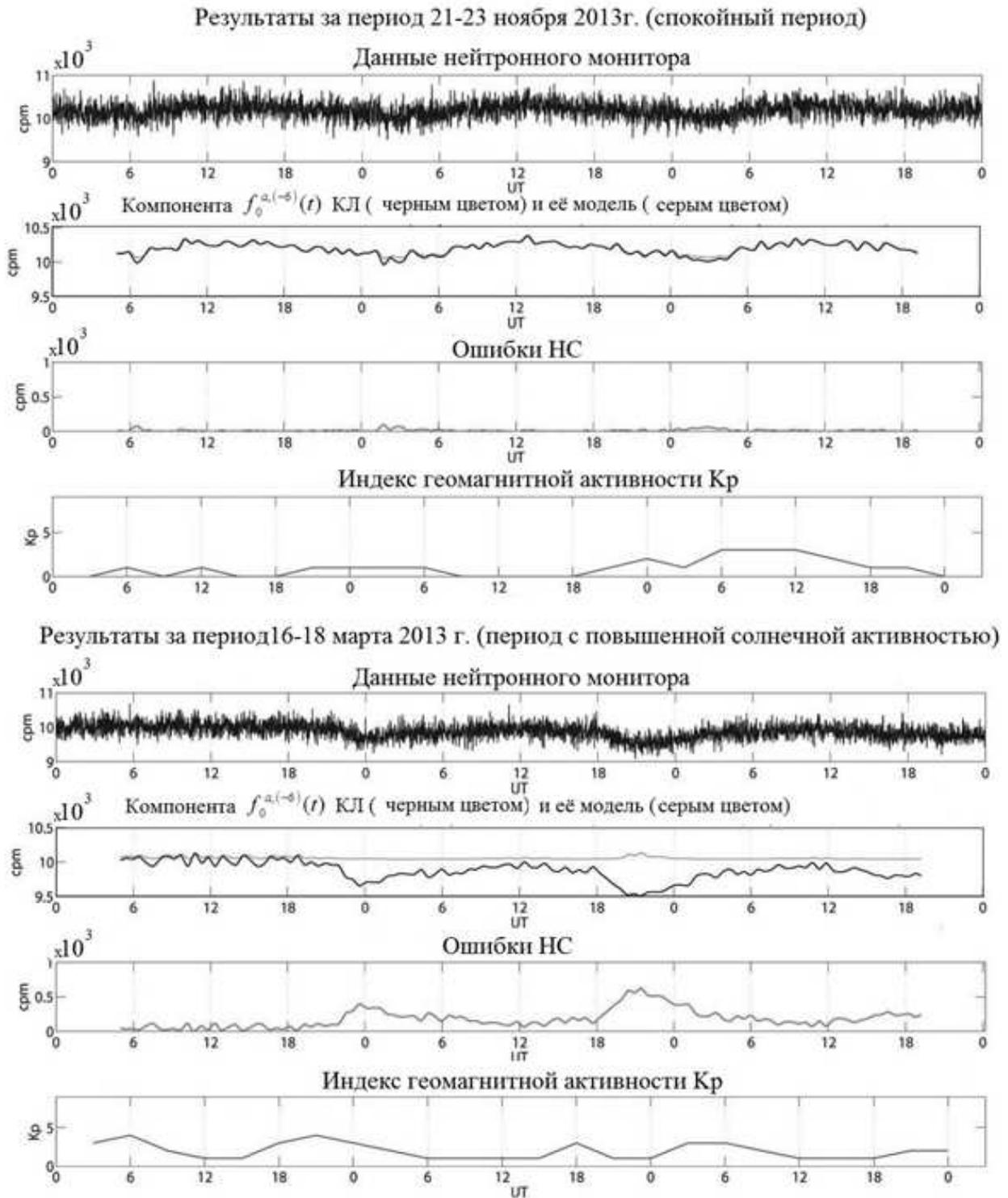


Рис. 3 Результаты работы нейросетевой схемы для станции Апатиты за 2013 г.

рующие свойства НС, ее ошибки в период спокойного геомагнитного поля (21–23 ноября 2013 г.) не превышают значения $0,1 \cdot 10^3$. В период возрастания геомагнитной активности (16–18 марта 2013 г.) наблюдается изменение хода КЛ, и ошибки сети возрастают.

2.2 Выделение локальных разномасштабных аномалий в вариациях космических лучей и оценка их параметров на основе непрерывного вейвлет-преобразования

Аномалии в регистрируемых вариациях КЛ могут содержать трендовые изменения, возникающие в периоды длительных Форбуш-эффектов, а также могут содержать локальные кратковременные особенности, характерные для локальных повышений и понижений КЛ. Описанная выше нейросетевая схема позволяет выделять трендовые изменения вариаций КЛ (изменения уровня КЛ). Выделение локальных аномалий может быть выполнено на основе более детального непрерывного вейвлет-преобразования, которое определяется формулой [17, 24]:

$$W_{\Psi}f_{b,a} := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

где $f \in L^2(R)$; $a, b \in R$, $a \neq 0$, параметр a характеризует масштаб, b — время; Ψ — базисный вейвлет.

При уменьшении масштаба a коэффициенты $W_{\Psi}f_{b,a}$ характеризуют свойства функции f в окрестности b . На малых масштабах a абсолютные значения коэффициентов $|W_{\Psi}f_{b,a}|$ являются малыми за исключением окрестностей, содержащих локальные особенности функции f [18, 26]:

$$|W_{\Psi}f_{b,a}| \leq Aa^{\alpha+1/2}, \quad (4)$$

где A — некоторое положительное число; α — показатель Липшица функции f в окрестности b .

Как следует из соотношения (4), постепенное уменьшение масштаба a позволяет фокусироваться на локальных свойствах сложной функции и детально исследовать ее структуру. Основываясь на этом свойстве вейвлет-преобразования, для выделения локальных аномалий во временном ходе КЛ в работе использовалась пороговая функция вида:

$$P_{T_a}(W_{\Psi}f_{b,a}) = \begin{cases} W_{\Psi}f_{b,a}, & \text{если } (W_{\Psi}f_{b,a} - W_{\Psi}f_{b,a}^{\text{med},l}) \geq T_a; \\ 0, & \text{если } |W_{\Psi}f_{b,a} - W_{\Psi}f_{b,a}^{\text{med},l}| < T_a; \\ -W_{\Psi}f_{b,a}, & \text{если } (W_{\Psi}f_{b,a} - W_{\Psi}f_{b,a}^{\text{med},l}) < -T_a. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $W_{\Psi}f_{b,a}^{\text{med},l}$ — медианное значение, рассчитанное в скользящем временном окне длины l ; $T_a = USt_a^l$ — пороговая функция, где $St_a^l = \sqrt{(l-1)^{-1} \sum_{k=1}^l (W_{\Psi}f_{b,a} - \overline{W_{\Psi}f_{b,a}})^2}$ — стандартное отклонение, рассчитанное в скользящем временном окне длины l ; $\overline{W_{\Psi}f_{b,a}}$ — среднее значение; U — пороговый коэффициент.

Длина скользящего временного окна $l = 1440$ отсчетов, что соответствует одним суткам (определена с учетом суточного хода КЛ).

В качестве базисного вейвлета использовались Койфлеты порядка 1. Выбор базисного вейвлета основывался на критерии минимизации погрешности вычислений [18]: в словаре ортонормированных базисов $D = \cup_{\lambda \in \Lambda} B^{\lambda}$ базис $B^{\alpha} = \{q_z^{\beta}\}_{1 \leq z \leq N}$ лучше, чем базис $B^{\gamma} = \{q_z^{\gamma}\}_{1 \leq z \leq N}$ при аппроксимации функции f , если он дает меньшую погрешность при одинаковом числе аппроксимирующих слагаемых, т. е. при всех $Z \geq 1$

$$\varepsilon^{\beta}[Z] \leq \varepsilon^{\gamma}[Z],$$

где $\varepsilon[Z]$ — погрешность аппроксимации, которая определяется как

$$\varepsilon^\lambda[Z] = \sum_{Z \notin I_z^\lambda} |\langle f, q_z^\lambda \rangle|^2 = \|f\|^2 - \sum_{z \in I_z^\lambda} |\langle f, q_z^\lambda \rangle|^2$$

(I_z — множество индексов мощности Z).

В силу случайной природы данных использование любого порога T_a , определяющего наличие либо отсутствие аномалии, неминуемо связано с возможностью ошибочных решений. В работе в качестве критерия выбора порога использовался критерий наименьшей частоты ошибок (оценивался и минимизировался апостериорный риск [27]), который при располагаемых априорных данных представляет наиболее полную о них информацию. При оценке апостериорного риска для определения состояния межпланетной среды и околоземного пространства (характеризующих динамику КЛ) использовались параметры солнечного ветра, данные B_z компоненты межпланетного магнитного поля (получены на основе проекта ACE [<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>]) и индекс геомагнитной активности K . Результаты оценок показали, что наименьшую погрешность обеспечивает пороговый коэффициент $U = 2,5$.

Применение операции (5) позволяет фиксировать периоды аномальных повышений и аномальных понижений КЛ. При оценке аномального периода необходимо учитывать носитель базисного вейвлета Ψ . Если базисный вейвлет Ψ имеет компактный носитель, равный $[-\Omega, \Omega]$, то множество пар точек (b, a) таких, что точка ξ содержится в носителе $\Psi_{b,a}$, определяют конус влияния точки ξ [18]. Так как носитель $\Psi_{b,a}$ на масштабе a равен $[b - \Omega a, b + \Omega a]$, то конус влияния точки ξ на масштабе a определяется неравенством

$$|b - \xi| \leq \Omega a.$$

Для оценки интенсивности аномалии в момент времени $t = b$ использовалась величина

$$Y_b = \sum_a P_{T_a}(W_\Psi f_{b,a}), \quad (6)$$

которая в случае локального повышения КЛ будет положительной, а в случае локального понижения КЛ — отрицательной.

Для детального анализа ионосферных параметров использовались вычислительные решения, основанные на непрерывном вейвлет-преобразовании (см. (3)) [28]:

$$P_{T_a}(W_\Psi f_{b,a}) = \begin{cases} W_\Psi f_{b,a}, & \text{если } |W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{\text{med}}| \geq T_a; \\ 0, & \text{если } |W_\Psi f_{b,a} - W_\Psi f_{b,a}^{\text{med}}| < T_a. \end{cases}$$

Здесь порог $T_a = U \text{St}_a$ определяет наличие аномалии на масштабе a вблизи точки ξ , содержащейся в носителе $\Psi_{b,a}$; U — коэффициент порога, $\text{St}_a = \sqrt{(\Phi - 1)^{-1} \sum_{u=1}^{\Phi} (W_\Psi f_{b,a} - \overline{W_\Psi f_{b,a}})^2}$; $\overline{W_\Psi f_{b,a}}$ и $W_\Psi f_{b,a}^{\text{med}}$ — среднее значение и медиана, определяемые в скользящем временном окне длины Φ .

Интенсивность аномалии в момент времени $t = b$ оценивалась в работе как

$$I_b = \sum_a \frac{|P_{T_a}(W_\Psi f_{b,a})|}{\|W_\Psi f_{b,a}\|_2},$$

где норма $\|W_\Psi f_{b,a}\|_2 = \sqrt{\sum_{N_a} (P_{T_a}(W_\Psi f_{b,a}))^2}$, N_a — длина ряда на масштабе a .

3 Результаты анализа данных

В обработке использовались минутные данные нейтронных мониторов станций Мыс Шмидта (Россия) и Апатиты (Россия) и ионосферные данные станций Ленинград (Россия) и King Solmon (США). Для оценки состояния геомагнитного поля использовались данные магнитометров станций, расположенных вблизи анализируемых районов: Вагтов (Аляска) и Furstenfeldbruck (Германия).

Анализируемый период 19.10.2003–26.10.2003 (рис. 4 и 5) содержит несколько солнечных событий. Наиболее сильная магнитная буря класса G3 (Кр индекс 7) произошла 24 октября 2003 г. Данное событие вызвал приход к Земле облака CME от вспышки класса X1, произошедшей 22 октября 2003 г. (http://www.nws.noaa.gov/os/assessments/pdfs/SWstorms_assessment.pdf). Результаты обработки данных КЛ демонстрируют общий характер их динамики на анализируемых станциях (см. рис. 4 и 5). Моделирование данных на основе НС (см. рис. 4, *d*, 4, *e*, 5 *d* и 5, *e*) показывает незначительное понижение их уровня 22 октября (короткий Форбуш-эффект) и более существенное и длительное понижение, возникшее к концу суток 24 октября (длительный Форбуш-эффект). В моменты понижений в данных КЛ возникают локальные особенности, которые фиксируются на основе применения пороговых функций (соотношения (5) и (6), показаны на рис. 4, *b*, 4, *c*, 5, *b* и 5, *c* черным цветом). Накануне Форбуш-эффектов, в начале суток 21 октября и в начале суток 24 октября, наблюдаются локальные возрастания КЛ (соотношения (5) и (6), показаны на рис. 4, *b*, 4, *c*, 5, *b* и 5, *c* серым цветом). Аномальное возрастание 21 октября происходило в период повышенной геомагнитной активности, имело максимальную интенсивность примерно в 20:00 UT и характеризовалось плавным нарастанием интенсивности и резким смещением спектра в область высоких частот, которое, вероятно, связано с ускорением КЛ по мере приближения межпланетного возмущения. Аномальное возрастание 24 октября возникло за несколько часов до начала магнитной бури, наибольшая его интенсивность на всех анализируемых станциях наблюдается за 3–4 ч до прихода ударной волны (SSC). Анализ режима ионосферы (см. рис. 4, *k*–4, *m* и 5, *k*–5, *m*) показывает, что накануне бури 24 октября 2003 г. на анализируемых станциях происходили колебания электронной плотности ионосферы (на рис. 4, *l* и 5, *l* показаны серым цветом — повышение концентрации относительно фона, черным цветом — понижение концентрации) за несколько часов до начала бури наблюдается аномальное повышение фона. В период бури произошло существенное понижение электронной концентрации и возникла отрицательная фаза ионосферной бури, которая наибольшей интенсивности достигла на станции Ленинград 25 октября в 19:00 UT, на станции King Solmon — 26 октября в 11:00 UT. Сопоставление результатов обработки с данными межпланетной среды показывает в выделенные аномальные периоды наличие возмущений в B_z компоненте межпланетного магнитного поля.

4 Выводы

Выполненный анализ вариаций КЛ показал общий характер их поведения в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь. Во время магнитных бурь уровень КЛ существенно понижался и возникали глубокие и длительные Форбуш-эффекты. Представляют интерес выделенные аномальные предповышения КЛ, возникающие за несколько часов до начала магнитных бурь. Подобные аномальные изменения отмечены авторами работ [6, 7, 29]. В этих работах показано, что возникающие в последние часы перед ударной волной, а иногда задолго до ее прихода, аномальные предповышения КЛ (а в некоторых случаях предпонижения КЛ) могут являться предвестниками сильных геомагнитных воз-

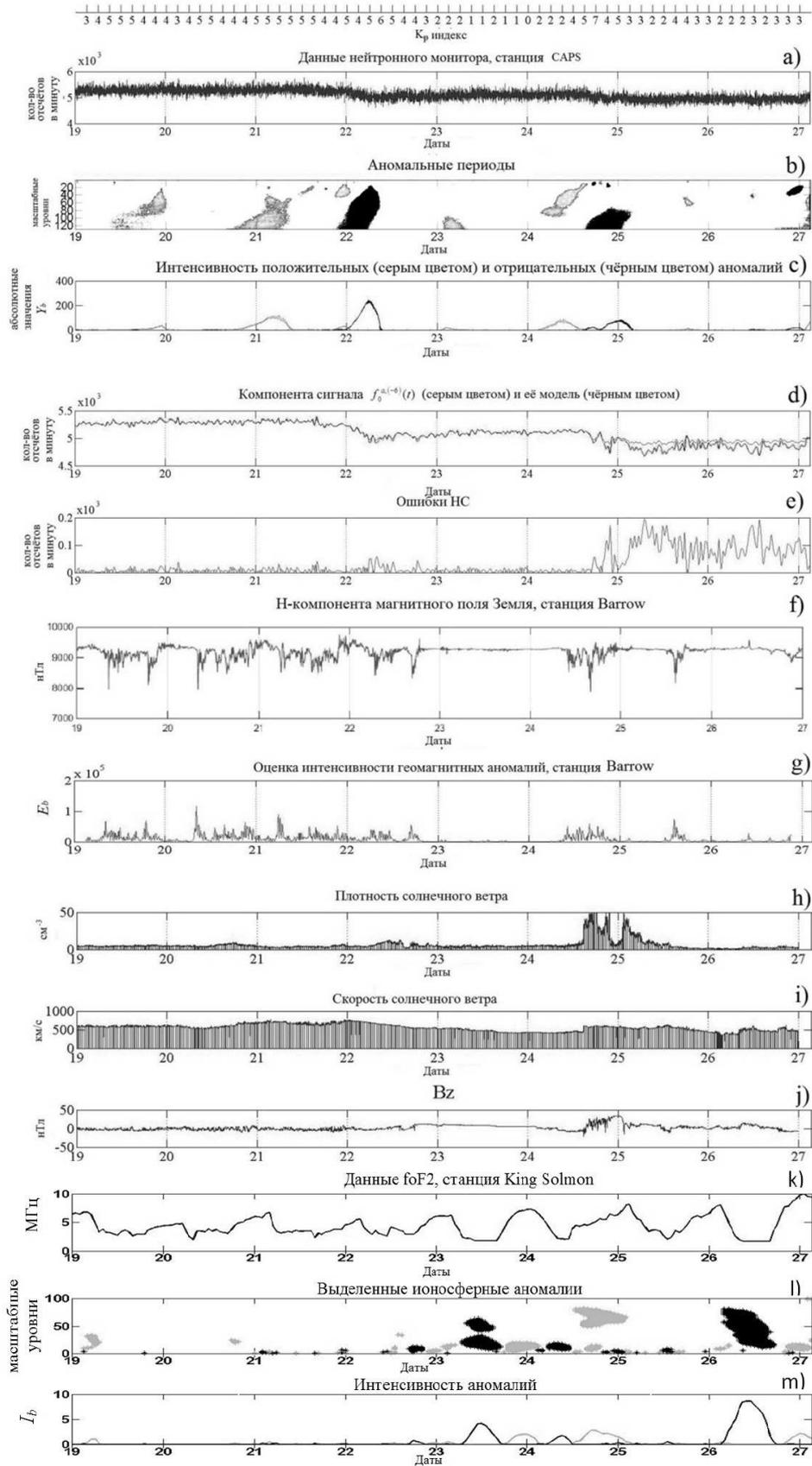


Рис. 5 Результаты обработки данных за период 19.10.2003–27.10.2003, станция Мыс Шмидта

мущений и имеют важное прикладное значение. Результаты данной работы служат подтверждением вышесказанному и показывают эффективность предложенного способа для детального анализа КЛ и выделения подобных эффектов.

5 Благодарности

Работа поддержана грантом РФФ № 14-11-00194. Авторы благодарят институты, поддерживающие станции регистрации данных, которые были использованы в исследовании, а также выражают признательность сотрудникам Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, разработавшим интерактивную среду и программное обеспечение баз данных, обеспечивающих оперативное получение информации о параметрах состояния космического пространства.

Литература

- [1] *Топтыгин И. Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. — М.: Наука, 1983. 301 с.
- [2] *Тясто М. И., Данилова О. А., Дворников В. М., Сдобнов В. Е.* Большие снижения геомагнитных порогов космических лучей в период возмущений магнитосферы // Известия РАН, сер. физическая, 2009. Т. 73. № 3. С. 385–388.
- [3] *Зеленый Л. М., Веселовский И. С., Бреус Т. К., и др.* Плазменная гелиогеофизика / Под общ. ред. Л. М. Зеленого, И. С. Веселовского. — М.: Физматлит, 2008. Т. 2. 560 с.
- [4] *Vecchio A., Laurenza M., Storini M., Carbone V.* New insights on cosmic ray modulation through a joint use of nonstationary data-processing methods // Adv. Astronomy, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/834247>. 2012.
- [5] *Kóta J., Somogyi A.* Some problems of investigating periodicities of cosmic rays // Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae, 1969. Vol. 27. P. 523–548.
- [6] *Ruffolo D.* Transport and acceleration of energetic charged particles near an oblique shock // Astrophys. J., 1999. No. 515. P. 787–800.
- [7] *Belov A. V., Bieber J. W., Eroshenko E. A., Evenson P., Pyle R., Yanke V. G.* Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances // Adv. Space Res., 2003. Vol. 31. No. 4. P. 523–548.
- [8] *Paschalis P., Sarlanis C., Mavromichalaki H.* Artificial neural network approach of cosmic ray primary data processing // Solar Phys., 2013. Vol. 1. No. 182. P. 303–318.
- [9] *Мандрикова О. В., Залаяев Т. Л.* Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей переменной структуры // Цифровая обработка сигналов, 2015. № 1. С. 11–16.
- [10] *Козлов В. И.* Оценка скейлинговых свойств динамики флуктуаций космических лучей в цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия, 1999. Т. 39. № 1. С. 100–104.
- [11] *Козлов В. И., Марков В. В.* Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла по исследованию флуктуаций космических лучей в 20–23 циклах // Геомагнетизм и аэрономия, 2007. Т. 47. № 1. С. 47–55.
- [12] *Козлов В. И., Марков В. В.* Вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах // Геомагнетизм и аэрономия, 2007. Т. 47. № 1. С. 56–65.
- [13] *Козлов В. И., Козлов В. В.* Новый индекс солнечной активности — индекс мерцаний космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия, 2008. Т. 48. № 4. С. 1–9.
- [14] *Mandrikova O. V., Solovev I. S., Zalyaev T. L.* Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // Earth Plan. Space, 2014. Vol. 66. No. 148. doi: <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-014-0148-0>.

- [15] *Zarrouk N., Bennaceur R.* Neural network and wavelets in prediction of cosmic ray variability: The North Africa as study case // *Acta Astronautica*, 2010. No. 66. P. 1008–1016.
- [16] *Мандрикова О. В., Заляев Т. Л.* Моделирование вариаций космических лучей и выделение аномалий на основе совмещения вейвлет-преобразования с нейронными сетями // *Машинное обучение и анализ данных*, 2014. Т. 1. №9. С. 1154–1167.
- [17] *Daubechies I.* Ten lectures on wavelets. — Philadelphia: SIAM, 1992. 357 p.
- [18] *Mallat S.* A wavelet tour of signal processing: The sparse way. — 3rd ed. — USA: Academic Press, 2008. 832 p.
- [19] *Ротанова Н. М., Бондарь Т. Н., Иванов В. В.* Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2004. №2. С. 276–282.
- [20] *Zaourar N., Hamoudi M., Manda M., Balasis G., Holschneider M.* Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance // *Earth Planets Space*, 2013. Vol. 65. No.12. P. 1525–1540.
- [21] *Mandrikova O. V., Solovev I., Geppener V., Taha Al-Kasasbeh R., Klionskiy D.* Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach // *Digital Signal Proc.*, 2013. Vol. 23. P. 329–339.
- [22] *Haykin S.* Neural networks: A comprehensive foundation. — 2nd ed. — New York, NY, USA: Prentice Hall, 1999. 842 p.
- [23] *Агеев А. Д., Балухта А. Н., Бычков А. В. и др.* Нейроматематика / Под общ. ред. А. И. Галущкина. — М.: ИПРЖР, 2002. 448 с.
- [24] *Chui C. K.* An introduction in wavelets. — New York, NY, USA: Academic Press, 1992. 264 p.
- [25] *Akasofu S. I., Chapman S.* Solar–terrestrial physics. — Oxford: Oxford University Press, 1972. 891 p.
- [26] *Jaffard S.* Pointwise smoothness, two-microlocalization, and wavelet coefficients // *Publications Mathématiques*, 1991. Vol. 35. P. 155–168.
- [27] *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. — 2-е изд. — М.: Сов.радио, 1975. 392 с.
- [28] *Mandrikova O. V., Fetisova N. V., Polozov Y. A., Solovev I. S., Kupriyanov M. S.* Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere // *Earth Planet Space*, 2015. Vol. 67. doi: <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-015-0301-4>.
- [29] *Munakata K., Bieber J. W., Yasue S., Kato C., Koyama M., Akahane S., Fujimoto K., Fujii Z., Humble J. E., Duldig M. L.* Precursors of geomagnetic storms observed by muon detector network // *J. Geophys. Res.*, 2000. No. 105. P. 27457–27468.

Поступила в редакцию 15.06.2016

Modeling and analysis of cosmic ray variations during periods of increased solar and geomagnetic activity*

O. V. Mandrikova, T. L. Zalyaev, Yu. A. Polozov, and I. S. Solovev

oksanam1@mail.ru, tim.aka.geralt@mail.ru, up_agent@mail.ru, kamigsol@yandex.ru

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS

7 Mirnaya Str., Paratunka, Elizovskiy District, Kamchatka Region, Russia

A method for analysis of cosmic ray variations, which allows one to allocate anomalous changes and to obtain quantitative estimates of their occurrence time, duration, and intensity is described. The method includes decomposition of neutron monitor data based on wavelet transform and their approximation based on adaptive variable structure neural networks. Using this method, an analysis of cosmic ray variations during the periods of increased solar and geomagnetic activity has been performed and anomalous changes that occurred a few hours before geomagnetic storms have been allocated. Long and deep Forbush decreases took place during the storms (neutron monitor data from Apatity and Cape Schmidt stations have been analyzed). Cosmic ray data have been analyzed together with geomagnetic field variations and ionospheric parameters, which processing has been performed on the basis of methods proposed by the authors.

Keywords: *cosmic rays; magnetic storm; ionospheric parameters; data analysis; wavelet transform; neural networks*

DOI: 10.21469/22233792.2.1.07

References

- [1] Toptygin, I. N. 1983. *Kosmicheskie luchi v mezplanetarykh magnitnykh polyakh* [Cosmic rays in the interplanetary magnetic field]. Moscow: Nauka. 301 p.
- [2] Tyasto, M. I., O. A. Danilova, V. M. Dvornikov, and V. E. Sdobnov. 2009. Bol'shie snizheniya geomagnitnykh porogov kosmicheskikh luchey v period vozmushcheniy magnitosfery [Large reduction of geomagnetic thresholds of cosmic rays in the magnetosphere during disturbances]. *Izvestiya RAN, ser. fizicheskaya* [Izvestiya RAN, physical ser.] 73(3):385–388.
- [3] Zelenyy, L. M., I. S. Veselovskiy, T. K. Breus, *et al.* 2008. *Plazmennaya geliogeofizika* [Plasma geliogeofizika]. Eds. L. M. Zelenyy and I. S. Veselovsky. Moscow: Fizmatlit. Vol. 2. 560 p.
- [4] Vecchio, A., M. Laurenza, M. Storini, and V. Carbone. 2012. New insights on cosmic ray modulation through a joint use of nonstationary data-processing methods. *Adv. Astronomy*. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/834247>. 2012.
- [5] Kóta, J., and A. Somogyi. 1969. Some problems of investigating periodicities of cosmic rays. *Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae* 27:523–548.
- [6] Ruffolo, D. 1999. Transport and acceleration of energetic charged particles near an oblique shock. *Astrophys. J.* 515:787–800.
- [7] Belov, A. V., J. W. Bieber, E. A. Eroshenko, P. Evenson, R. Pyle, and V. G. Yanke. 2003. Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances. *Adv. Space Res.* 31(4):523–548.
- [8] Paschalis, P., C. Sarlanis, and H. Mavromichalaki. 2013. Artificial neural network approach of cosmic ray primary data processing. *Solar Phys.* 1(182):303–318.

*The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 14-11-00194.

- [9] Mandrikova, O. V., and T. L. Zalyaev. 2015. Modelirovanie variatsiy kosmicheskikh luchey na osnove sovmeshcheniya kratnomasshtabnykh veyvlet-razlozheniy i neyronnykh setey peremennoy struktury [Modeling variations of cosmic rays on the basis of combination of multiresolution wavelet decomposition and neural networks with variable structure]. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing] 1:11–16.
- [10] Kozlov, V. I. 1999. Otsenka skeylingovykh svoystv dinamiki fluktuatsiy kosmicheskikh luchey v tsikle solnechnoy aktivnosti [Estimation of the scaling properties of the dynamics of fluctuations of cosmic rays in the solar activity cycle]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy] 39(1):100–104.
- [11] Kozlov, V. I., and V. V. Markov. 2007. Veyvlet-obraz tonkoy struktury 11-letnego tsikla po issledovaniyu fluktuatsiy kosmicheskikh luchey v 20–23 tsiklakh [Wavelet image of the fine structure of the 11-year cycle to study the fluctuations of cosmic rays in 20-23 cycles]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy] 47(1):47–55.
- [12] Kozlov, V. I., and V. V. Markov. 2007. Veyvlet-obraz geliosfernoy buri v kosmicheskikh luchakh [Wavelet image of heliospheric storm in cosmic rays]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy] 47(1):56–65.
- [13] Kozlov, V. I., and V. V. Kozlov. 2008. Novyy indeks solnechnoy aktivnosti — indeks mertsaniy kosmicheskikh luchey [New solar activity index — the index of cosmic ray scintillation]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy] 48(4):1–9.
- [14] Mandrikova, O. V., I. S. Solovev, and T. L. Zalyaev. 2014. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data. *Earth Plan. Space* 66(148). doi: <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-014-0148-0>.
- [15] Zarrouk, N., and R. Bennaceur. 2010. Neural network and wavelets in prediction of cosmic ray variability: The North Africa as study case. *Acta Astronautica* 66:1008–1016.
- [16] Mandrikova, O. V., and T. L. Zalyaev. 2014. Modelirovanie variatsiy kosmicheskikh luchey i vydelenie anomalii na osnove sovmeshcheniya veyvlet-preobrazovaniya s neyronnymi setyami [Simulation of cosmic ray variations and anomalies in the allocation on the basis of combining wavelet transform with neural networks]. *Mashinnoe obuchenie i analiz dannykh* [Machine Learning Data Anal.] 1(9):1154–1167.
- [17] Daubechies, I. 1992. *Ten lectures on wavelets..* Philadelphia: SIAM. 357 p.
- [18] Mallat, S. 2008. *A wavelet tour of signal processing. The sparse way.* 3rd ed. USA: Academic Press. 832 p.
- [19] Rotanova, N. M., T. N. Bondar', and V. V. Ivanov. 2004. Veyvlet-analiz vekovykh geomagnitnykh variatsiy [Wavelet analysis of secular geomagnetic variations]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy] 2:276–282.
- [20] Zaourar, N., M. Hamoudi, M. Manda, G. Balasis, and M. Holschneider. 2013. Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance. *Earth Planets Space* 65(12):1525–1540.
- [21] Mandrikova, O. V., I. Solovev, V. Geppener, R. Taha Al-Kasasbeh, and D. Klionskiy. 2013. Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach. *Digital Signal Proc.* 23:329–339.
- [22] Haykin, S. 1999. *Neural networks: A comprehensive foundation.* 2nd ed. New York, NY: Prentice Hall. 842 p.
- [23] Ageev, A. D., A. N. Balukhta, A. V. Bychkov, et al. 2002. *Neyromatematika.* [Neuromathematic]. Ed. A. I. Galushkin. Moscow: IPRZhR. 448 p.
- [24] Chui, C. K. 1992. *An introduction in wavelets.* New York, NY: Academic Press. 264 p.

- [25] Akasofu, S.I., and S. Chapman. 1972. *Solar-terrestrial physics*. Oxford: Oxford University Press. 891 p.
- [26] Jaffard, S. 1991. Pointwise smoothness, two-microlocalization, and wavelet coefficients. *Publications Mathématiques* 35:155–168.
- [27] Levin, B.R. 1975. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical foundations of statistical radio engineering]. Moscow: Sov. Radio. 392 p.
- [28] Mandrikova, O. V., N. V. Fetisova, Y. A. Polozov, I. S. Solovev, and M. S. Kupriyanov. 2015. Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere. *Earth Planet Space* 67. doi: <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-015-0301-4>.
- [29] Munakata, K., J. W. Bieber, S. Yasue, C. Kato, M. Koyama, S. Akahane, K. Fujimoto, Z. Fujii, J. E. Humble, and M. L. Duldig. 2000. Precursors of geomagnetic storms observed by muon detector network // *J. Geophys. Res.* 105:27457–27468.

Received June 15, 2016