

УДК 519

## **АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЕРИОДЫ ПОВЫШЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

**О. В. Мандрикова, Т. Л. Заляев, И. С. Соловьев, С. Ю. Хомутов**

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
с. Паратунка, Камчатский край, Россия

E-mail: oksanam1@mail.ru; kamigsol@yandex.ru

В периоды повышенной солнечной активности выполнен анализ космических лучей и изучены особенности вариаций геомагнитного поля. В работе использовались разработанные авторами новые методы моделирования и анализа данных, основанные на вейвлет-преобразовании и нейронных сетях. На фоне спокойного и слабозмущенного геомагнитного поля выделены аномальные изменения в космических лучах, возникающие за несколько часов до геомагнитных бурь

*Ключевые слова: геомагнитная активность, космические лучи, вейвлет-преобразование*

© Мандрикова О. В. и др., 2016

MSC 86-04

## **ANALYSIS OF GEOMAGNETIC FIELD DATA AND COSMIC RAYS VARIATIONS DURING PERIODS OF INCREASED SOLAR ACTIVITY**

**O. V. Mandrikova , T. L. Zalyaev, I. S Solovev, S. Y. Khomutov**

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation

E-mail: oksanam1@mail.ru; kamigsol@yandex.ru

We performed analysis of the cosmic rays variations and studied features of geomagnetic field variations during periods of increased solar activity. The paper applies a new methods of modeling and analysis of the data developed by the authors based on wavelet transform and neuron networks. In this paper we allocated anomalous changes in cosmic rays that occurred some hours before geomagnetic storms.

*Key words: geomagnetic activity, cosmic rays, wavelet transform*

© Mandrikova O. V. et al., 2016

## Введение

Анализ космических лучей (КЛ) позволяет получать ценную информацию о состоянии околоземного космического пространства в периоды экстремальных солнечных событий [1]. Весьма актуальной задачей является выделение аномальных изменений в динамике КЛ накануне сильных геомагнитных бурь [2, 3]. Регистрируемые вариации КЛ имеют сложную структуру, традиционные методы обработки статистических данных не являются достаточно эффективными и приводят к потере информации [4, 5, 6, 7]. В работе использовались методы анализа данных, основанные на вейвлет-преобразовании и нейронных сетях, получающие в настоящее время интенсивное развитие [4, 5, 6, 7]. Описан способ детального анализа вариаций космических лучей, позволяющий выделять разномасштабные аномальные изменения и получать оценки о моментах их возникновения, временной длительности и интенсивности. Способ включает преобразование данных нейтронных мониторов на основе вейвлет-преобразования и их аппроксимацию на основе адаптивных нейронных сетей. Совместно с данными космических лучей анализировались вариации геомагнитного поля, обработка которых выполнялась на основе методов, описанных в работах [5, 8].

## Описание методов

**1. Выделение и оценка геомагнитных возмущений.** Используя непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) [9]:

$$(W_{\Psi}f)(b,a) := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt, \Psi - \text{вейвлет}, f \in L^2(\mathbb{R}), a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0, \quad (1)$$

может быть получена детальная информация о свойствах анализируемой функции  $f$ . При стремлении масштаба  $a$  к нулю вейвлет-коэффициенты  $(W_{\Psi}f)(b,a)$  характеризуют локальные свойства функции  $f$  в окрестности момента времени  $t = b$ . Размеры анализирующего частотно-временного окна НВП определяются формулами [9]:

$$[win_t] \times [win_{\omega}] = [b + a\langle t \rangle - a\Delta_{\Psi}, b + a\langle t \rangle + a\Delta_{\Psi}] \times \left[ \frac{\langle \omega \rangle}{a} - \frac{1}{a}\Delta_{\hat{\Psi}}, \frac{\langle \omega \rangle}{a} + \frac{1}{a}\Delta_{\hat{\Psi}} \right]$$

где  $win_t$  - временное окно,  $\langle t \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} t|\Psi(t)|^2dt$  - центр временного окна,  $\Delta_{\Psi} = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \langle t \rangle)^2 |\Psi(t)|^2 dt$  - радиус временного окна,  $win_{\omega}$  - частотное окно,  $\langle \omega \rangle = a \int_{-\infty}^{+\infty} \omega |\hat{\Psi}(a\omega)| d\omega$  - центр частотного окна,  $\Delta_{\hat{\Psi}} = [\int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \langle \omega \rangle)^2 |\hat{\Psi}(a\omega)|^2 d\omega]^{1/2}$  - радиус частотного окна,  $\hat{\Psi}$  - преобразование Фурье функции  $\Psi$ . Рассматривая в качестве функции  $f$  вариации геомагнитного поля, интенсивность геомагнитных возмущений на анализируемом масштабе  $a$  в момент времени  $t = b$  может быть оценена на основе величины [8, 5]:

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

Тогда суммарная интенсивность возмущений поля в момент времени  $t = b$ :

$$E_b = \sum_a e_{b,a} \quad (2)$$

Для выделения временных интервалов, содержащих возмущения можно применить пороговую функцию:

$$P_{T'_a}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T'_a \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T'_a \end{cases} \quad (3)$$

Способ оценки порогов  $T'_a$  описан в работе [5].

**2. Выделение и оценка параметров разномасштабных аномалий в вариациях КЛ.** Основываясь на свойствах НВП (см.п.1) и рассматривая в качестве функции  $f$  вариации КЛ, выделение аномальных изменений в их временном ходе может быть выполнено на основе следующей пороговой функции:

$$P_{T_a}(W_{\Psi}f_{b,a}) = \begin{cases} W_{\Psi}f_{b,a}, & \text{если } (W_{\Psi}f_{b,a} - W_{\Psi}f_{b,a}^{med,l}) \geq T_a \\ 0, & \text{если } (W_{\Psi}f_{b,a} - W_{\Psi}f_{b,a}^{med,l}) < T_a \\ -W_{\Psi}f_{b,a}, & \text{если } (W_{\Psi}f_{b,a} - W_{\Psi}f_{b,a}^{med,l}) < -T_a \end{cases} \quad (4)$$

где  $W_{\Psi}f_{b,a}^{med,l}$  - медианное значение, рассчитанное в скользящем временном окне длины  $l$ .  $T_a = U * St_a^l$  - пороговая функция,  $St_a^l = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^l (W_{\Psi}f_{b,a} - \overline{W_{\Psi}f_{b,a}})^2}$  - стандартное отклонение, рассчитанное в скользящем временном окне длины  $l$ ,  $\overline{W_{\Psi}f_{b,a}}$  - среднее значение,  $U$  - пороговый коэффициент. В работе использовалась длина скользящего временного окна  $l = 1440$  отсчётов, что соответствует одним суткам (определена с учетом суточного хода КЛ). В качестве критерия выбора порога  $T_a$  использовался критерий наименьшей частоты ошибок (оценивался апостериорный риск [10]).

Применение операции (4) позволяет на малых масштабах  $a$  фиксировать моменты времени  $t = b$  локальных повышений и локальных понижений КЛ. Для оценки интенсивность аномального повышения/понижения в момент времени  $t = b$  использовалась величина:

$$Y_b = \sum_a P_{T_a}(W_{\Psi}f_{b,a}), \quad (5)$$

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

**3. Моделирование временного хода вариаций КЛ и выделение аномальных изменений.** Использовался способ моделирования вариаций КЛ, подробно описанный в работе [6] и включающий следующие основные операции:

1. На основе кратномасштабного вейвлет-преобразования (КМА) получаем представление вариации КЛ в виде компонент [9]:  $f_0(t) = \sum_{j=-1}^{-m} f^d[2^j t] + f^a[2^{-m} t]$  где детализирующие компоненты КЛ  $f^d[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$ ,  $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ ,  $f^d[2^j t] \in W_j$ ,  $f^a[2^{-m} t] \in V_{-m}$ ,  $W_j = \text{close}_{L^2(R)}(2^{j/2} \Psi(2^j t - n)) : n \in \mathbb{Z}$ ; сглаженная компонента КЛ  $f^a[2^{-m} t] = \sum_n c_{-m,n} \phi_{-m,n}$ ,  $c_{-m,n} = \langle f, \phi_{-m,n}(t) \rangle$ ,  $f^a[2^{-m} t] \in V_{-m}$ ,  $V_j = \text{close}_{L^2(R)}(2^{j/2} \phi(2^j t - n)) : n \in \mathbb{Z}$ ,  $\phi$  - сглаживающая скейлинг функция.

2. Используя обратное вейвлет-преобразование [9], восстанавливаем исходное разрешение сглаженной компоненты  $f_0^{a,(-m)} = \sum_n c_{0,n}^{-m} \phi_{0,n}(t)$ , верхний индекс  $(-m)$  соответствуют разрешению компоненты до выполнения операции обратного вейвлет-преобразования.

3. Для сглаженной компоненты КЛ  $f_0^{a,(-m)}$  на основе нейронной сети (НС) строим отображение  $f_0^{a,(-m)} \rightarrow f_0^{*a,(-m)}$ , где  $f_0^{a,(-m)}$  – вход НС,  $f_0^{*a,(-m)}$  – выход НС. Ошибка НС определяется как разность между желаемым  $f_0^{*a,(-m)}$  и действительным  $\hat{f}_0^{*a,(-m)}$  выходными значениями функции:  $e(t) = f_0^{*a,(-m)} - \hat{f}_0^{*a,(-m)}$ .

Полученная нейронная сеть воспроизводит характерные вариации КЛ. Выделение аномальных изменений в ходе КЛ может быть основано на анализе ошибок  $e(t)$  и проверке условия:

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

где  $T$  – пороговое значение, определяющее наличие аномалии.

## Результаты анализа данных

В обработке использовались минутные данные нейтронных мониторов [ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY!/FTP\\_GLE/](ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY!/FTP_GLE/) и данные магнитометров <http://www.ikir.ru:8180/observ>. На рис.1, 2 показаны результаты применения описанных методов на примере событий 5-6 апреля 2010г. и 3-5 сентября 2012г.

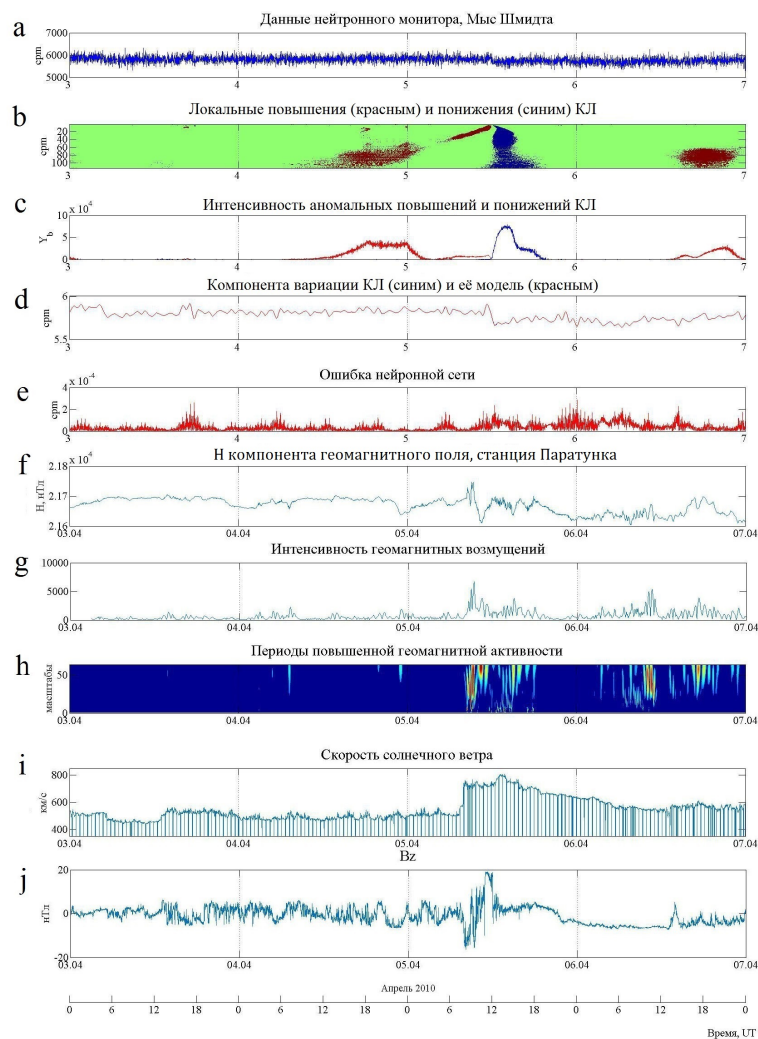


Рис. 1. Результаты обработки данных за период 3 апреля 2010 – 7 апреля 2010 г

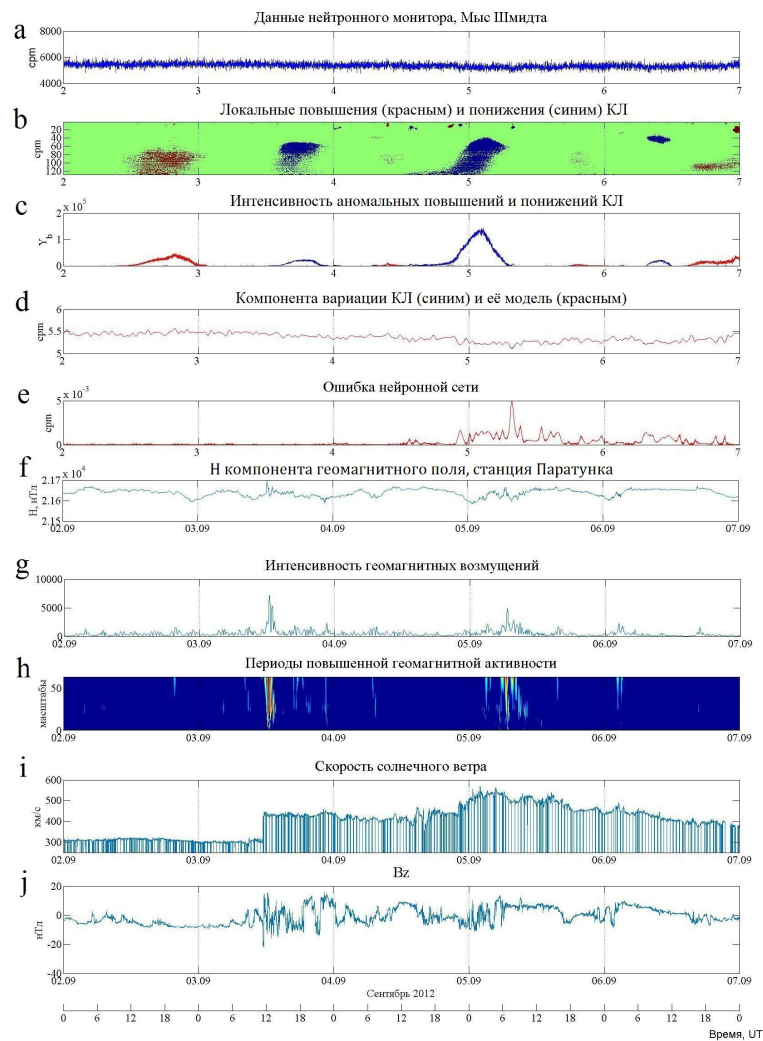


Рис. 2. Результаты обработки данных за период 2 сентября 2012 – 7 сентября 2012 г.

Анализ рис. 1 показывает, что примерно за сутки до момента SSC уровень КЛ повысился (рис. 1 b,c, показано красным цветом), наблюдается плавное нарастание интенсивности и смещение спектра в область высоких частот, которое, вероятно, связано с ускорением КЛ по мере приближения межпланетного возмущения. В этот период в геомагнитном поле происходили слабые возмущения (4 сентября – 04:35-04:41 UT, 06:55-07:15 UT, 19:37-19:47 UT, 22:38-23:06 UT). В начальную фазу бури произошло понижение уровня КЛ, и возник Форбуш-эффект (рис. 1 b,c, показан синим цветом), в период которого геомагнитное поле было наиболее сильно возмущено. К концу суток 6 сентября наблюдается незначительное повышение КЛ, возможно, связанное с восстановлением их уровня. Сопоставление результатов обработки с данными межпланетной среды показывает в выделенные аномальные периоды наличие возмущений  $B_z$  компоненты межпланетного магнитного поля.

Накануне события 3 сентября 2012г на анализируемой станции наблюдается аномальное возрастание уровня КЛ (рис. 2b,c, красным цветом), которое возникло за сутки до начала магнитной бури и наибольшей интенсивности достигло примерно за 14 ч. до прихода ударной волны (SSC). Незначительные возмущения геомагнитного поля происходили 2 сентября – 03:30-03:50 UT, 06:40-07:00 UT и 19:25-19:45 UT.

Максимальные значения интенсивности геомагнитных возмущений зафиксированы 3 сентября в период короткого Форбуш-эффекта (12:03-12:06 UT). К концу суток 4 сентября произошло более существенное и длительное понижение уровня КЛ, которое сопровождалось сильными геомагнитными возмущениями. Максимальные значения интенсивности геомагнитных возмущений зафиксированы 5 сентября в период с 6:43 до 6:48 UT.

## Выводы

Результаты обработки данных показали перспективность применения разработанных методов для анализа процессов в околоземном пространстве в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь. Представляют интерес выделенные аномальные повышения уровня КЛ, возникающие за несколько часов до начала магнитных бурь. Выделенные аномалии характеризовались плавным нарастанием интенсивности КЛ, возникающим примерно за сутки до момента начала бури. В начальную фазу магнитной бури уровень КЛ понижался, и возникали Форбуш-эффекты. Подобные аномальные изменения отмечены авторами работ [2, 3]. 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 возмущений, и имеют важное прикладное значение. Существующие методы анализа данных КЛ не позволяют достаточно эффективно выделять подобные аномальные эффекты. Их недостатком также является существенная трудоемкость расчетов и, как следствие, сложность автоматизации выполняемых операций, что весьма важно в задачах оперативного прогноза космической погоды. Результаты данной работы показали возможность применения описанных вычислительных решений в комплексной методике прогноза сильных магнитных бурь.

Работа поддержана грантом РФФИ, грант № 14-11-00194. Авторы благодарят институты, поддерживающие станции регистрации космических лучей и магнитные обсерватории, данные которых были использованы в исследовании.

## Список литературы

- [1] Топтыгин И.Н., *Космические лучи в межпланетных магнитных полях*, Наука, Москва, 1983, 301 [Toptygin I.N. *Space Rays in Interplanetary Magnetic Fields*. – М.: Nauka, 1983. – 301 p. [in Russian]] с.
- [2] Ruffolo D., “Transport and acceleration of energetic charged particles near an oblique shock”, *Astrophys. J.*, 1999, № 515, 787-800.
- [3] Belov, A. V et al., “Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances”, *Adv. Space Res.*, **31**:4 (2003), 919-924.
- [4] Vecchio et al., “Insights on Cosmic Ray Modulation through a Joint Use of Nonstationary Data-Processing Methods”, *Advances in Astronomy*, 2012, doi:10.1155/2012/834247..
- [5] Mandrikova O.V., Solovev I.S., Zalyaev T.L., “Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data”, *Earth Planet Space*, **66** (2014).
- [6] Мандрикова О.В., Залаяев Т.Л., “Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабныхвейвлет-разложений и нейронных сетей переменной структуры”, *Цифровая обработка сигналов*, 2015, №1, 11-16 [Mandrikova O.V., Zalyaev T.L. *Modelirovanie variatsiy kosmicheskikh luchey i vydelenie anomalii na osnove sovmeshcheniya veyvlet-preobrazovaniya s neyronnymi setyami* [Modeling of variations of cosmic rays on the basis of combination of multiresolution wavelet expansions and neural

- networks with variable structure]. *Tcifrovaya obrabotka signalov*, 2015. №1. pp. 11-16.[in Russian]].
- [7] Paschalis P. et al., “Artificial Neural Network Approach of Cosmic Ray Primary Data Processing”, *Solar Physics*, **182**:1 (2013), 303-318.
- [8] Mandrikova O.V. et al., “Analysis of the Earth’s magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach”, *Digit Signal Process*, **23** (2013), 329-339.
- [9] Chui, C.K., *An introduction in wavelets*, Academic Press, New York., 1992, 264 pp.
- [10] Левин Б.Р., *Теоретические основы статистической радиотехники*, Советское радио, Москва, 1975, 392 [Levin B.R. 1975. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Izd. 2-e. [Theoretical basis of statistical radio engineering.] – М.: Sov.radio. 392 s [In Russian].]] с.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 12.06.2016