

Анализ геомагнитных данных и космических лучей в периоды повышенной солнечной активности

МАНДРИКОВА О. В.¹, ЗАЛЯЕВ Т. Л.¹, СОЛОВЬЕВ И. С.^{1,2}, ХОМУТОВ С. Ю.¹

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
с. Паратунка, Камчатский край, Россия

²Камчатский государственный технический университет г. Петропавловск-Камчатский,
Камчатский край, Россия
e-mail: oksanam1@mail.ru kamigsol@yandex.ru

Анализ космических лучей (КЛ) позволяет получать ценную информацию о состоянии околоземного космического пространства в периоды экстремальных солнечных событий [Топтыгин, 1983; Тясто, 2009]. Весьма актуальной задачей является выделение аномальных изменений в динамике КЛ накануне сильных геомагнитных бурь [Ruffolo, 1999; Belov, 2003; Зеленый, 2008]. Регистрируемые вариации КЛ имеют сложную структуру, традиционные методы обработки статистических данных не являются достаточно эффективными и приводят к потере информации [Kóta and Somogyi, 1969; Vecchio et al., 2012; Paschalis et al., 2012, Мандрикова и Заляев, 2015]. В работе использовались методы анализа данных, основанные на вейвлет-преобразовании и нейронных сетях, получающие в настоящее время интенсивное развитие [Vecchio et al., 2012; Козлов и Марков 2007а,б; Козлов В. И. и Козлов В.В., 2008; Мандрикова и Заляев, 2015; Mandrikova et al. 2014, Paschalis et al., 2012; Zarrouk and Bennaceur, 2010]. 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 нейтральных 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 [Mandrikova et al., 2013; Mandrikova et al., 2014].

Описание методов

1. Выделение и оценка геомагнитных возмущений на основе вейвлет-преобразования.

Используя непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) [Chui, 1992]

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

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 [Chui, 1992]:

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

где win_t – временное окно, $\langle t \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} t |\Psi(t)|^2 dt$ – центр временного окна,

$\Delta_{\Psi} = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} (t - \langle t \rangle)^2 |\Psi(t)|^2 dt$ радиус временного окна, win_{ω} – частотное окно,

$\langle \omega \rangle = a \int_{-\infty}^{+\infty} \omega \left| \hat{\Psi}(a\omega) \right| d\omega$ – центр частотного окна $\Delta_{\hat{\Psi}} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - \langle \omega \rangle)^2 \left| \hat{\Psi}(a\omega) \right|^2 d\omega \right]^{1/2}$ – радиус частотного окна $\hat{\Psi}$ - Фурье преобразование функции Ψ .

Рассматривая в качестве функции f вариации геомагнитного поля, интенсивность геомагнитных возмущений на анализируемом масштабе av момент времени $t = b$ может быть оценена на основе величины [Mandrikova et al., 2013; Mandrikova et al., 2014]:

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

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

$$E_b = \sum_a e_{b,a}. \quad (1)$$

Для выделения временных интервалов, содержащих можно применить пороговую функцию:

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

Способ оценки порогов T_a описан в работе [Mandrikova et al. 2014].

1. 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:

$$\begin{aligned} & W_{\Psi} f_{b,a}, \text{ если } \left(W_{\Psi} f_{b,a} - W_{\Psi} f_{b,a}^{med,l} \right) T_a \\ & 0, \text{ если } \left| W_{\Psi} f_{b,a} - W_{\Psi} f_{b,a}^{med,l} \right| T_a \\ & -W_{\Psi} f_{b,a}, \text{ если } \left(W_{\Psi} f_{b,a} - W_{\Psi} f_{b,a}^{med,l} \right) - T_a, \end{aligned} \quad (3)$$

где $W_{\Psi} f_{b,a}^{med,l}$ – медианное значение, рассчитанное в скользящем временном окне длины l .

$T_a = U * St^l$ – пороговая функция, где $St^l = \sqrt{\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^l (W_{\Psi} f_{b,a} - \overline{W_{\Psi} f_{b,a}})^2}$, – 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 [Левин, 1975].

Применение операции (3) позволяет на малых масштабах a фиксировать моменты времени $t = b$ локальных повышений и локальных понижений КЛ.

Для оценки интенсивности аномального повышения/понижения в момент времени $t = b$ использовалась величина

$$Y_b = \sum_a P_{T_a}(W_{\Psi} f_{b,a}), \quad (4)$$

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

1. Моделирование временного хода вариаций КЛ и выделение аномальных изменений.

Использовался способ моделирования вариаций КЛ, подробно описанный в работе [Мандрикова Залаев, 2015] и включающий следующие основные операции:

1. На основе кратномасштабного вейвлет-преобразования (КМА) получаем представление вариации КЛ в виде компонент [Chui, 1992]: $f_0(t) = \sum_{j=-1}^{-m} f^d [2^j t] + f^a [2^{-m} t]$, где *детализирующие компоненты* КЛ $f^d [2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t), d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle, f^d [2^j t] \in W_j, W_j = \text{clos}_{L^2(\mathbb{R})}(2^{j/2} \Psi(2^j t - n)): n \in \mathbb{Z}$; *сглаженная компонента* КЛ $f^a [2^{-m} t] = \sum_k c_{-m,n} \phi_{-m,n}(t), c_{-m,n} = \langle f, \phi_{-m,n} \rangle, f^a [2^{-m} t] \in V_{-m}, V_j = \text{clos}_{L^2(\mathbb{R})}(2^{j/2} \phi(2^j t - n)): n \in \mathbb{Z}$, ϕ – сглаживающая скэйлинг-функция.
2. Используя обратное вейвлет-преобразование [Chui, 1992], восстанавливаем исходное разрешение сглаженной компоненты: $f_0^{a,(-m)}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(-m)} \phi_{0,n}(t)$, верхние индексы $(-m)$, j соответствуют разрешению компоненты до выполнения операции обратного вейвлет-преобразования.
3. Для *сглаженной компоненты КЛ* $f_0^{a,(-m)}(t)$ на основе нейронной сети (НС) строим отображение $y: f_0^{a,(-m)} \rightarrow \hat{f}_0^{a,(-m)}$, где $f_0^{a,(-m)}$ – вход НС, $\hat{f}_0^{a,(-m)}$ – выход НС. Ошибка НС определяется как разность между желаемым $f_0^{a,(-m)}$ и действительным $\hat{f}_0^{a,(-m)}$ выходными значениями функции: $e(t) = \hat{f}_0^{a,(-m)}(t) - f_0^{a,(-m)}(t)$.

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

$$|e(t)| > T, \quad (5)$$

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/) 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.

Анализ магнитной бури 5-6 апреля 2010г. (рис.1) показывает, что примерно за сутки до момента SSC уровень КЛ повысился (рис. 1 б,с, показано красным цветом) и в этот период происходили слабые возмущения в геомагнитном поле (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 их уровня, и возник Форбуш-эффект (рис. 1 б,с, показан синим цветом), в период которого геомагнитное поле было сильно возмущено. К концу суток 6 апреля уровень КЛ восстановился и наблюдается постепенное уменьшение геомагнитных возмущений.

Накануне события 3 сентября 2012г на анализируемой станции наблюдается аномальное возрастание уровня КЛ (рис. 2б,с, красным цветом), которое возникло за сутки до начала магнитной бури и наибольшей интенсивности достигло примерно за 14ч. 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

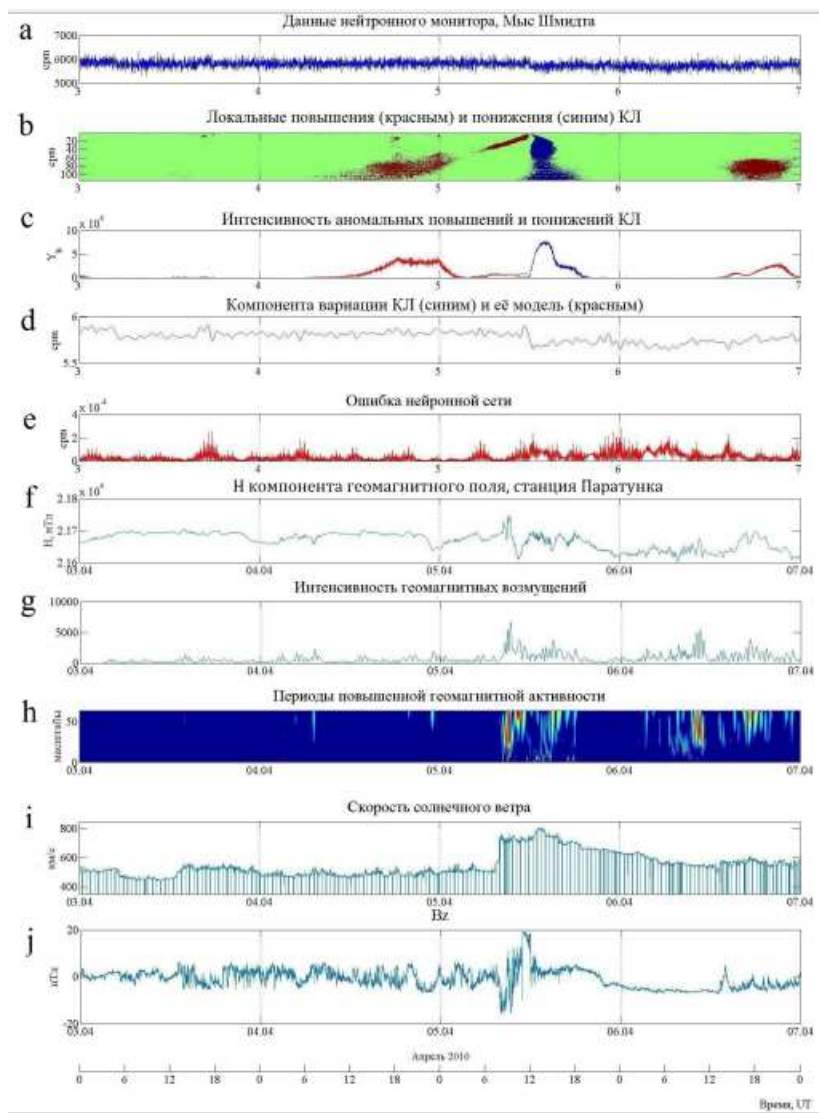


Рис. 1. Результаты обработки данных за период 3 апреля 2010 – 7 апреля 2010 г.

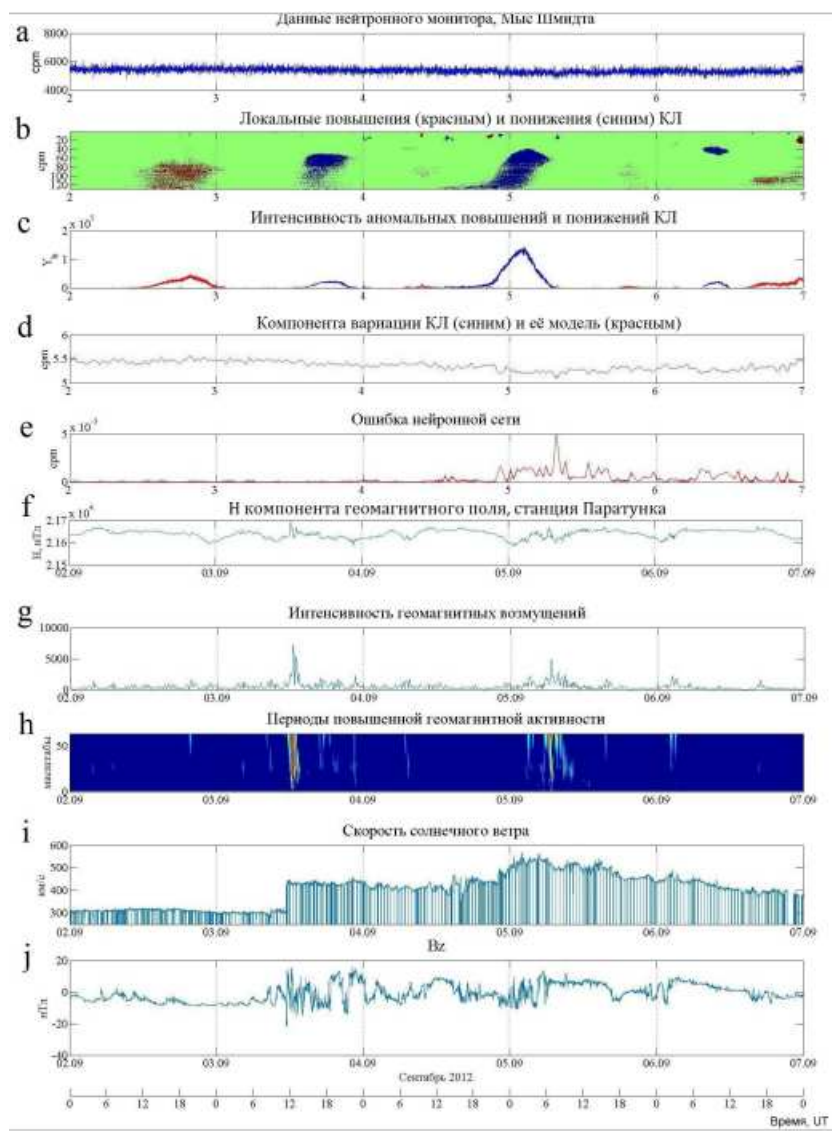


Рис. 2. Результаты обработки данных за период 2 сентября 2012 – 7 сентября 2012 г.

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. Представляют интерес выделенные аномальные повышения уровня КЛ, возникающие за несколько часов до начала магнитных бурь. Данные аномалии характеризовались плавным нарастанием интенсивности КЛ (около 8-12 часов) и, вероятно, связаны с ускорением КЛ по мере приближения межпланетного возмущения. Подобные аномальные изменения отмечены авторами работ [Munakata et al., 2000, Belov et al., 2003, Ruffolo, 1999]. 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 эффективно выделять подобные 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 перспективность применения описанных вычислительных решений и возможность их использования 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.

Литература

Belov, A. V., Bieber, J. W., Eroshenko, E. A., Evenson, P., Pyle, R., and Yanke, V. G.: Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances, *Adv. Space Res.*, 2003 – V. 31, No.4. pp 919-924.

Chui, C.K. An introduction in wavelets. Academic Press, New York. 1992. p. 264.

Kóta J., Somogyi A.- Some problems of investigating periodicities of cosmic rays *Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 1969. I.27, pp, 523-548.

Mandrikova O.V., Solovjev I., Geppener V., Taha A.-K., Klienskiy D. Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach // *Digit Signal Process*, 2013. V. 23. P. 329-339.

Mandrikova O.V., Solovjev I.S, Zalyaev T.L. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // *Earth Planet Space*, 2014. V. 66, doi:10.1186/s40623-014-0148-0.

Paschalis P., Sarlanis C., Mavromichalaki H. - Artificial Neural Network Approach of Cosmic Ray Primary Data Processing. *Solar Physics*, №182. V.1. p303-318. 2013

Ruffolo D., Transport and acceleration of energetic charged particles near an oblique shock, *Astrophys. J.*, 1999. No.515, 787-800.

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.

Zarrouk N., Bennaceur R. Neural Network and Wavelets In Prediction of Cosmic Ray Variability: The North Africa as Study Case, *Science Direct, Acta astronautica*, 2010. No.66. P. 1008-1016.

Зеленый Л.М., Веселовский И.С., Бреус Т.К. и др; общ. ред. Зеленый Л.М., Веселовский И. С. . Плазменная гелиогеофизика. В 2 т. Т.2. /– М. : Физматлит, 2008. 560 с.

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.. № 1. С. 47-55. 2007а.

Козлов В.И., Марков В.В. Вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 47. №1. С.56-65. 2007б.

Козлов В. И., Козлов В. В. Новый индекс солнечной активности – индекс мерцаний космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48, No 4, с. 1-9. 2008.

Мандрикова О.В., Заляев Т.Л. Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей переменной структуры // Цифровая обработка сигналов. №1. С. 11-16. 2015.

Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Изд. 2-е. – М.: Советское радио. 1975. 392 с.

Топтыгин И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. – М.: Наука, 1983. 301 с.

Тясто М.И., Данилова О.А, Дворников В.М, Сдобнов В.Е. Большие снижения геомагнитных порогов космических лучей в период возмущений магнитосферы. Известия РАН, серия физическая, Т. 73. № 3. С. 385-388. 2009.

Analysis of geomagnetic field data and cosmic rays variations during solar events and geomagnetic storms

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

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation

Kamchatka State Technical University

We performed analysis of the behavior of cosmic rays and studied the subtle features of geomagnetic field variations in disturbed periods. The paper applies a new methods of modeling and analysis of the data developed by the authors based on wavelet transform and neuron networks. During the analysis, we highlighted characteristics and elements of preparation and occurrence of events during the growth of solar wind velocity and interplanetary magnetic field amplitudes, and allocated anomalous changes in cosmic rays that occurred some hours before geomagnetic storms at the background of calm and weakly disturbed geomagnetic field. Long and deep Forbush decreases took place during the storms.

This research is supported by a grant of Russian Science Foundation No. 14-11-00194.