

Моделирование вариаций космических лучей и выделение аномалий на основе совмещения вейвлет-преобразования с нейронными сетями*

О. В. Мандрикова^{1,2}, Т. Л. Заляев¹

oksanam1@mail.ru; tim.aka.geralt@mail.ru

¹Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Камчатский край, Российская Федерация; ²Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

В работе исследованы данные нейтронных мониторов станций «Афины», «Новосибирск» и «Апатиты» за 2005–2013 гг. и обнаружены аномальные особенности, возникающие в вариациях космических лучей во время сильных магнитных бурь. Исследования основаны на разработанном авторами методе моделирования компонент данных космических лучей путем совмещения вейвлет-преобразования и нейронных сетей прямого распространения. Выполняется кратномасштабное вейвлет-разложение данных и выделяются информативные компоненты. Полученные компоненты аппроксимируются нейронными сетями прямого распространения. Метод позволяет выполнить детальный анализ структуры данных и путем анализа ошибок нейронной сети выявить аномальные особенности (Форбуш-эффекты) во временном ходе космических лучей.

Ключевые слова: космические лучи; вейвлет-преобразование; нейронные сети; магнитные бури; Форбуш-эффекты

Modeling of of cosmic ray variations and allocation of anomalies based on a combination of wavelet transform with neural networks*

O. V. Mandrikova^{1,2}, T. L. Zalyaev¹

¹Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Kamchatka Region, Russia; ²Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Background: Valuable information about the topology change of the geomagnetic field during magnetic storms is provided by study of the dynamics of cosmic rays. Observed on the Earth's surface variations of cosmic rays are the integral result of various solar, heliospheric and atmospheric phenomena and have a complex internal structure. The most significant changes in the parameters of cosmic rays are caused by coronal mass ejections and the following changes in the parameters of the interplanetary field and the solar wind.

In disturbed periods, the recorded parameters of the environment have a complex nonstationary structure, contain nonsmooth local features which occur at random time moments, and carry important information about the studied processes. Lack of theoretical apparatus providing an adequate description of the analyzed data leads to an inevitable loss and distortion of the information and requires advanced methods, among which are of great importance the methods of pattern recognition and digital signal processing.

*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №14-11-00194.

Methods: Based on a combination of multiresolution wavelet decompositions with neural network, a method of approximation of the cosmic rays time course and the allocation of anomalous variations (Forbush effects) that occur during the periods of high solar activity is proposed. The method allows to study in detail the structure of the data, to allocate informative components, and to build their approximation based on neural network.

Results: On the basis of the proposed method for the stations "Novosibirsk", "Apatity", and "Athens", software systems for neural network approximation of typical variations of cosmic rays were built and the analysis of data in the periods of strong magnetic storms was made. Application of the method allowed to study the dynamic characteristics of the processes and to allocate anomalous effects related to solar activity.

Concluding Remarks: Application of the method in conjunction with other methods and approaches allows to better perform the assessment of the state of space weather.

Keywords: *cosmic rays; wavelet transform; neural networks; magnetic storms; Forbush effects*

Введение

Работа направлена на создание методов и алгоритмов анализа регистрируемых геофизических параметров и изучение процессов в околоземном пространстве. Сложный характер изучаемых процессов, их априорная неопределенность и, как следствие, сложная структура регистрируемых данных требует наличия целого комплекса методов и технологий, позволяющих выполнять моделирование, структурный анализ данных и интерпретацию получаемых результатов. Отсутствие теоретического аппарата, обеспечивающего адекватное описание анализируемых 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, 2, 3, 4, 5, 6]. Исследования динамики потока космических лучей, являющихся предметом исследований в данной работе, позволяют получать ценную информацию об изменении топологии геомагнитного поля во время магнитных бурь. 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 [7]. Для изучения их динамических свойств в настоящее время получают развитие методы адаптивной аппроксимации, вейвлет-преобразование и нейронные сети. Использование нейронных сетей при первичной обработке данных нейтронных мониторов позволило повысить эффективность процедуры подавления шума, по сравнению с медианными методами [6]. На основе совмещения вейвлет-преобразования с методом разложения на эмпирические моды в долгосрочных временных изменениях хода космических лучей выделены доминирующие временные масштабы (периоды 11 лет, 22 года, 6 лет и двухлетние колебания) и определена их физическая природа [7]. В данной работе на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений с нейронными сетями построены аппроксимации компоненты временного хода космических лучей для различных станций регистрации данных. Описаны этапы выделения информативных компонент данных и построения нейронной сети. Выполненный анализ временного хода данных космических лучей в периоды сильных магнитных бурь (анализировались магнитные бури 5–7 апреля 2010 г. и 17 марта 2013 г.) показал, что возникающие в вариациях космических лучей аномальные изменения формируются на фоне повышенной геомагнитной

активности. В моменты существенного возрастания скорости солнечного ветра на анализируемых станциях выделены локальные возрастания уровня космических лучей (предповышения) и интенсивности геомагнитных возмущений. Отмечено, что регистрируемые на различных станциях данные космических лучей, как правило, имеют общий характер изменения. 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/).

Выделение компонент данных и построение нейронных сетей

Кратномасштабные разложения данных на компоненты. На основе кратномасштабных вейвлет-разложений до уровня получаем представление данных в виде [8, 9, 10]:

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

где исходное разрешение данных $j = 0$, $f^d[2^j t] \in W_j$, $f^a[2^{-m} t] \in V_{-m}$, $W_j = \text{close}_{L^2(R)}(2^{j/2}\Psi(2^j t - n)) : n \in Z$; Ψ — базисный вейвлет; $V_{-m} = \text{close}_{L^2(R)}(2^{j/2}\varphi(2^j t - n)) : n \in Z$; φ — скэйлинг-функция; j — разрешение. Компонента ряда $f^a[2^{-m} t] = \sum_n c_{-m,n} \varphi_{-m,n}$, где $c_{-m,n} = \langle f, \varphi_{-m,n}(t) \rangle$, является сглаженной компонентой, компоненты $f^d[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$, где $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n}(t) \rangle$, являются разномасштабными детализирующими компонентами.

После восстановления исходного разрешения $j = 0$, полученные после преобразования (1) компоненты имеют представление:

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

где верхние индексы $(-m), j$ соответствуют разрешению компоненты до выполнения операции вейвлет-восстановления.

Аппроксимация сглаженной компоненты данных нейронной сетью. Для сглаженной компоненты $f_0^{a,-m}$, используя *сеть переменной структуры* (*сеть переменной структуры* — это многослойная прямонаправленная сеть, архитектура которой определяется путем минимизации ошибки решения на множестве обучающих векторов [2]), строим отображение

$$y : f_0^{a,-m} \rightarrow f_0^{*a,-m}.$$

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 нейронной сети значений функции $f_0^{(-m)}$ из интервала $[t_n - Q + 1, t_n]$, сеть становится способной вычислить упрежденные ее значения на временном интервале $[t_n + 1, t_n + I]$, где t_n — текущий дискретный момент времени; I — 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.

$$e_m[t_n] = \sum_{i=1}^I f_{0,i}^{*(-m)}[t_n] - \hat{f}_{0,i}^{*(-m)}[t_n],$$

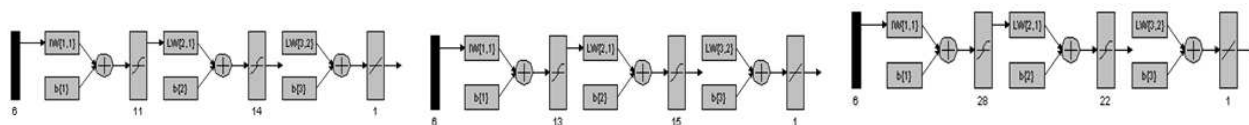


Рис. 1. Архитектура нейронных сетей по аппроксимации данных КЛ для станций «Афины», «Апатиты» и «Новосибирск»

где i — шаг упреждения данных, квадратные скобки обозначают дискретные моменты времени. Разработанный авторами алгоритм построения сети и выбора уровня вейвлет-разложения, основанный на минимизации ошибки аппроксимации, приведен в работе [11].

Если во временном ходе данных возникает *аномальное изменение*, то абсолютное значение ошибки сети возрастет. Поэтому *выделение аномальных изменений* может быть основано, например, на проверке условия:

$$E_{m,U} = \frac{1}{U} \sum_{n=1}^U e_m[t_n] > T.$$

Моделирование данных космических лучей

В экспериментах использовались минутные данные космических лучей за период 2005–2013 гг. Следуя критериям выбора аппроксимирующих вейвлетов, предложенным в работе [9], для кратномасштабных вейвлет-разложений использовались вейвлеты семейства Койфлеты. В частности, в работе [11] показано, что при совместном применении вейвлет-преобразования и нейронных сетей, наименьшую погрешность аппроксимации вариаций космических лучей, позволяют получить Койфлеты порядка 3. Поскольку динамика космических лучей существенно зависит от электромагнитной обстановки в солнечной системе и находит отражение в геомагнитном поле [12], обучающие множества нейронных сетей формировались из данных, регистрируемых в периоды спокойного геомагнитного поля. Обучение сетей выполнялось на основе алгоритма обратного распространения ошибки [13].

Архитектура построенных нейронных сетей для станций «Афины», «Новосибирск» и «Апатиты» представлена на рис. 1. Как следует из рис.1, построенные нейронные сети имеют трехслойную структуру и выполняют следующее преобразование данных:

$$c_{j,n+1}(t) = \alpha_\chi^3 \left(\sum_s \omega_{\chi s}^3 \alpha_s^2 \left(\sum_l \omega_{sl}^2 \alpha_l^1 \left(\sum_n \omega_{ln}^1 c_{j,n}(t) \right) \right) \right),$$

где ω_{ln}^1 — весовые коэффициенты нейрона входного слоя сети; ω_{sl}^2 — весовые коэффициенты нейрона скрытого слоя сети; $\omega_{\chi s}^3$ — весовые коэффициенты нейрона выходного слоя; $\alpha_l^1(z) = \alpha_s^2(z) = (2/(1 + \exp(-2z)) - 1$; $\alpha_\chi^3(z) = a * z + b$.

В табл. 1 показаны среднеквадратичные ошибки сетей, рассчитанные для спокойного (21.11.2013–23.11.2013) и возмущенного (16.03.2013–18.03.2013) периодов времени. На рис. 2–4 представлены результаты моделирования данных в эти периоды. Анализ результатов показывает, что в возмущенные периоды происходит изменение временного хода процесса, и ошибки сетей существенно увеличиваются.

Таблица 1. Среднеквадратичные ошибки нейронных сетей

Период времени	Афины	Новосибирск	Апатиты
16.03.2013–18.03.2013	0,0009	0,0008	0,0003
21.11.2013–23.11.2013	0,00005	0,00005	0,00004

Анализ данных в период сильных магнитных бурь

Первая анализируемая магнитная буря была зарегистрирована на Земле 5 апреля 2010 г. в 08.26 UT как внезапное начало SC магнитной бури. Скорость солнечного ветра возросла до 750–900 км/с. Примерно через полчаса в магнитосфере Земли возникла интенсивная суббуря, наблюдаемая в глобальном масштабе [14]. Как показывает анализ рис. 5 и 6, в эти моменты времени на анализируемых станциях возникли возрастания интенсивности геомагнитных возмущений (интенсивность геомагнитных возмущений оценивалась в соответствии с методом предложенным в работе [15]) и локальные возрастания уровня космических лучей (ошибки нейронных сетей увеличились в 4 раза на станции «Афины» и в 2,5 раза на станции «Новосибирск», по сравнению со спокойным периодом). На станции «Афины» зафиксирован короткий Форбуш-эффект (понижение уровня космических лучей) с быстрым восстановлением, пик которого пришелся на 20:00 UT (наблюдается возрастание ошибки нейронной сети в 3 раза, по сравнению со спокойным периодом). На станции «Новосибирск» Форбуш-эффект был более длительным, пик его пришелся на 16:00 UT (возрастание ошибки нейронной сети в 10 раз, по сравнению со спокойным периодом).

На рис. 7 и 8 показаны результаты работы нейронных сетей для станций «Новосибирск» и «Афины» в период сильных магнитных бурь, произошедших 7–10 марта и 15–17 марта 2012 г. Форбуш-эффект в период бури 7–10 марта возник 8 марта и выразился в сильном понижении уровня космических лучей (до 10%) на обеих станциях. Во время Форбуш-эффекта существенно возрастают абсолютные значения ошибок сетей (до 10 раз), что позволяет автоматически фиксировать данные моменты времени. Сопоставление с геомагнитными данными показывает, что в периоды аномальных изменений хода космических лучей наблюдаются наиболее сильные геомагнитные возмущения. В период магнитной бури 15–17 марта моменты сильных возражений интенсивности геомагнитных возмущений совпадают с локальными понижениями уровня космических лучей и имеют более яркое проявление на станции «Новосибирск». Восстановление уровня космических лучей происходит после окончания бури.

Анализируемая на рис. 9 и 10 магнитная буря была зафиксирована на Земле 17 марта 2013 г. Скорость солнечного ветра достигла значений 700–750 км/с в связи с приходом ускоренного потока от СМЕ 15 марта 2013 г. Приход ударной волны произошел 17.03.13 в 6:00 UT и зафиксирован сетью станции «Афины» как локальное изменение хода космических лучей (уровень ошибки нейронной сети в «Афинах» вырос до 20 раз, по сравнению со спокойным периодом). Одновременно с этими событиями существенно возросла интенсивность геомагнитных возмущений. Максимальные значения интенсивности возмущений поля зафиксированы 17 марта в период понижения уровня космических лучей с 16:00 до 20:00 UT (на обеих станциях наблюдалось возрастание ошибки нейронной сети). Резкий скачок скорости солнечного ветра 22 марта в период с 12:00 до 18:00 UT привел к повторному повышению уровня ошибок нейронных сетей (в 4 раза на станции «Новоси-

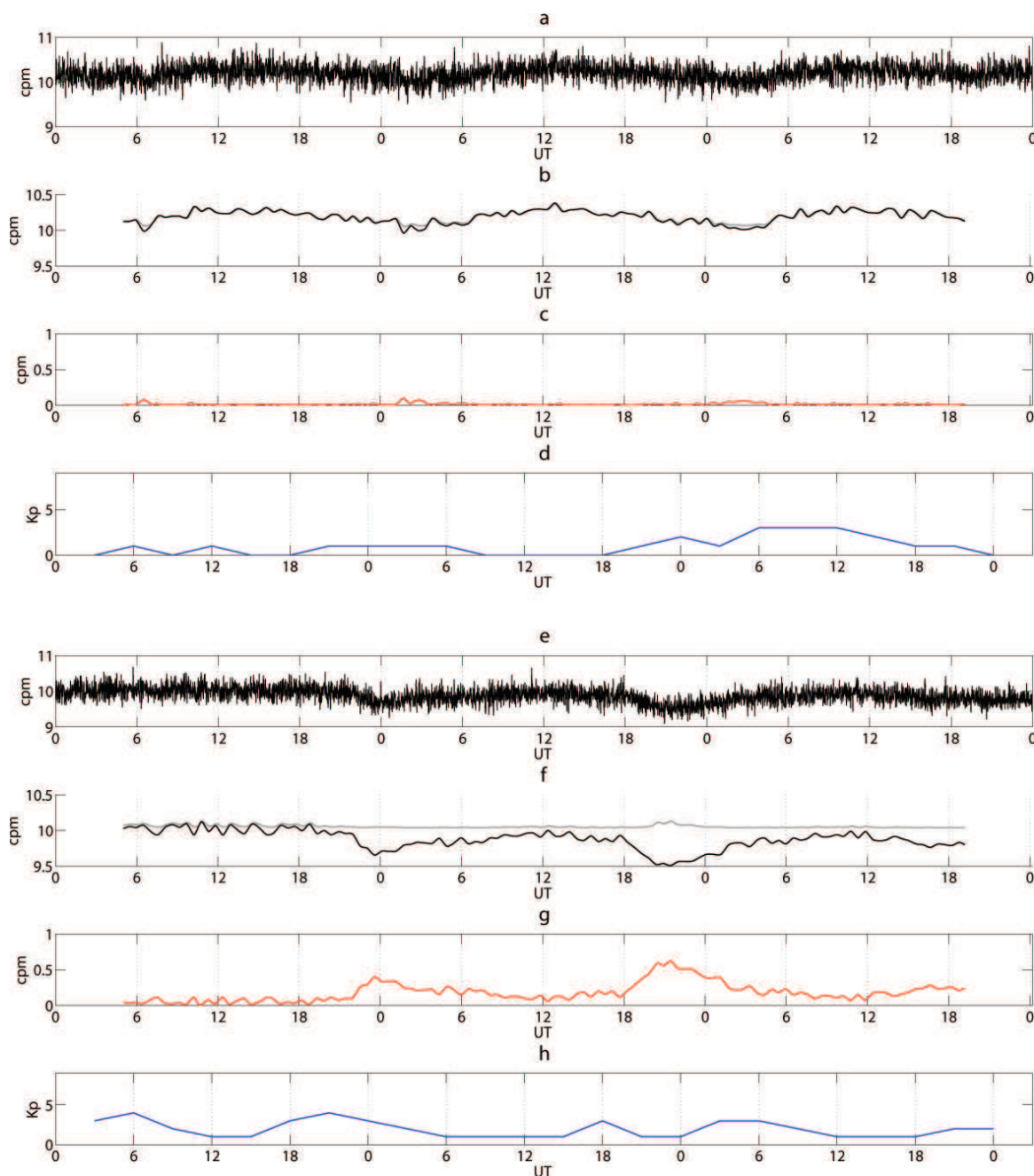


Рис. 2. Результаты работы нейронной сети, станция «Апатиты»: (а) сигнал космических лучей станции «Апатиты» за период 21–23 ноября 2013 г.; (б) сглаженная компонента вариации КЛ а (черный цвет) и ее аппроксимация нейронной сетью (серый цвет) (период спокойного геомагнитного поля); (с) абсолютные значения ошибок нейронной сети; (д) Кр индекс; (е) сигнал космических лучей станции «Апатиты» за период 14–16 декабря 2013 г.; (ф) сглаженная компонента вариации КЛ а (черный цвет) и ее аппроксимация нейронной сетью (серый цвет) (период спокойного геомагнитного поля); (г) абсолютные значения ошибок нейронной сети; (h) Кр индекс

бирск», и в 40 раз на станции «Афины»). Возрастание интенсивности геомагнитного поля началось на несколько часов позже.

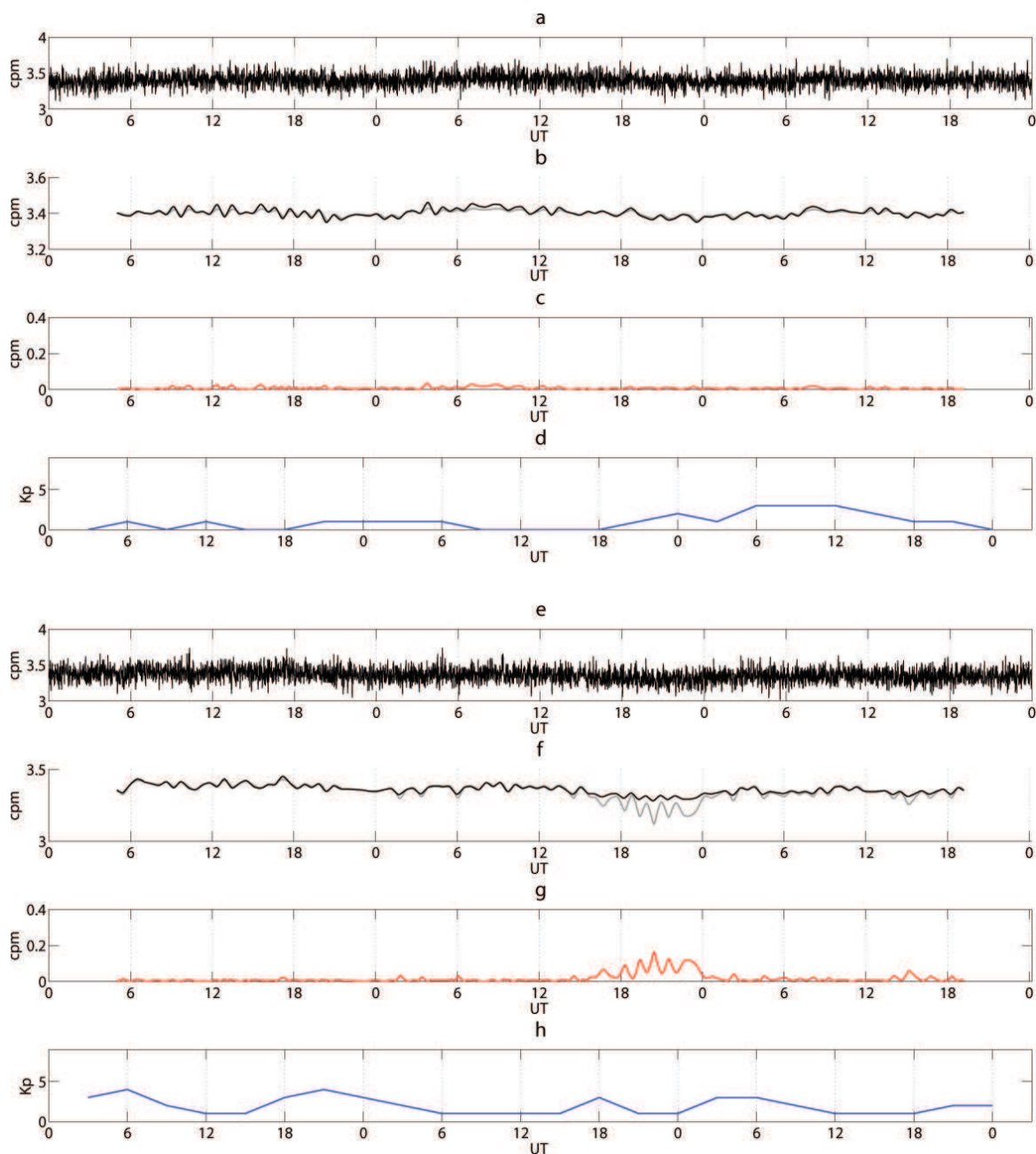


Рис. 3. Результаты работы нейронной сети, станция «Афины»: (а) сигнал космических лучей станции «Афины» за период 21–23 ноября 2013 г.; (б) сглаженная компонента вариации К.Л а (черный цвет) и ее аппроксимация нейронной сетью (серый цвет) (период спокойного геомагнитного поля); (с) абсолютные значения ошибок нейронной сети; (д) Кр индекс; (е) сигнал космических лучей станции «Апатиты» за период 14–16 декабря 2013 г.; (ф) сглаженная компонента вариации К.Л а (черный цвет) и ее аппроксимация нейронной сетью (серый цвет) (период спокойного геомагнитного поля); (г) абсолютные значения ошибок нейронной сети; (h) Кр индекс

Заключение

На основе разработанного авторами метода моделирования данных нейтронных мониторов построены нейросетевые программные системы по аппроксимации вариаций космических лучей для различных станций регистрации и выполненный анализ временного хода данных в периоды сильных магнитных бурь. Разработанный метод позволяет вы-

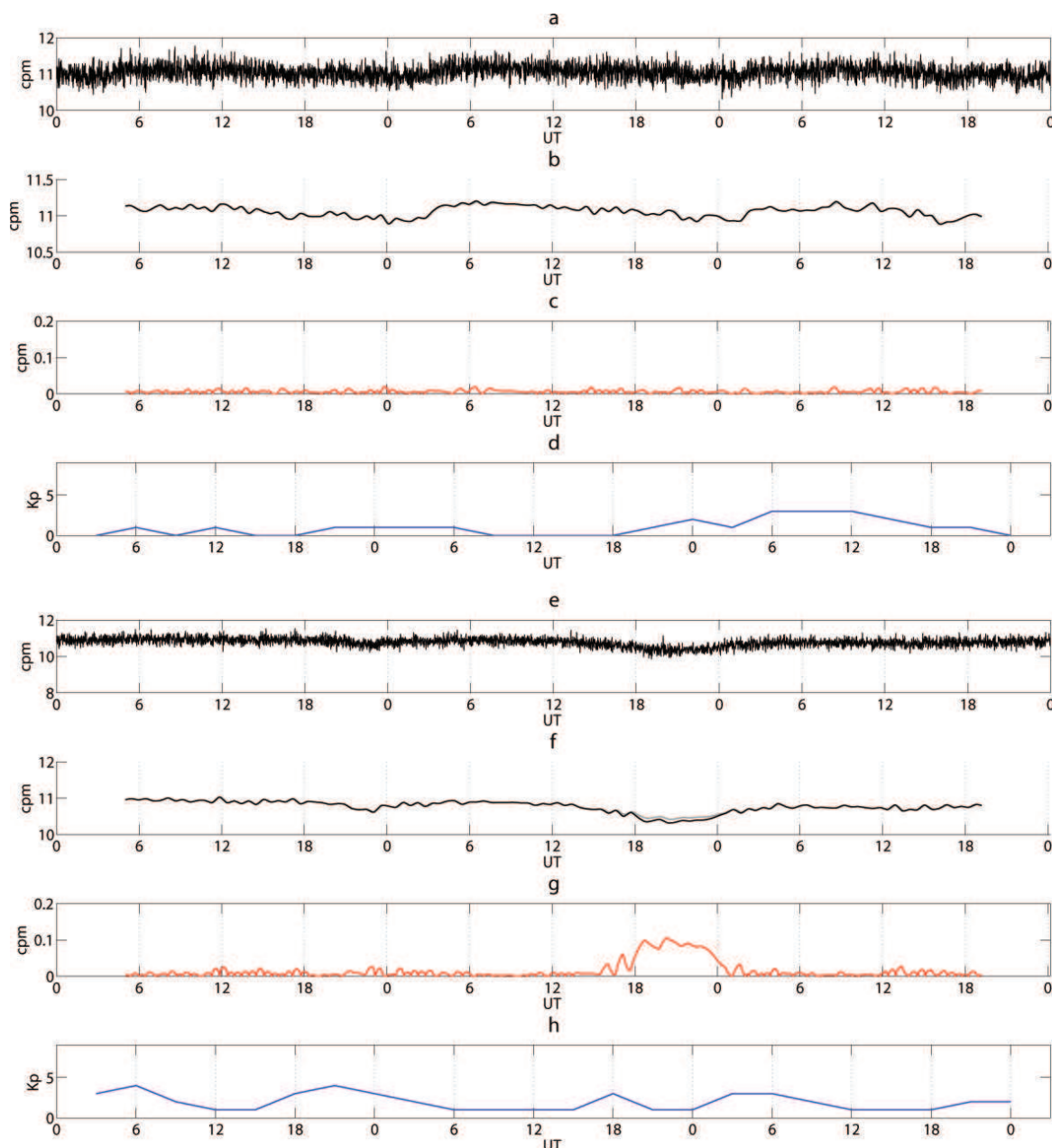


Рис. 4. Результаты работы нейронной сети, станция «Новосибирск»: (а) сигнал космических лучей станции «Новосибирск» за период 21–23 ноября 2013 г.; (б) сглаженная компонента вариации КЛ а (черный цвет) и ее аппроксимация нейронной сетью (серый цвет) (период спокойного геомагнитного поля); (с) абсолютные значения ошибок нейронной сети; (д) Кр индекс; (е) сигнал космических лучей станции «Апатиты» за период 14–16 декабря 2013 г.; (ф) сглаженная компонента вариации КЛ а (черный цвет) и ее аппроксимация нейронной сетью (серый цвет) (период спокойного геомагнитного поля); (г) абсолютные значения ошибок нейронной сети; (h) Кр индекс

делять моменты возникновения Форбуш-эффектов и определять их продолжительность. Показано, что возникающие в вариациях космических лучей аномальные изменения формируются на фоне повышенной геомагнитной активности. Результаты обработки показали, что в моменты возрастания скорости солнечного ветра на анализируемых станциях фиксируются аномальные изменения во временном ходе космических лучей, что подтвер-

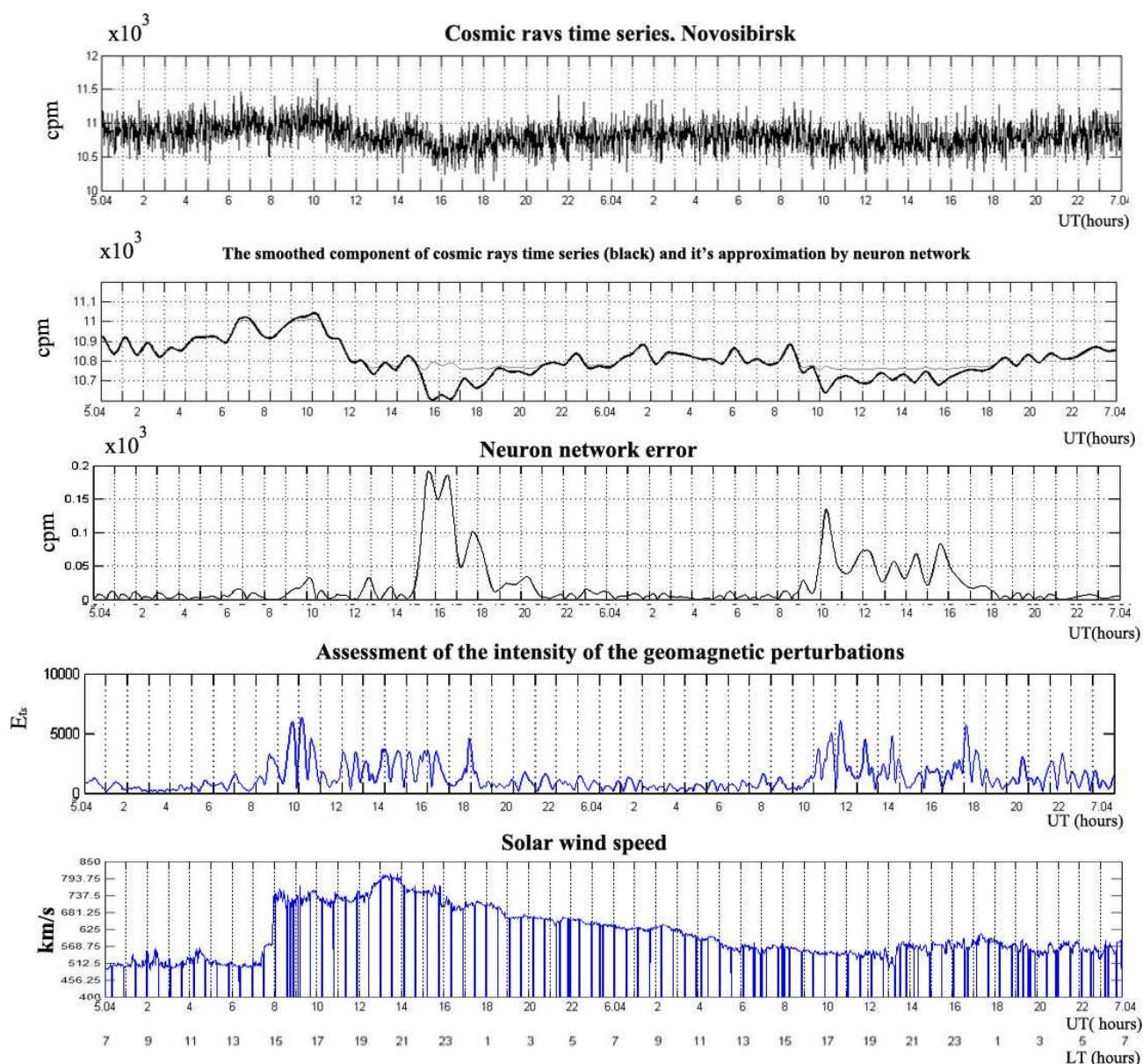


Рис. 5. Результаты анализа данных космических лучей станции «Новосибирск» за период с 05.04.2010 г. по 07.04.2010 г.

ждает существенное влияние скорости солнечного ветра на измеряемый на Земле уровень космических лучей.

Литература

- [1] Macpherson K. P., Conway A. J., Brown J. C. Prediction of solar and geomagnetic activity data using neural networks // *J. Geophys. Res.*, 2001. Vol. 100. P. 735–744.
- [2] Nayar S. R. P., Radhika V. N., Seen P. T. Seena Investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet Techniques // *ILWS Workshop Proceedings*, Goa, India, 2006.
- [3] Jach A., Kokoszka P., Sojka J., Zhu L. Wavelet-based index of magnetic storm activity // *J. Geophys. Res.*, 2006. 111. doi:10.1029/2006ja011635. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JA011635/pdf>.

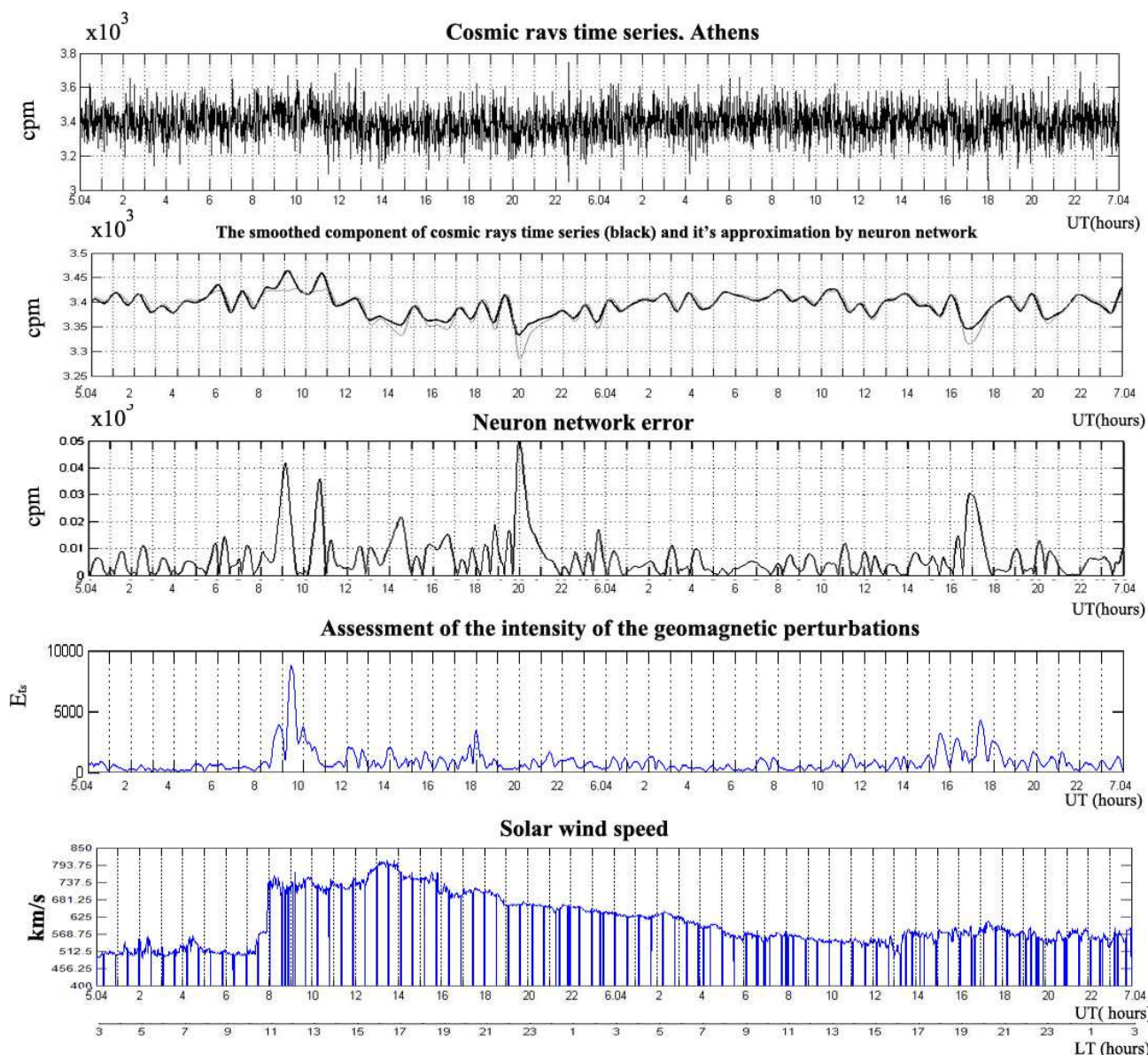


Рис. 6. Результаты анализа данных космических лучей станции «Афины» за период с 05.04.2010 г. по 07.04.2010 г.

- [4] Hafez A. G., Ghamry E., Yayama H., Yumoto K. Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis // *Advances in Space Research*, 2013. Vol. 51. P. 39–49.
- [5] 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. Vol. 70. P. 1579-1588.
- [6] Paschalidis P., Sarlanis C., Mavromichalaki H. Artificial neural network approach of cosmic ray primary data processing // *Solar Physics*, 2013. Vol. 182, No.1. P. 303–318.
- [7] Vecchio A., Laurenza M., Storini M., Carbone V. New insights on cosmic ray modulation through a joint use of non stationary data-processing methods // *J. Advances Astronomy*, 2012. doi:10.1155/2012/834247.
- [8] Chui C. K. An introduction in wavelets. New York: Academic Press, 1992.

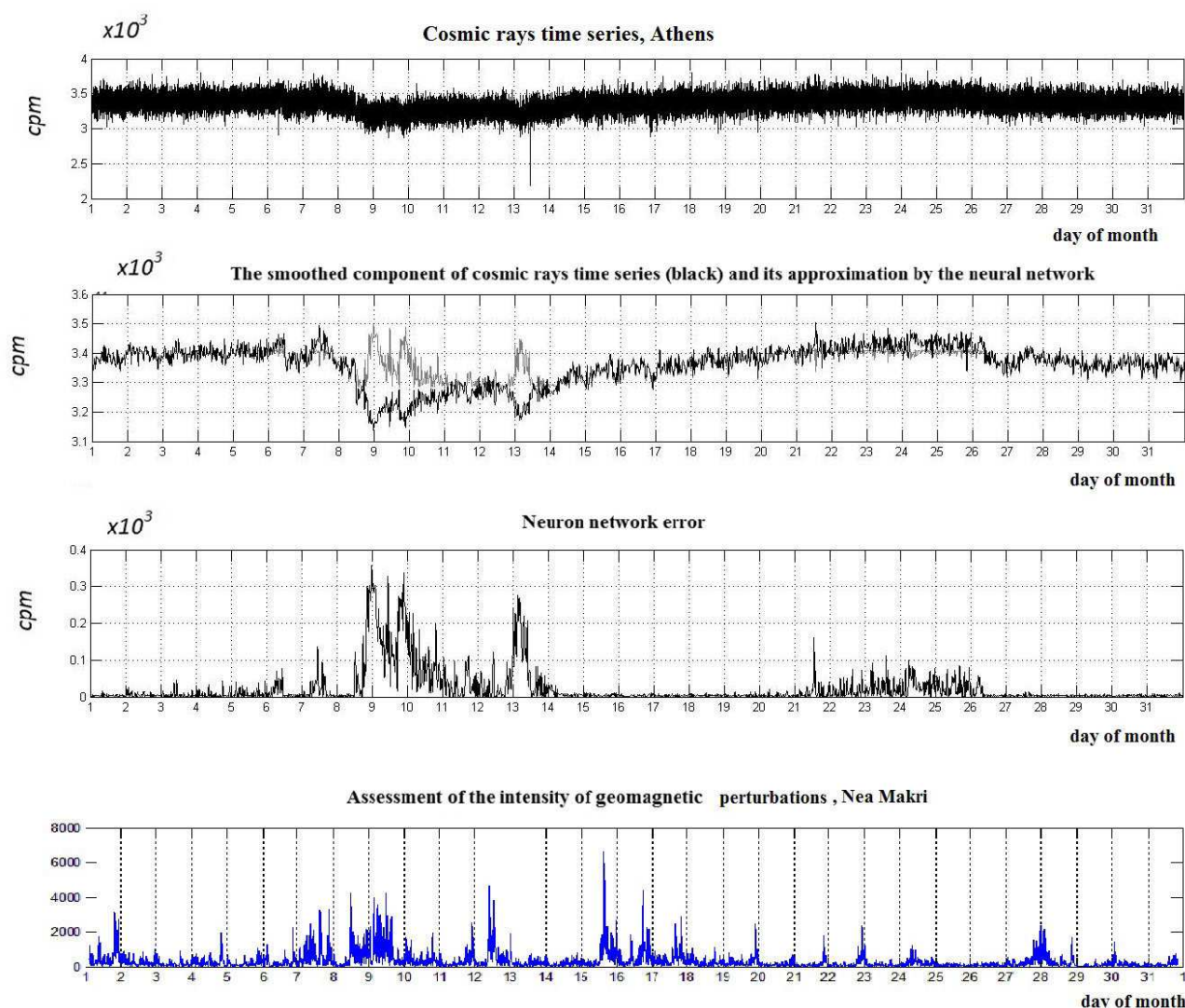


Рис. 7. Результаты работы нейронной сети на станции «Афины» за март 2012 г.

- [9] *Daubechies I.* Ten lectures on wavelets. CBMS-NSF lecture notes ser. Philadelphia: SIAM, 1992. 61.
- [10] *Mallat S.* A wavelet tour of signal processing. London: Academic Press, 1999.
- [11] Мандрикова О. В., Заляев Т. Л. Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабного анализа и сетей переменной структуры // Сб. тезисов докладов VI Междунар. научн.-технич. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2013). СПб, 2013. С. 111–117.
- [12] *Akasofu S. I., Chapman S.* Solar-terrestrial physics. Oxford: Oxford University Press, 1972.
- [13] *Haykin S.* Neural Networks: A comprehensive foundation. 2nd ed. New York: Prentice-Hall, 1999.
- [14] Клейменова Н. Г., Зелинский Н. Р., Козырева О. В., Малышева Л. М., Соловьев А. А., Богоутдинов Ш. Р. Геомагнитные пульсации РсЗ на приэкваториальных широтах в начальную фазу магнитной бури 5 апреля 2010 г. // Геомагнетизм и аэрономия, 2013. Т. 53. С. 313–320.
- [15] *Mandrikova O., Solovjev I., Geppenerc 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 Processing, 2013. Vol. 23, No. I.1. P. 329–339.

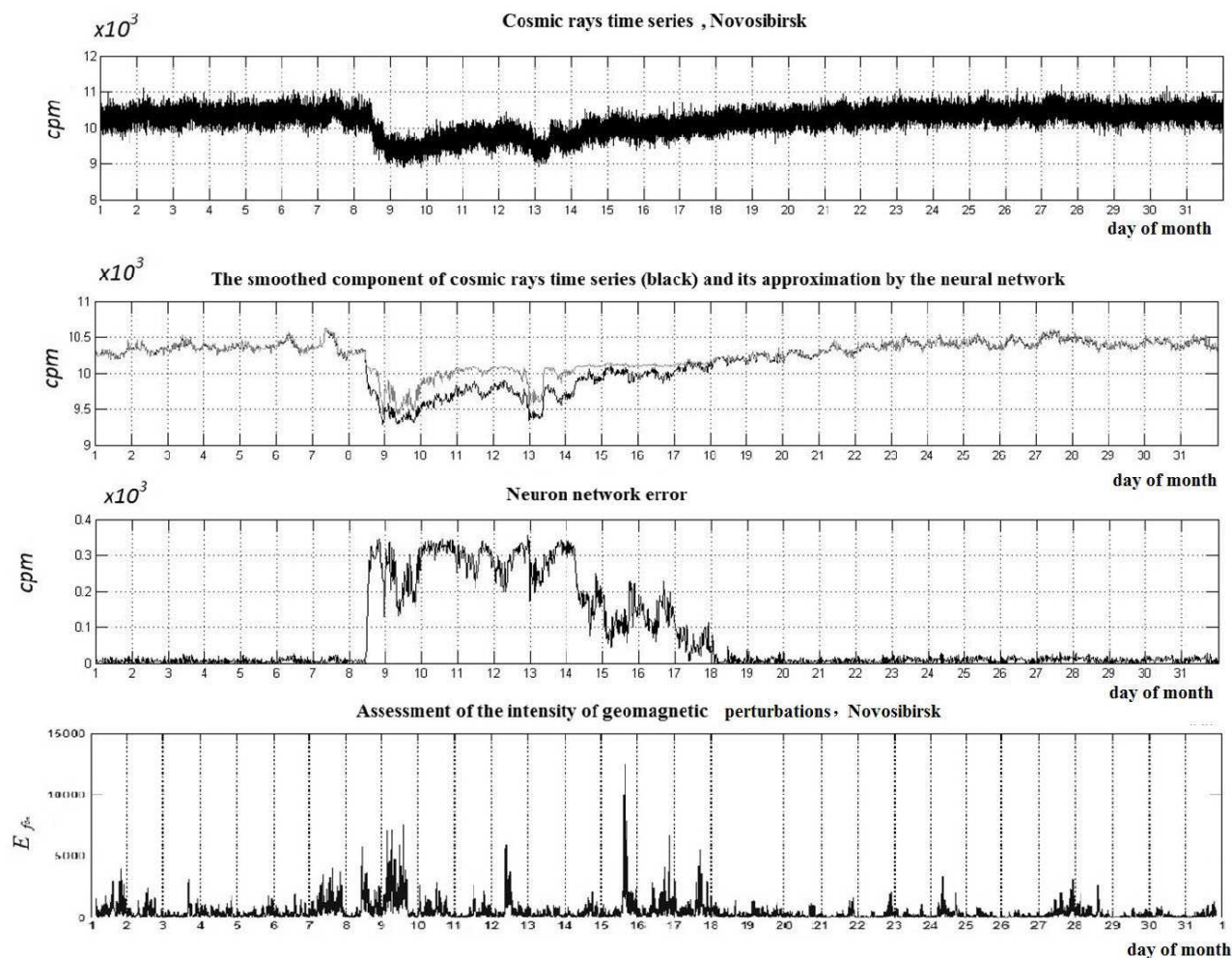


Рис. 8. Результаты работы нейронной сети на станции «Новосибирск» за март 2012 г.

References

- [1] Macpherson K. P., Conway A. J., and Brown J. C. 2001. Prediction of solar and geomagnetic activity data using neural networks. *J. Geophys. Res.* 100:735–744.
- [2] Nayar S. R. P., Radhika V. N. and Seen P. T. 2006. Seena investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet Techniques. *ILWS Workshop Proceedings*. Goa, India.
- [3] Jach A., Kokoszka P., Sojka J., Zhu L. 2006. Wavelet-based index of magnetic storm activity. *J. Geophys. Res.* 111. doi:10.1029/2006ja011635. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JA011635/pdf>.
- [4] Hafez A. G., Ghamry E., Yayama H., Yumoto K. 2013. Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis. *Advances Space Research* 51:39–49.
- [5] Xu Z., Zhu L., Sojka J., Kokoszka P., Jach A. 2008. 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.* 70:1579–1588.
- [6] Paschalis P., Sarlanis C., Mavromichalaki H. 2013. Artificial neural network approach of cosmic ray primary data processing. *Solar Phys.* 182(1):303–318.

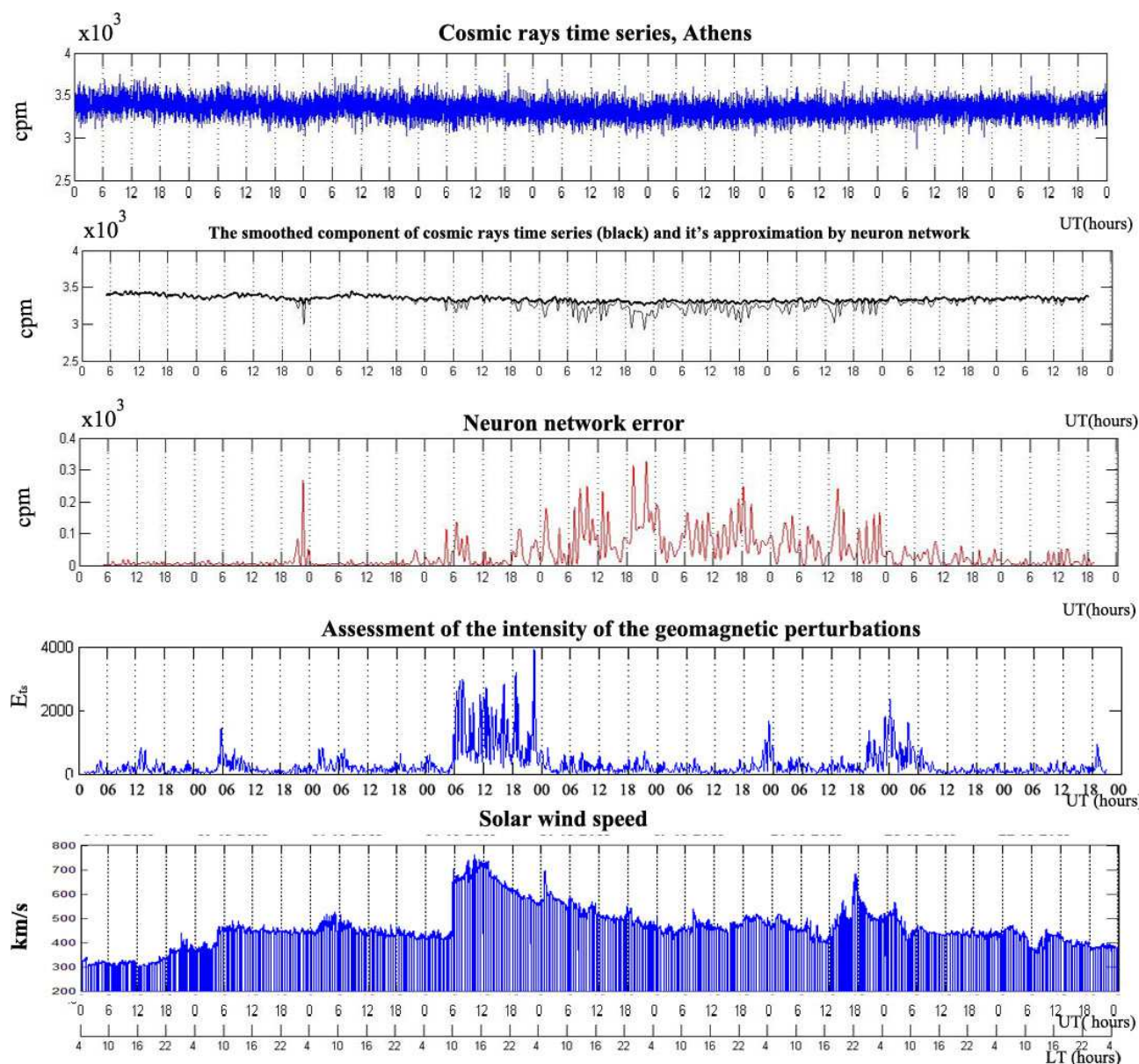


Рис. 9. Результаты анализа данных космических лучей станции «Новосибирск» за период с 14.03.2013 г. по 22.03.2013 г.

- [7] Vecchio A., Laurenza M., Storini M., Carbone V 2012. New insights on cosmic ray modulation through a joint use of non stationary data-processing methods. *J. Advances Astronomy*. doi:10.1155/2012/834247.
- [8] Chui C. K. 1992. An introduction in wavelets. New York: Academic Press.
- [9] Daubechies I. 1992. Ten lectures on wavelets. CBMS-NSF lecture notes ser. Philadelphia: SIAM. 61.
- [10] Mallat S. 1999. A wavelet tour of signal processing. London: Academic Press.
- [11] Mandrikova O. V., Zalyaev T. L. 2013. Modeling of the cosmic rays variations on the basis of combination of multiresolution analysis and neural networks with variable structure. *VI Scientific and Technical Conference (International) on Soft Computing and Measurements (SCM'2013) Proceedings*. St. Petersburg. 111–117. (in Russ.)
- [12] Akasofu S. I., Chapman S. 1972. Solar-terrestrial physics. Oxford University Press, Oxford.

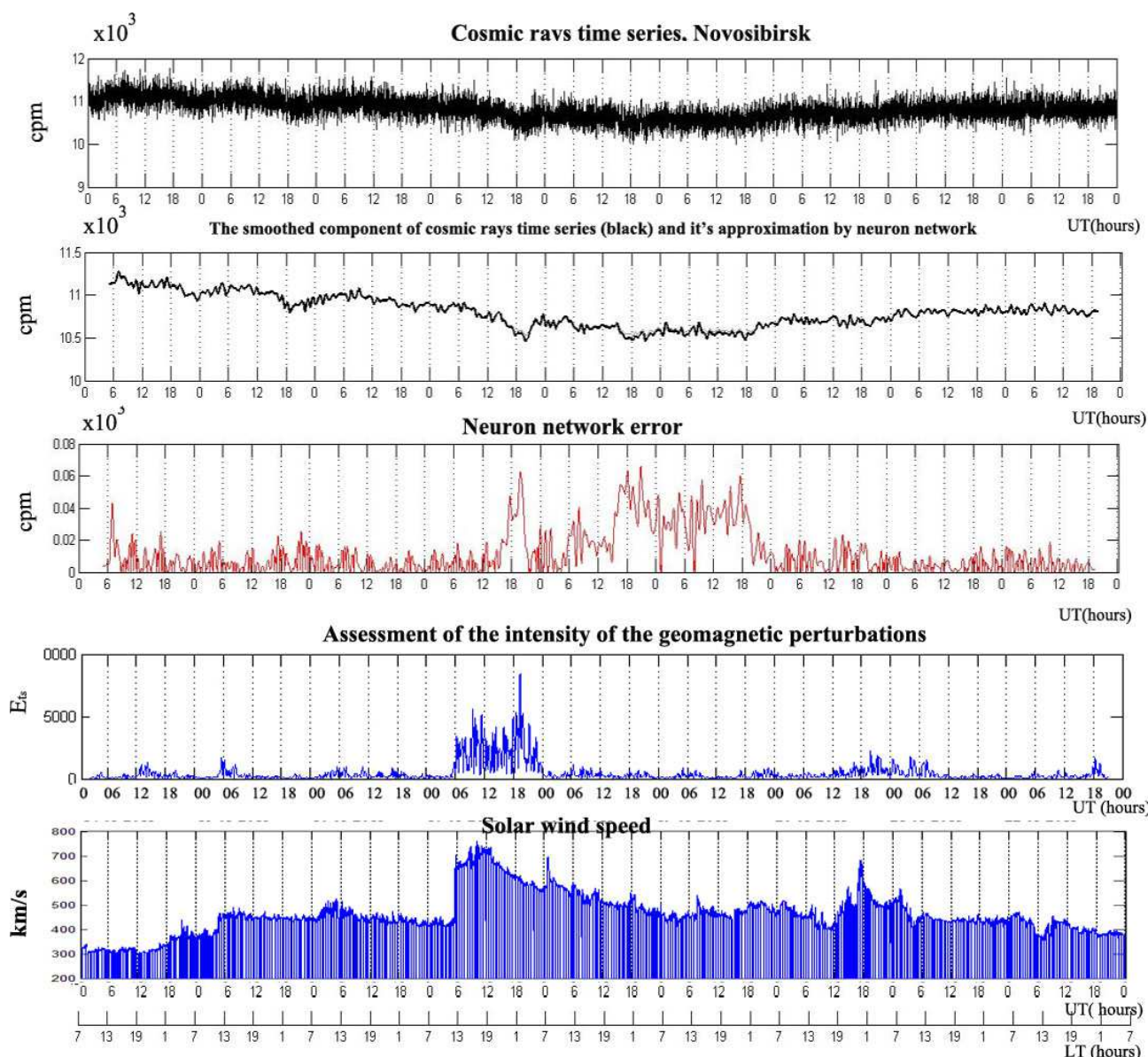


Рис. 10. Результаты анализа данных космических лучей станции «Афины» за период с 14.03.2013 г. по 22.03.2013 г.

- [13] Haykin S. 1999. Neural networks: A comprehensive foundation. 2nd ed. New York: Prentice-Hall.
- [14] Kleimenova N. G., Zelinskii N. R., Kozyreva O. V., Malysheva L. M., Solov'ev A. A., and Bogoutdinov Sh. R. 2013. Pc3 geomagnetic pulsations at near-equatorial latitudes at the initial phase of the magnetic storm of April 5, 2010. *Geomagnetism Aeronomy* 53:313–320.
- [15] Mandrikova O., Solovjev I., Geppener V., Taha Al-Kasasbeh R., Klionskiy D. 2013. Analysis of the Earth's magnetic field variations on the basis of a wavelet-based approach. *Digital Signal Processing*. 23(I.1):329–339.