

DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-49-55

УДК 516

## **АНАЛИЗ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПЕРИОДЫ СОЛНЕЧНЫХ СОБЫТИЙ И ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ**

**О. В. Мандрикова, Ю. А. Полозов, И. С. Соловьев, Н. В. Фетисова**

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7

E-mail: oksanam1@mail.ru, up\_agent@mail.ru, kamigsol@yandex.ru, nv.glushkova@yandex.ru

В работе показаны новые методы анализа ионосферных и магнитных данных с использованием разработанных авторами многокомпонентных модельных построений (моделей МКМ). По данным наземных станций выполнен анализ ионосферных и геомагнитных данных в периоды повышенной солнечной активности.

*Ключевые слова: магнитная буря, ионосферные параметры, анализ данных, вейвлет-преобразование, нейронные сети*

© Мандрикова О. В. и др., 2016

MSC 62-07

## **THE ANALYSIS OF IONOSPHERIC PARAMETERS DURING PERIODS OF SOLAR EVENTS AND GEOMAGNETIC STORMS**

**O. V. Mandrikova, Yu. A. Polozov, I. S. Solovjev, N. V. Fetisova**

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034 Kamchatka region, Paratunka, Mirnaya str., 7.

E-mail: oksanam1@mail.ru, up\_agent@mail.ru, kamigsol@yandex.ru, nv.glushkova@yandex.ru

The paper shows the new methods of analysis of ionospheric and magnetic data using developed by the authors models of multicomponent constructions (MCM models). During periods of high solar activity ionosphere and geomagnetic data is analyzed according to ground stations.

*Key words: magnetic storm, ionospheric parameters, data analysis, wavelet transform, neural networks.*

© Mandrikova O. V. et al, 2016

## Введение

В периоды повышенной солнечной активности в регистрируемых ионосферных параметрах могут наблюдаться аномальные изменения, характеризующие процессы в магнитосфере и ионосфере Земли [1, 2, 3]. Аномальные изменения проявляются в виде значительного отклонения (роста или понижения) концентраций электронов по отношению к характерному уровню. Моменты возникновения, относительная величина и временная протяженность ионосферных аномалий зависят от многих факторов. В сейсмоактивных районах Земли ионосферные аномалии также могут быть обусловлены повышенной сейсмической активностью [1, 4]. Несмотря на интенсивное развитие технологий мониторинга околоземного пространства и методов анализа данных, возможности оценки и прогноза состояния ионосферы в настоящее время еще весьма ограничены и развитие эмпирических методик и технических средств по их выделению имеет важное научное и прикладное значение [1, 5].

Задачи анализа состояния ионосферы и выявления аномалий, решаются большим количеством авторов [2, 3, 5, 6, 7, 8]. Среди основных подходов можно выделить традиционный метод скользящей медианы [1, 9], эмпирические модели ионосферы [2, 3, 5, 6, 7], применение нейронных сетей [2, 8, 10], и вейвлет-преобразование [10, 11, 12, 13, 14]. Наиболее разработанной эмпирической моделью ионосферы является Международная справочная ИРИ модель [5], которая основана на широком диапазоне наземных и космических данных. Точность ИРИ модели для оценки параметров в конкретном регионе существенно зависит от наличия в нем регистрируемых данных и может давать результаты с большими отклонениями от экспериментальных данных [5]. С этим связан факт получения более точного прогноза на основе ИРИ модели для средних широт, по сравнению с экваториальными и авроральными широтами. Также в работах [2, 7], показано, что точность ИРИ модели существенно зависит от уровня солнечной активности и убывает с ростом последней. Новые разработки эмпирических моделей с применением нейронных сетей [2, 8] позволяют по сравнению с ИРИ моделью существенно повысить качество прогноза, легко реализуемы в автоматическом режиме и являются достаточно гибкими. Но эти модели относятся к классу моделей «черного ящика», поэтому для описания признакового пространства требуют длинных обучающих выборок, склонны к переобучению и могут показывать непредсказуемые результаты в случае сильно зашумлённых данных. В данной работе применяется комплексный подход, основанный на использовании методов вейвлет-преобразования и их совмещении с классическими авторегрессионными методами и нейронными сетями. В более ранних работах авторов показано [4, 12, 13, 14] что применение классических авторегрессионных методов [15] в комплексе с современными методами распознавания образов позволяет получать достаточно точные оценки, и они легко реализуемы в автоматическом режиме. Но основным преимуществом предлагаемого подхода является математическая обоснованность и как следствие возможность получения результатов с заданной достоверной вероятностью.

Анализ параметров ионосферы в работе выполнялся совместно с данными геомагнитного поля ([www.ikig.ru](http://www.ikig.ru)), для обработки которых применялись методы, описанные в работе [16]. Сопоставление полученных результатов производилось с параметрами солнечного ветра (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC>).

## Описание методов

### 1. Модель МКМ-1 временного ряда параметров ионосферы на основе вейвлетов и авторегрессионных моделей.

Шаг 1. На основе кратномасштабных разложений (КМА) временной ряд  $f_o$  представляем в виде линейной комбинации разномасштабных составляющих: сглаженной  $f[2^{-m}t]$  масштаба  $m$  и детализирующих  $g[2^j t]$  масштабов  $j = \overline{-1, -m}$  [4]:

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

где  $g[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$ ,  $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ ,  $\Psi$  - базисный вейвлет,  $j$  - разрешение,  $f[2^{-m}t] = \sum_k c_{-m,n} \phi_{-m,n}(t)$ ,  $c_{-m,n} = \langle f, \phi_{-m,n} \rangle$ ,  $\phi$  - сглаживающая скэйлинг-функция. Нижний индекс 0 соответствует исходному разрешению данных.

Шаг 2. Для полученных компонент ряда  $f[2^{-m}t]$ ,  $m = \overline{1, M}$  выполняем идентификацию авторегрессионных моделей (процедура идентификации подробно описана в работах [12, 14]).

Шаг 3. Выполняем объединение полученных моделей в общую многокомпонентную конструкцию (модель МКМ-1), описывающую временной ход данных:

$$f_o(t) = \sum_{\mu=\overline{1, T}} \sum_{k=1, N_j^\mu} s_{j,k}^\mu b_{j,k}^\mu(t), \quad (2)$$

где  $s_{j,k}^\mu = \sum_{l=1}^{p_j^\mu} \gamma_{j,l}^\mu \omega_{j,k-l}^\mu - \sum_{n=1}^{h_j^\mu} \theta_{j,n}^\mu a_{j,k-n}^\mu$  - оценочное значение  $\mu$ -ой компоненты;  $p_j^\mu$ ,  $\gamma_{j,l}^\mu$  - порядок и параметры авторегрессии  $\mu$ -ой компоненты;  $h_j^\mu$ ,  $\theta_{j,n}^\mu$  - порядок и параметры скользящего среднего  $\mu$ -ой компоненты;  $\omega_{j,k}^\mu = \nabla^{v^\mu} \beta_{j,k}^\mu$ ;  $v^\mu$  - порядок разности  $\mu$ -ой компоненты;  $\beta_{j,k}^1 = c_{j,k}$ ,  $\beta_{j,k}^\mu = d_{j,k}$ ,  $\mu = \overline{2, T}$ ;  $T$  - количество моделируемых компонент;  $a_{j,k}^\mu$  - остаточные ошибки модели  $\mu$ -ой компоненты;  $N_j^\mu$  - длина  $\mu$ -ой компоненты;  $b_{j,k}^1 = \phi_{j,k}$  - масштабирующая функция;  $b_{j,k}^\mu = \Psi_{j,k}$ ,  $\mu = \overline{2, T}$  - вейвлет-базис  $\mu$ -ой компоненты.

В период аномального поведения параметров ионосферы произойдет изменение их структуры, и, как следствие, возрастут ошибки моделей МКМ. Поэтому процедура выделения аномалий построена на проверке следующего условия:

$$\varepsilon_\mu = \sum_{q=1}^{Q_\mu} |a_{j,k+q}^\mu| > T_\mu, \quad (3)$$

где  $Q_\mu$  - длина упреждения данных на основе модели  $\mu$ -ой компоненты;  $a_{j,k+q}^\mu = s_{j,k+q}^{\mu, fact} - s_{j,k+q}^{\mu, forecast}$  - остаточные ошибки модели  $\mu$ -ой компоненты в точке  $k+q$ ,  $T_\mu$  - пороговое значение  $\mu$ -ой компоненты, определяющее наличие аномалии.

### 2. Модель МКМ-2 временного ряда параметров ионосферы на основе вейвлетов и нейронных сетей

Шаг 1. На основе КМА (см. представление (1)) получаем сглаженную компоненту  $f[2^{-m}t]$  ряда  $f_o F2$ . Для исключения влияния краевого эффекта к исходному набору данных добавляем зеркальные отрезки (на основе зеркального отображения функции) длительностью  $2^{-m} * q$  отсчетов (размер окрестности, содержащей краевой

эффект, на масштабном уровне  $-m$  определяется по формуле  $h_{-j} = 2^{-m} * q$ , где  $q$  – размер носителя используемого вейвлета).

Шаг 2. Выполняем вейвлет-восстановление компоненты  $f[2^{-m}t]$  до исходного разрешения, удаляем зеркальные отрезки и получаем ее представление в виде:  $f_0(t) = \sum_k c_{0,k} \phi_{0,k}(t)$ .

Шаг 3. Полученный вектор коэффициентов  $\{c_{0,k}\}_{k=1}^K$ , где  $K$  – длина вектора, делим на блоки:  $\{c_{0,k}\}_{k=1}^S, \{c_{0,k}\}_{k=2}^{S+1}, \dots, \{c_{0,k}\}_{k=K-S}^K$ . Длина блока  $S = 24$  (определялась в соответствии с суточным ходом часовых данных  $f_{OF2}$ ). Используя полученные блоки, формируем нейронную сеть (процедура построения нейронной сети описана в работе [17]). Критерием качества обучения сети является:  $E_A = \left( \frac{1}{R} \sqrt{\sum_{r=1}^R e_{A,r}^2(l)} \right) < \epsilon_A$ , где  $\epsilon_A > 0$  – наперед заданное значение,  $e_{A,r}(l) = \hat{c}_{0,l}^r - c_{0,l}^r$  – ошибка решения в дискретный момент времени  $l$  с шагом упреждения  $r$ ,  $c_{0,l}^r$  – желаемое,  $\hat{c}_{0,l}^r$  – действительное выходное значение сети,  $R$  – длина выходного вектора сети. Применение нейронной сети позволяет воспроизводить характерные вариации ряда  $f_{OF2}$ . В период аномальных изменений ошибки нейронной сети возрастут, и операция их выделения может быть основана на проверке условия:  $E_A = T$ , где  $T$  – пороговое значение, определяющее наличие аномалии. В работе модели МКМ строились отдельно для каждой станции регистрации данных. Учитывая сезонные изменения хода  $f_{OF2}$ , данные за разные сезоны моделировались отдельно. Поскольку состояние ионосферы находит отражение в геомагнитном поле, с целью моделирования характерного хода  $f_{OF2}$  в оценках использовались ионосферные данные за временные интервалы относительно спокойного геомагнитного поля (интервалы, в которые суммарный за сутки К-индекс не превышает значения 18). **Для детального анализа ионосферных параметров** использовались вычислительные решения, основанные на непрерывном вейвлет-преобразовании [18]

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

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

Если в качестве  $f$  рассматривать временной ряд  $f_{OF2}$ , выделение ионосферных аномалий может быть основано на применении следующего решающего правила [12]:

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

где порог  $T_a = U * St_a$  – определяет наличие аномалии на масштабе  $a$  вблизи точки  $\xi$  содержащейся в носителе  $\Psi_{b,a}$ ,  $U$  – коэффициент порога (в работе в периоды лет с низкой солнечной активностью использовался коэффициент порога  $U = 2$ , в периоды с высокой солнечной активностью  $U = 2.5$ ),  $St_a = \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{u=1}^{\Phi} (W_{\Psi}f_{b,a} - \overline{W_{\Psi}f_{b,a}})^2}$ ,  $\overline{W_{\Psi}f_{b,a}}$  и  $W_{\Psi}f_{b,a}^{med}$  – среднее значение и медиана, определяемые в скользящем временном окне длины  $\Phi$ .

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

$$I_b = \sum_a \frac{|P_{T_a}(W_{\Psi}f_{b,a})|}{\|W_{\Psi}f_{b,a}\|_2}, \quad (5)$$

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  $a$ .

## Результаты анализа данных

В обработке использовались часовые данные параметров ионосферы ([www.ikir.ru](http://www.ikir.ru)) и данные магнитометров (<http://www.ikir.ru:8180/observ>).

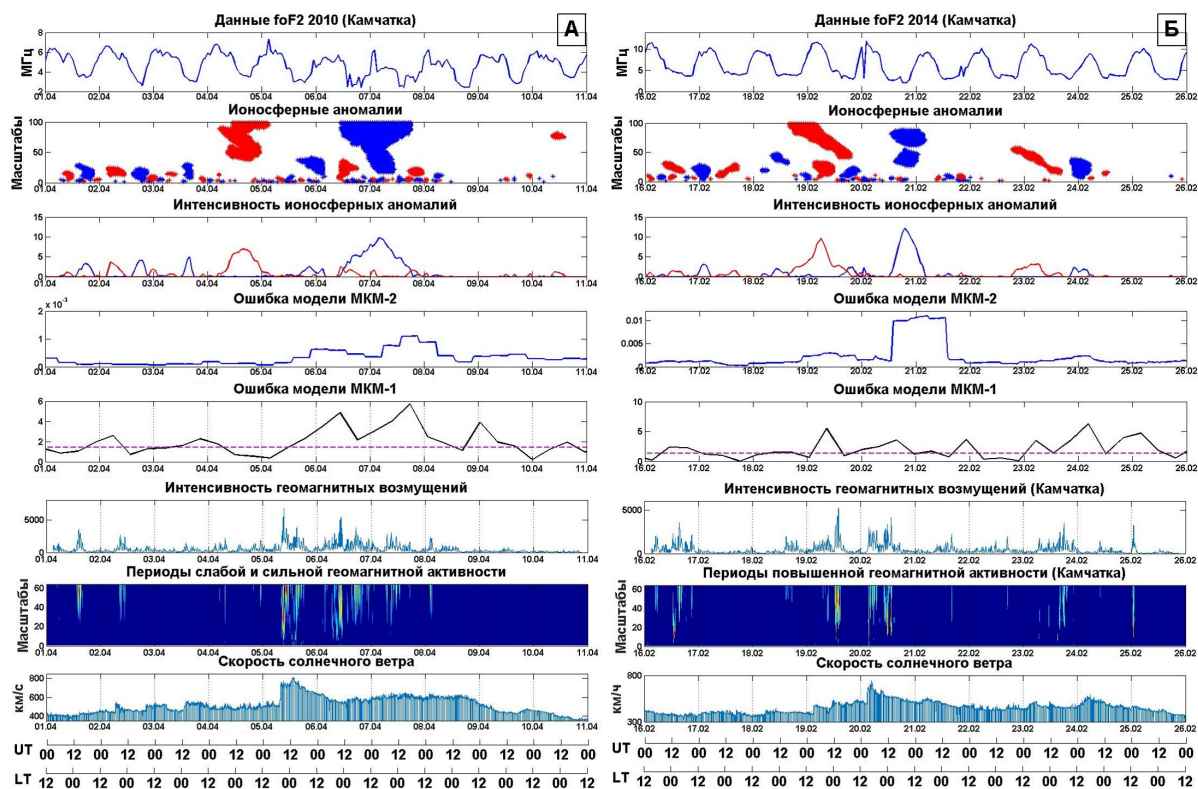


Рисунок. Результаты обработки данных за периоды: А - 01.04-10.04 2010 г.; Б - 16.02-26.02 2014г.

На рисунке показаны результаты применения описанных методов на примере событий 5-6 апреля 2010 г. и 19-20 февраля 2014 г. В анализируемый период 01.04-10.04 2010 г. (рис. А) произошла сильная магнитная буря, которая была зафиксирована на поверхности Земли в 08.26 UT как внезапное начало SC. По результатам обработки ионосферных данных 4 апреля с 05.00 UT и до момента начала магнитной бури в ионосферных параметрах наблюдались аномальные возрастания (положительная фаза ионосферной бури, показана на рис. А красным цветом). Анализ показывает, что наибольшей интенсивности ионосферные возмущения достигли в утреннее время LT. В период бури произошло существенное понижение электронной концентрации, и возникла отрицательная фаза ионосферной бури (показана на рис. А синим цветом), длительность которой составила около 30 часов. По результатам обработки магнитных данных наиболее сильные возмущения геомагнитного поля происходили 5-6 апреля в период отрицательной фазы ионосферной бури. Магнитная буря, произошедшая 19-20 февраля 2014 г., на станции Паратунка (Камчатка) была зарегистрирована 19 февраля в 12:30 UT (рис. Б). Накануне события в период с 16.00 UT 18 февраля по 19.00 UT 19 февраля в районе Камчатки в ионосферных параметрах наблюдаются аномальные возрастания (на рис. 1Б показано красным цветом). Максимальные значения интенсивности ионосферных возмущений зафиксированы

19 февраля в 06:00 UT. К концу суток 19 февраля произошло понижение электронной концентрации, и возникла отрицательная фаза ионосферной бури, которая наибольшей интенсивности достигла в период с 13.00 UT 20 февраля по 04.00 UT 21 февраля (показана на рис. Б синим цветом). В периоды аномального поведения ионосферы наблюдаются наибольшие возмущения в геомагнитном поле: 19 февраля в период с 12:30 UT по 15:30 UT и 20 февраля с 03:30 UT до 13:30 UT.

## Выводы

Анализ режима ионосферы показал, что в периоды повышенной солнечной активности в анализируемых районах могут возникать предбуревые аномальные повышения электронной плотности (более 2-х среднеквадратических отклонений относительно фона). Выделенные повышения имели длительность от нескольких часов до 1,5 суток и наблюдались одновременно на различных станциях северо-восточного сегмента России, что характеризует их крупные пространственно-временные масштабы. Выделенным ионосферным аномалиям в настоящее время уделяется особое внимание [19, 20]. Выполненный в данной работе анализ подтверждает предположение, сделанное в обзоре [20] о том, что подобные ионосферные эффекты связаны с неким каналом проникновения энергии из межпланетного пространства и магнитосферы и имеют солнечную природу. В этом случае данные эффекты могут служить сигналом о предстоящей геомагнитной буре, что важно для задач прогноза космической погоды [19, 20]. Предложенные в работе методы анализа показали их эффективность для выделения подобных эффектов. Работа поддержана грантом РФФИ № 14-11-00194. Авторы благодарят институты, поддерживающие станции регистрации ионосферных параметров и магнитные обсерватории, данные которых были использованы в исследовании.

## Список литературы

- [1] Afraimovich E. L. et al., "The use of GPS arrays in detecting the ionospheric response during rocket launchings", *Earth, Planets and Space*, **52**:11 (2000), 1061-1066.
- [2] Nakamura E., Maruyama T., Shidama Y., "Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan", *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, **56** (2000), 391-406.
- [3] Watthanasangmechai K. et al., "TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand", *Earth, Planets and Space*, **64** (2012), 473-483.
- [4] Mandrikova O. V., Glushkova N. V., Zhivet'ev I. V., "Modeling and analysis of ionospheric parameters by a combination of wavelet transform and autoregression models", *Geomagnetism and Aeronomy*, **54**:5 (2014), 638-645.
- [5] Bilitza D., Reinisc B. W., "International Reference Ioinosphere 2007: Improvements and new parameters", *Advances in space research*, **42** (2008), 599-609.
- [6] Klimenko M. V., "Numerical modeling of the global ionospheric effects of storm sequence on September 9–14, 2005–comparison with IRI model", *Earth, Planets and Space*, **64**:6 (2012), 433-440.
- [7] Oyekola O. S., Fagundes P. R., "Equatorial F2-layer variations: Comparison between F2 peak parameters at Ouagadougou with the IRI-2007 model", *Earth, Planets and Space*, **64**:6 (2012), 553-566.
- [8] Zhao X. et al., "A prediction model of short-term ionospheric foF2 based on AdaBoost", *Advances in Space Research*, **53**:3 (2012), 387-394.

- [9] Kakinami Y. et al., “Ionospheric electron content anomalies detected by a FORMOSAT-3/COSMIC empirical model before and after the Wenchuan Earthquake”, *International Journal of Remote Sensing*, **31**:13 (2010), 3571-3578.
- [10] Mandrikova O. V., et al., “Method of detection of abnormal features in ionosphere critical frequency data on the basis of wavelet transformation and neural networks combination”, *A Journal of Software Engineering and Applications*, **5**:12B (2012), 181-187.
- [11] Kato H. et al., “Development of automatic scaling software of ionospheric parameters”, *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, **56** (2009), 465-474.
- [12] Mandrikova O. V., et al., “Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere”, *Earth, Planets and Space*, **67** (2015).
- [13] Mandrikova O. V., Glushkova N. V., Polozov Yu. A., “Simulation and analysis of time variations in ionospheric parameters on the basis of wavelet transform and multicomponent models”, *Pattern Recognition and Image Analysis*, **25**:3 (2015), 470-480.
- [14] Mandrikova O. V., et al., “Ionospheric parameter modelling and anomaly discovery by combining the wavelet transform with autoregressive models”, *Annals of geophysics*, **58**:5 (2015).
- [15] Box G. E. P., Jenkins G. M., *Time Series Analysis Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco, 1970, 537 pp.
- [16] Mandrikova O. V., Solovev I. S., Zalyaev T. L., “Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data”, *Earth, Planets and Space*, **66** (2014).
- [17] Мандрикова О. В., Полозов Ю. А., “Метод выделения аномальных особенностей в данных критической частоты ионосферы на основе совмещения вейвлет-преобразования и нейронных сетей”, *Цифровая обработка сигналов*, **2** (2012), 29-35 [Mandrikova O. V., Polozov Yu. A., Metod vydeleniya anomal'nykh osobennostey v dannykh kriticheskoy chastoty ionosfery na osnove sovmeshcheniya veyvlet-preobrazovaniya i neyronnykh setey, Tsifrovaya obrabotka signalov, 2 (2012), 29-35 (in Russian)].
- [18] Mallat S., *A wavelet tour of signal processing*, Academic Press, London, 1999, 637 pp.
- [19] Buresova D., Laštovička J., “Pre-storm enhancements of foF2 above”, *Advances in Space Research*, **39** (2007), 1298–1303.
- [20] Danilov A. D., “Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances”, *Advances in Space Research*, **52**:3 (2013), 343–366.

**Для цитирования:** Мандрикова О. В., Полозов Ю. А., Соловьев И. С., Фетисова Н. В. Анализ ионосферных параметров в периоды солнечных событий и геомагнитных бурь // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2016. № 4(15). С. 49-55. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-49-55

**For citation:** Mandrikova O. V., Polozov Yu. A., Solovev I. S., Fetisova N. V. The analysis of ionospheric parameters during periods of solar events and geomagnetic storms, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2016, **15**: 4, 49-55. DOI: 10.18454/2079-6641-2016-15-4-49-55

Поступила в редакцию / Original article submitted: 08.02.2016