

Выделение и анализ ионосферных возмущений в периоды солнечных событий и геомагнитных бурь

МАНДРИКОВА О.В.¹, ПОЛОЗОВ Ю.А.^{1,2}, СОЛОВЬЕВ И.С.^{1,2}, ФЕТИСОВА Н.В.¹

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

²Камчатский государственный технический университет г. Петропавловск-Камчатский,
Россия

e-mail: oksanam1@mail.ru, up_agent@mail.ru, kamigsol@yandex.ru, nv.glushkova@yandex.ru

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 довери-

тельной вероятностью.

Анализ параметров ионосферы в работе выполнялся совместно с данными геомагнитного поля (www.ikir.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 $g[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$, $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$, Ψ - базисный вейвлет, j - разрешение, $f[2^{-m}t] = \sum_k c_{-m,n} \phi_{-m,n}(t)$, $c_{-m,n} = \langle f, \phi_{-m,n} \rangle$, ϕ - 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:

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

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 μ -ой компоненты; p_j^μ , $\gamma_{j,l}^\mu$ - порядок и параметры авторегрессии μ -ой компоненты; h_j^μ , $\theta_{j,n}^\mu$ - порядок и параметры скользящего среднего μ -ой компоненты; $\omega_{j,k}^\mu = \nabla^{\nu^\mu} \beta_{j,k}^\mu$; ν^μ - порядок разности μ -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 μ -ой компоненты; N_j^μ - длина μ -ой компоненты; $b_{j,k}^1 = \phi_{j,k}$ - масштабирующая функция; $b_{j,k}^\mu = \Psi_{j,k}$, $\mu = \overline{2, T}$ - вейвлет-базис μ -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_μ - длина упреждения данных на основе модели μ -ой компоненты; $a_{j,k+q}^\mu = s_{j,k+q}^{\mu, fact} - s_{j,k+q}^{\mu, forecast}$ - остаточные ошибки модели μ -ой компоненты в точке $k+q$, T_μ - пороговое значение μ -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_{OF2} . 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 крайовой 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: $\{c_{0,k}\}_{k=1}^S$, $\{c_{0,k}\}_{k=2}^{S+1}$, ..., $\{c_{0,k}\}_{k=K-S}^K$. 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: $E_A = \left(\frac{1}{R} \sqrt{\sum_{r=1}^R e_{A,r}^2(l)} \right) < \varepsilon_A$, где $\varepsilon_A > 0$ – 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]

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

Ψ – вейвлет, $f \in L^2(R)$, $a, b \in R$, $a \neq 0$.

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 ξ 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 Φ .

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

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

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 .

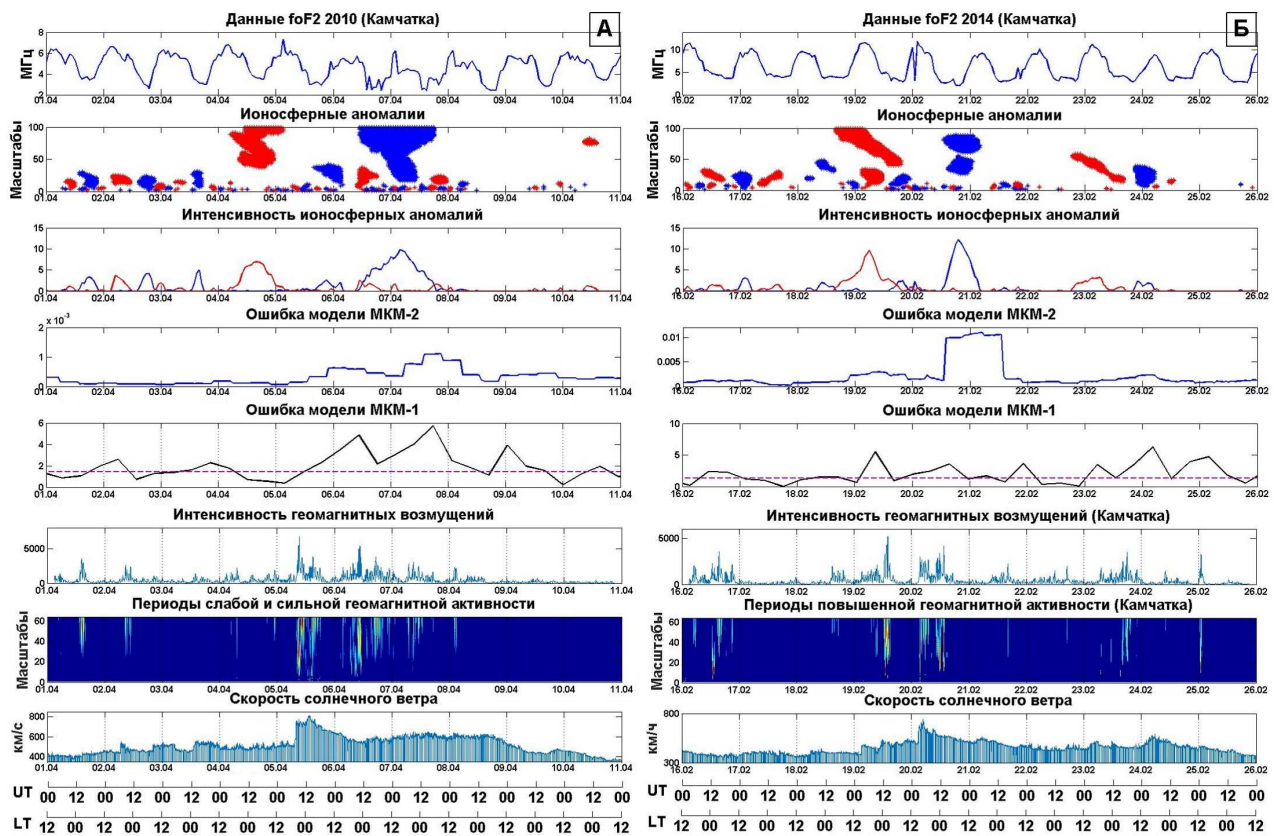


Рис. 1. Результаты обработки данных за периоды: А - 01.04-10.04 2010 г.; Б - 16.02-26.02 2014г.

Результаты анализа данных

В обработке использовались часовые данные параметров ионосферы (www.ikir.ru) и данные магнитометров (<http://www.ikir.ru:8180/observ>). На рис.1 показаны результаты применения описанных методов на примере событий 5-6 апреля 2010г. и 19-20 февраля 2014 г. В анализируемый период 01.04-10.04 2010 г. (рис. 1А) 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. 1А 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. 1А 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. 1Б). 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. 1Б 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

Применение комплексных средств позволило детально проанализировать режим ионосферы и до моментов начала магнитных бурь выделить периоды аномального повышения электронной плотности (предбуревые ионосферные повышения). Выделенные аномальные эффекты, имели длительность от нескольких часов до 1,5 суток и наблюдались на различных станциях, 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].

Работа поддержана грантом РФФ № 14-11-00194. Авторы благодарят институты, поддерживающие станции регистрации ионосферных параметров и магнитные обсерватории, данные которых были использованы в исследовании.

Литература

- [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 с.
- [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 с.
- [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.