

Алгоритм анализа параметров ионосферы и выделения ионосферных возмущений

О. В. Мандрикова¹, Ю. А. Полозов²,

Н. В. Фетисова³

Институт космических исследований и

распространения радиоволн ДВО РАН

¹oksanam1@mail.ru, ²up_agent@mail.ru,

³nv.glushkova@yandex.ru

В. В. Геппенер

Санкт-Петербургский государственный

электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

geppener@mail.ru

Аннотация. Предложена модель и алгоритм анализа параметров ионосферы, основанный на применении вейвлет-преобразования и адаптивных пороговых функций. Алгоритм позволяет в оперативном режиме выполнять обработку ионосферных данных и выделять аномалии, возникающие в периоды ионосферных бурь. Апробация алгоритма выполнена для часовых и 15-ти минутных данных вертикального зондирования ионосферы (критическая частота ионосферного слоя F2, станция регистрации «Паратунка», Камчатский край). Выполненные оценки показали высокую чувствительность алгоритма и возможность его реализации в режиме поступления регистрируемых данных.

Ключевые слова: анализ данных; вейвлеты; ионосфера

I. ВВЕДЕНИЕ

Работа направлена на развитие методов анализа ионосферных данных и выделения аномальных изменений, характеризующих возникновение ионосферных неоднородностей (ионосферных бурь [1][2]). Ионосферные бури вызывают серьезные нарушения в работе современных наземных и космических технических средств [1][3], что определяет прикладную значимость исследования. Регулярные изменения в ионосферных параметрах в настоящее время изучены и зависят от географического положения станций регистрации данных, времени суток, сезона и состояния околоземного космического пространства [1][3]. Возникновение ионосферных неоднородностей наблюдается в периоды солнечных вспышечных событий и (или) магнитных возмущений. Неоднородности характеризуются существенным изменением плотности электронов по сравнению с характерным (спокойным) уровнем [1][2]. Хотя механизмы возникновения ионосферных бурь известны (напр. [2]), оперативное их прогнозирование в настоящее время не реализовано.

Задачи анализа динамики ионосферных параметров и выделения ионосферных неоднородностей решаются большим количеством авторов [4][1][3][2][5][6][7][8][9][10]. Неоднородности в регистрируемых

ионосферных параметрах проявляются в виде аномальных изменений, имеющих различную структуру и длительность [4][11]. Эффективность существующих методов анализа данных и выделения аномальных изменений (эмпирические [6], физические [5][9] и нейросетевые [3][7][10]) зависит от наличия оперативных качественных геофизических данных, определяющих состояние околоземного космического пространства, что не всегда реализуемо [3][5][9][10]. В периоды ионосферных возмущений достоверность данных методов значительно снижается [3][11]. В работах [4][11] авторами статьи предложена новая многокомпонентная модель параметров ионосферы (МКМ), позволяющая описывать характерные изменения ионосферных параметров и выделять аномалии. Идентификация МКМ основана на совмещении кратномасштабных вейвлет-разложений (КМА) и моделей авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) и описана в работах [4][11]. В этих работах показано, что МКМ, в отличие от аналогов (эмпирическая ИРИ модель, медианный метод), позволяет адекватно описывать динамику ионосферных параметров и эффективно выделять ионосферные возмущения. В данной статье предложено развитие модели (ОМКМ) и основанный на ней алгоритм обработки ионосферных данных и выделения ионосферных возмущений. Апробация алгоритма, выполненная для часовых и 15-ти минутных данных вертикального зондирования ионосферы (критическая частота ионосферного слоя F2, станция регистрации «Паратунка», Камчатский край), показала высокую чувствительность алгоритма и возможность его реализации в оперативном режиме (по мере поступления данных регистрации).

II. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Временной ряд параметров ионосферы может быть представлен в виде ОМКМ [12]:

$$\begin{aligned} f(t) &= f_{-m^{PEI}}(t) + \sum_{j^{PEI}} g_{-j^{PEI}}(t) + \sum_{\eta} \beta_{\eta}^{\eta}(t) + e(t) = \\ &= A^{PEI} + \sum_{\eta} \beta_{\eta}^{\eta}(t) + e(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Исследования выполнены при поддержке Гранта РФФИ №14-11-00194.

$$A^{PEG} = f_{-m^{pec}}(t) + \sum_{j^{pec}} g_{-j^{pec}}(t) = \sum_k c_{-m^{pec},k} \varphi_{-m^{pec},k}(t) + \sum_{j,k} d_{-j,k} \Psi_{-j,k}(t), \quad j = -1, -m^{pec}$$

компоненты, описывают регулярные вариации параметров ионосферы, $c_{-m^{pec},k} = \langle f, \varphi_{-m^{pec},k} \rangle$, $d_{-j^{pec},k} = \langle f, \Psi_{-j^{pec},k} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты, φ – скэйлинг-функция, Ψ – базисный вейвлет, j – уровень вейвлет-разложения; $\sum_{\eta} \beta_{\omega 3M}^{\eta}(t)$ – аномальная составляющая модели, описывает ионосферные возмущения (в случае регулярных изменений данных, предполагается, что $\sum_{\eta} \beta_{\omega 3M}^{\eta}(t) = 0$), $e(t)$ – ошибки.

Регулярная составляющая временного ряда параметров ионосферы $A^{PEG}(t)$ может быть представлена в виде [11]:

$$A^{PEG}(t) = \sum_{\mu=1,T} \sum_{k=1,N_{j^{pec}}^{\mu}} s_{j^{pec},k}^{\mu} b_{j^{pec},k}^{\mu}(t) \quad (2)$$

где $s_{j^{pec},k}^{\mu} = \sum_{l=1}^{p_{j^{pec}}^{\mu}} \gamma_{j^{pec},l}^{\mu} \omega_{j^{pec},k-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{pec}}^{\mu}} \theta_{j^{pec},n}^{\mu} a_{j^{pec},k-n}^{\mu}$ – оценочное значение регулярной μ -ой компоненты; $p_{j^{pec}}^{\mu}$, $\gamma_{j^{pec},l}^{\mu}$ – порядок и параметры авторегрессии μ -ой компоненты; $h_{j^{pec}}^{\mu}$, $\theta_{j^{pec},n}^{\mu}$ – порядок и параметры скользящего среднего μ -ой компоненты; $\omega_{j^{pec},k}^{\mu} = \nabla^{\nu^{\mu}} \beta_{j^{pec},k}^{\mu}$, ν^{μ} – порядок разности μ -ой компоненты, $\beta_{j^{pec},k}^1 = c_{j^{pec},k}$, $\beta_{j^{pec},k}^{\mu} = d_{j^{pec},k}$, $\mu = \overline{2,T}$, T – количество моделируемых компонент, $a_{j^{pec},k}^{\mu}$ – остаточные ошибки модели μ -ой компоненты, $N_{j^{pec}}^{\mu}$ – длина μ -ой компоненты, $b_{j^{pec},k}^1 = \varphi_{j^{pec},k}$ – масштабирующая функция, $b_{j^{pec},k}^{\mu} = \Psi_{j^{pec},k}$, $\mu = \overline{2,T}$ – вейвлет-базис μ -ой компоненты.

В соответствии с принятой моделью (соотн. (1)) компонента, описывающая возмущения имеет вид:

$$I(t) = \sum_{\eta} \beta_{\omega 3M}^{\eta}(t) \quad (3)$$

Учитывая, что структура функции $I(t)$ подвержена изменению в случайные моменты времени, следуя работе [13], для ее идентификации предложено использовать нелинейные аппроксимирующие схемы, тогда справедливо следующее соотношение:

$$I(t) = \sum_{j,n} d_{j,n} \Psi_{j,n}(t),$$

где $\{\Psi_{j,n}(t)\}_{j,n \in Z}$ – вейвлет-базис, $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$. Или, в соответствии с принятыми обозначениями (3) получаем:

$$I(t) = \sum_{\eta} \beta_{\omega 3M}^{\eta}(t) = \sum_{\eta} \sum_n d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t)$$

где $\beta_{\omega 3M}^{\eta}(t) = \sum_n d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t)$, коэффициенты $d_{\eta,n} = \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle$.

С целью построения адаптивных аппроксимаций, следуя работе [14], приближение функции I выполняется M векторами, зависящими от ее структуры:

$$I(t) = \sum_{(\eta,n) \in P_M} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{\eta,n \notin P_M} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n} = I_M(t) + e(t) \quad \Gamma$$

де $I_M(t) = \sum_{(\eta,n) \in P_M} \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle \Psi_{\eta,n}(t)$ – проекция $I(t)$ на M векторов, индексы которых содержатся в некотором множестве P_M ; компонента $e(t) = \sum_{\eta,n \notin P_M} \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle \Psi_{\eta,n}$ –

следствие влияния шумового фактора (предполагается, что данная компонента некоррелированная и аддитивная).

На основе применения пороговых функций выделение компонент $I_M(t)$ может быть представлено в виде [14]

$$\sum_{\eta} \beta_{\omega 3M}^{\eta}(t) = I_M(t) = \begin{cases} \sum_{\eta,n} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t), & \text{если } |d_{\eta,n}| \geq T_{\eta} \\ 0, & \text{если } |d_{\eta,n}| < T_{\eta} \end{cases} \quad (4).$$

Учитывая динамику ионосферного процесса в работе предложены адаптивные пороги T_{η}^{ad} . Коэффициенты $\{d_{\eta,n}\}_{(\eta,n) \in P_M}$ в соотношении (4) приняты равными

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^+, & \text{если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \geq T_{\eta}^{ad} \\ d_{\eta,n}^-, & \text{если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \leq -T_{\eta}^{ad} \end{cases},$$

где $T_{\eta}^{ad} = U * St_{\eta}$, величина $St_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{n=1}^{\Phi} (d_{\eta,n} - \overline{d_{\eta,n}})^2}$, $\overline{d_{\eta,n}}$ и $d_{\eta,n}^{med}$ – среднее значение и медиана соответственно, которые вычисляются в скользящем окне длины Φ .

Для определения степени возмущенности ионосферы в оценках T_{η}^{ad} использовалась амплитуда вейвлет-преобразования $|d_{\eta,n}|$, которая характеризует величину отклонения функции от ее характерного уровня. Оценка интенсивности аномалий в момент времени $t=n$ определялась по формуле

$$I_n = \sum_{\eta} d_{\eta,n}, \quad \text{где } N_{\eta} - \text{длина ряда на масштабе } \eta.$$

Получаем следующий алгоритм выделения аномальных периодов в ионосфере и оценки их параметров:

1. Будем считать, что в момент времени $n = n_0$ в ионосфере возникла аномалия масштаба η_0 , если

$$|d_{n_0, n_0}| > T_{n_0}^{ad}.$$

2. Интенсивность возмущения I_{n_0, n_0} в момент времени n_0 на масштабе n_0 определим как

$$I_{n_0, n_0} = d_{n_0, n_0}.$$

3. Если $\forall n_i \in (t_1, t_2), t_2 > t_1: d_{n_0, n_i} > T_{n_0}^{ad}$ то в период времени (t_1, t_2) наблюдалось ионосферное возмущение масштаба n_0 , длительность которого определим, как

$$l_{n_0} = t_2 - t_1.$$

III. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА

При оперативной обработке регистрируемых данных на границах сигнала возникает краевой эффект [14]. В работе, для уменьшения влияния краевого эффекта, временной ряд параметров ионосферы ($f_N = \{f_n\}_{n=0, N}$) дополнялся значениями, рассчитанными с учетом его временного хода:

$$f_{N+h} = \{f_n\}_{n=N+1, N+h} = (f_1^{med}, f_2^{med}, \dots, f_h^{med}) \quad (5)$$

где $h = a \times \frac{\Omega}{2}$, Ω – размер носителя вейвлет-базиса, a – наибольший масштаб вейвлет-разложения, f_n^{med} – медианные значения, рассчитанные для каждого отсчета (с учетом суточного хода) в скользящем временном окне длины S .

На рис. 1–3 показаны примеры применения алгоритма в периоды спокойной и возмущенной геомагнитной обстановки. Анализ рис. 1 (спокойная геомагнитная обстановка) показывает существенное влияние краевого эффекта на работу алгоритма в оперативном режиме (по мере поступления данных в систему) (рис. 1а), и подтверждает эффективность применения операции (5) для его устранения (рис. 1б). Анализ рис. 2, 3 (возмущенная геомагнитная обстановка) подтверждает возможность применения алгоритма для выделения аномальных изменений в ионосфере в режиме оперативной обработки данных. В анализируемые временные интервалы (рис. 2, 3) произошли сильные магнитные бури 17 марта 2015 г. и 24 ноября 2016 г. Накануне анализируемых событий (в начале суток 16 марта UT 2015 г. и в конце суток 22 ноября UT 2016 г.) в ионосфере возникли крупномасштабные положительные аномалии, характеризующие существенное повышение электронной концентрации (аномалии показаны на рис. 2, 3 красным цветом). Результаты обработки показывают своевременное обнаружение данных аномалий: по прошествии 8 часов с момента возникновения аномалии накануне события 17 марта 2015 г. и по прошествии 15 часов с момента возникновения аномалии накануне события 24 ноября 2016 г. (см. рис. 2 г – ж и рис. 3 г – е). Интенсивность аномалии достигает значения 279 (обработка часовых данных, рис. 2в) и значения 1809 (обработка 15-мин. данных, рис. 3в), что существенно превышает

интенсивность наблюдаемых в спокойный период колебаний концентрации ионосферы (обработка часовых данных, рис. 1б). В периоды магнитных бурь также наблюдаются существенные изменения в концентрации ионосферы (отрицательные и положительные аномалии, отрицательные ионосферные аномалии показаны на рис. 2, 3 синим цветом).

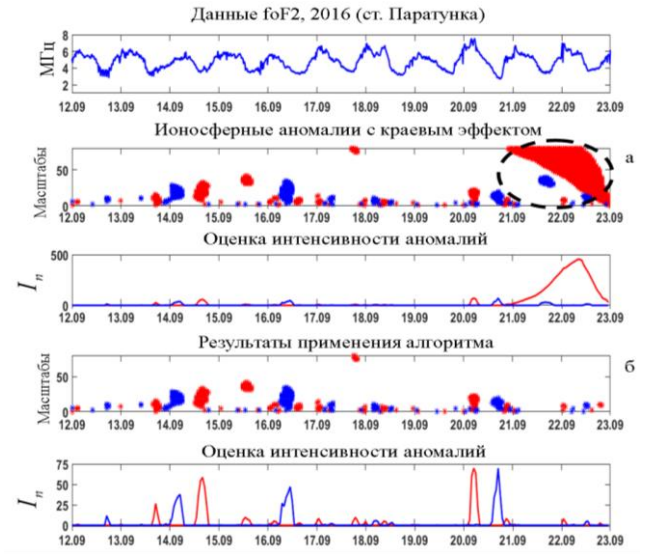


Рис. 1. Результаты обработки часовых данных foF2 за период 12-22 сентября 2016г: а – обработка данных без компенсации краевого эффекта; б – обработка данных после операции дополнения временного ряда (см. формула (5)). Черным пунктиром отмечена аномалия, возникшая вследствие влияния краевого эффекта

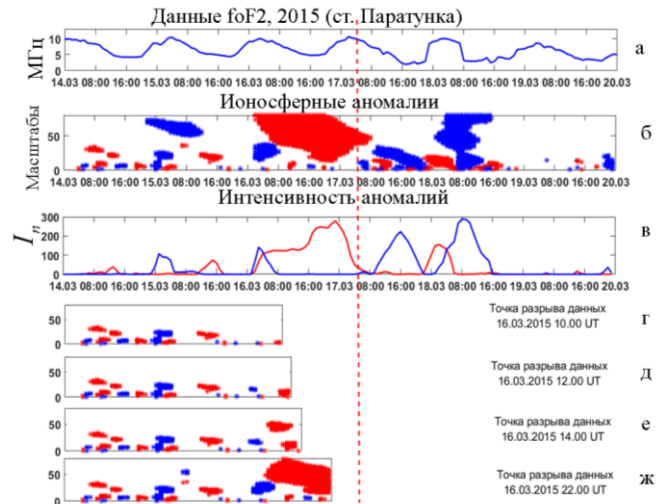


Рис. 2. Результаты обработки часовых данных foF2 за период 14-19 марта 2015г а) – данные foF2, ст. Паратунка; б) – выделенные аномалии; в) – интенсивность аномалий; г) – ж) – выделенные аномалии в периоды 10.00 – 22.00 16 марта. Красная пунктирная линия – начало магнитной бури

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НУ РБХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
- [2] Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // *Advances in Space Research*. 2013. Vol. 52(3). Pp. 343–366.
- [3] Nakamura M., 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*. 2009. Vol. 56. Pp. 391–406.
- [4] Mandrikova O.V., Fetisova (Glushkova) N.V., Al-Kasasbeh R.T., Klionskiy D.M., Geppener V.V., Ilyash M.Y. Ionospheric parameter modeling and anomaly discovery by combining the wavelet transform with autoregressive models // *Annals of Geophysics*. 2015. Vol. 58. DOI:10.4401/ag-6729.
- [5] Соломенцев Д.В., Хаттатов Б.В., Титов А.А. Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы для европейского региона // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. Т. 53. № 1. С. 78–90.
- [6] Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Advances in space research*. 2008. Vol. 42. Pp. 599–609.
- [7] Mandrikova O., Polozov Yu., Geppener V. Method of ionospheric data analysis based on a combination of wavelet transform and neural networks // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 201. Pp. 756–766. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.622
- [8] Polozov Yu., Fetisova N. Analysis of ionospheric parameters by the software system Aurora // *Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquakes Precursors*. E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 20. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/20172001009.
- [9] Ботова М.Г., Романовская Ю.В., Намгаладзе А.А. Вариации ионосферы: сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений // *Вестник МГТУ*. 2014. Т. 17. № 2. С. 385–393.
- [10] Wang R., Zhou C., Deng Z., Ni B., Zhao Z. Predicting foF2 in the China region using the neural networks improved by the genetic algorithm // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013. Vol. 92. Pp. 7–17.
- [11] Mandrikova O.V., Fetisova N.V., Polozov Y.A., Solovlev I.S., Kupriyanov M.S. Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere coupling of the high and mid latitude ionosphere and its relation to geospace dynamics // *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67(1). Pp. 131–146. DOI: 10.1186/s40623-015-0301-4.
- [12] Ionospheric anomalies during solar events in 2015–2017: features of occurrence, intensity, dynamics (according to data of the ground station network) / O.V. Mandrikova, N.V. Fetisova, Yu.A. Polozov // VI International conference «Atmosphere, Ionosphere, Safety» (AIS-2018) / Kaliningrad, 2018. (в печати).
- [13] Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Богданов В.В., Геппенер В.В. Анализ и интерпретация геофизических параметров на основе многокомпонентных моделей. Владивосток: Дальнаука, 2013. 192 с.
- [14] Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. Москва: Мир, 2005. 672 с.

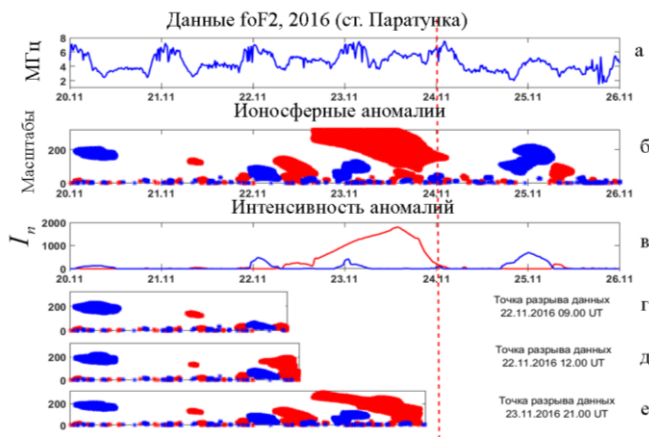


Рис. 3. Результаты обработки 15-и минутных данных foF2 за период 20-25 ноября 2016г а) – данные foF2, ст. Паратунка; б) – выделенные аномалии; в) – интенсивность аномалий; г) – е) – выделенные аномалии в периоды 09.00 22 ноября – 12.00 23 ноября. Красная пунктирная линия – начало магнитной бури

IV. ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов показали эффективность предлагаемой модели и алгоритма для задачи анализа ионосферных данных и выделения ионосферных возмущений. Апробация, выполненная для часовых и 15-ти минутных ионосферных данных, показала высокую чувствительность алгоритма и возможность его применения в оперативном режиме (по мере поступления данных в систему). Результаты представляют интерес в задачах космической погоды, реализующий алгоритм может использоваться для своевременного обнаружения ионосферных возмущений и оценки их параметров.

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Авторы выражают благодарность Российскому Научному Фонду за финансовую поддержку исследования (Проект №14-11-00194-П), а также выражают благодарность институтам, выполняющим регистрацию ионосферных данных, использованных в работе.