

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ И ОБНАРУЖЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ¹⁾

© 2021 г. О. В. Мандрикова^{1,*}, Ю. А. Полозов^{1,**}, Н. В. Фетисова^{1,***}

¹ 684034 Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7, Институт космических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН, Россия

*e-mail: oksanam1@mail.ru

** e-mail: up_agent@mail.ru

*** e-mail: nv.glushkova@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.11.2020 г.
Переработанный вариант 26.11.2020 г.
Принята к публикации 11.03.2021 г.

Предложен автоматизированный метод анализа параметров ионосферы и обнаружения ионосферных аномалий. Основу метода составляет разработанная авторами обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы. Идентификация модели основана на комплексном подходе, объединяющем методы вейвлет-преобразования с моделями авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего. Приведены оценки эффективности метода, описаны операции обнаружения ионосферных аномалий и оценки их параметров. На примере обработки параметров ионосферы (критической частоты ионосферы foF2) района Камчатки показана возможность применения метода в режиме оперативного анализа данных (по мере поступления данных в систему обработки). На основе метода обнаружены короткопериодные аномальные изменения, предшествующие магнитным бурями и характеризующие возникновение колебательных процессов в ионосфере на фоне повышенной солнечной активности. Метод реализован в системе комплексного анализа геофизических данных Аюгога. Библ. 27. Фиг. 4.

Ключевые слова: модель временного ряда, вейвлет-преобразование, авторегрессионные модели, параметры ионосферы, аномалии.

DOI: 10.31857/S0044466921070139

1. ВВЕДЕНИЕ

Работа направлена на создание автоматизированных методов анализа временных рядов параметров ионосферы и выделения ионосферных аномалий. Атмосфера Земли на высотах примерно от 60 до 1000 км называется ионосферой. Данная область сильно влияет на радиоволны и условия их распространения (см. [1]). На структуру ионосферы, а также на регулярные суточные и сезонные вариации ее параметров существенное влияние оказывают солнечная и геомагнитная активности, географические координаты (выделяют полярные и авроральные, среднеширотные и экваториальные области) (см. [1]–[4]). Вариации различных факторов в околоземном космическом пространстве (солнечные вспышечные события, колебания параметров солнечного ветра, магнитные бури и суббури) оказывают влияние на ионосферу (см. [1]–[7]). Реакция ионосферы проявляется в виде формирования ионосферных неоднородностей, причиной которых являются энергетические частицы и излучение, возникающее во время солнечных вспышек и (или) магнитосферных возмущений (см. [1]–[4]). Неоднородности (возмущения) в ионосфере представляются в виде областей с электронной концентрацией, отличной от некоторого характерного (спокойного) уровня (см. [1]–[4]). Резкое существенное изменение (повышение/понижение) электронной концентрации в возмущенные периоды называется ионосферной бурей (см. [1]–[4]). Динамика параметров ионосферы в периоды ионосферных бурь, как правило, может характеризоваться различными фазами – отрицательной (понижение электронной концентрации) и положительной (повышение электронной концентрации) (см. [1]–[3]). Простран-

¹⁾Работа выполнена в рамках ГЗ по теме “Динамика физических процессов в активных зонах ближнего космоса и геосфер” (2018–2020) № гос. регистрации АААА-А17-117080110043-4.

ственно-временное распределение ионосферных бурь является сложным и зависит от многих факторов – географического положения, уровня солнечной активности, процессов в магнитосфере и др. (см. [1]–[4]). В настоящее время механизмы возникновения и протекания ионосферных бурь достаточно изучены (см., например, [1], [2]), но их своевременное прогнозирование не реализовано (см. [1]–[9]).

Исследование ионосферы и оценка ее состояния основаны на анализе регистрируемых ионосферных параметров (критическая частота F2-слоя ионосферы (foF2), полное электронное содержание и другие параметры). Предметами исследования в работе являются анализ вариаций критической частоты ионосферы (foF2) и обнаружение аномальных изменений. Критическая частота foF2 – параметр ионосферы, характеризующий электронную концентрацию F2-слоя ионосферы, и является максимальной частотой радиоволны, отражающейся от слоя ионосферы при вертикальном падении (см. [4]). На основе метода вертикального радиозондирования выполняется регистрация данных foF2 с использованием цифрового ионозонда. После предварительной обработки данные foF2 представляются в виде временных рядов. Полученные временные ряды foF2 имеют сложную нестационарную структуру, которая формируется при воздействии солнечной активности и других факторов (координаты станций регистрации, геомагнитная активность и др.). Возникновение ионосферных бурь сопровождается аномальными изменениями различной длительности, амплитуды и вида (всплески, пики) в получаемых временных рядах foF2. Данные изменения несут информацию о динамике ионосферной бури и ее интенсивности. Аномальные изменения в ионосфере оказывают негативное влияние на работу сложных технических систем (телекоммуникационные, навигационные и радиолокационные системы (см. [8])). Ионосферные аномалии могут вызывать отказы и сбои оборудования, поэтому их своевременное обнаружение является важной прикладной задачей.

Задачи анализа ионосферных данных решаются разными научными коллективами (см. [1], [4], [10]–[19]). В работах используются подходы, основанные на нейронных сетях (см. [1], [11]–[14], [19]), традиционный метод скользящей медианы (см. [4], [15]), эмпирические модели (см. [10], [18]), физические модели (см. [16], [17]) и др. Широко используемые классические методы, основанные на процедуре сглаживания, являются недостаточно эффективными и могут вести к потере части важной информации (см. [10], [15], [20], [21]). Качество работы современных методов (например, подходы на основе нейронных сетей (см. [1], [11]–[14])), их точность и эффективность зависят от используемых оперативных данных, получаемых на основе аппаратного мониторинга (например, временные ряды солнечной и магнитной активности, межпланетного магнитного поля и др.). Качество данных, получаемых в возмущенные периоды, существенно снижается из-за повышения уровня помех и наличия пропусков в измерениях. Область применения физических моделей ограничена отсутствием информации о динамике ионосферных процессов (см. [16], [17]). Разработанный авторами гибридный подход, применяемый в работе, базируется на совместном использовании аппарата вейвлет-преобразования (см. [22]) и методов авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС, см. [23]). Впервые данный подход был предложен в [21], [24] и применялся для анализа ионосферных данных. В основе подхода лежит обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы (ОМКМ) (см. [20], [25], [26]). Важным преимуществом предлагаемого метода является возможность его полной автоматизации. В работе представлено описание процедур выделения ионосферных аномалий и оценки их параметров, а также приведены оценки эффективности метода. Предлагаемый метод был реализован в системе комплексного анализа геофизических данных Augoga (<http://lsaoperanalysis.ikir.ru/lsaoperanalysis.html>).

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

2.1. Обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы

В соответствии с [20], [21] представим временной ряд параметров ионосферы в виде

$$f(t) = A^{\text{PEГ}}(t) + U(t) + e(t) = \sum_{\mu=1, \overline{T}} \sum_j G_j^{\mu} \alpha_j^{\mu}(t) + \sum_{i, \eta} \beta_{i, \eta}^{\text{BOЗМ}}(t) + e(t), \quad (1)$$

где $A^{\text{PEГ}}(t) = \sum_{\mu=1, \overline{T}} \sum_j G_j^{\mu} \alpha_j^{\mu}(t)$ ($\mu = \overline{1, T}$ – номер компоненты) – регулярная компонента модели; составляющие $\alpha_j^{\mu}(t)$ имеют разномасштабную структуру (определяются локальными факторами

и включают сезонные вариации параметров, суточные колебания и др.); $U(t) = \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{ВОЗМ}}(t)$ – аномальная компонента модели, описывающая динамику ионосферных параметров в возмущенные периоды (колебательные процессы в периоды повышенной солнечной активности, магнитосферных возмущений и др.), в периоды спокойной ионосферы предполагается, что компонента $U(t) = 0$; $e(t)$ – шумовая составляющая.

На основе совмещения операций кратномасштабного анализа (КМА) и методов АРПСС получим параметрическое представление компоненты $A^{\text{ПЕГ}}(t)$ модели (1) (см. [20]):

$$A^{\text{ПЕГ}}(t) = \sum_{\mu=1,T} \sum_{k=1,N_{j^{\mu}}^{\text{пер}}} s_{j^{\mu},k}^{\mu} b_{j^{\mu},k}^{\mu}(t) + e(t), \tag{2}$$

где $s_{j^{\mu},k}^{\mu} = \sum_{l=1}^{p_{j^{\mu}}^{\text{пер}}} \gamma_{j^{\mu},l}^{\mu} \omega_{j^{\mu},k-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{\mu}}^{\text{пер}}} \theta_{j^{\mu},n}^{\mu} a_{j^{\mu},k-n}^{\mu}$ – оценочное значение регулярной μ -й составляющей; $p_{j^{\mu}}^{\text{пер}}, \gamma_{j^{\mu},l}^{\mu}$ – порядок и параметры авторегрессии μ -й составляющей; $\omega_{j^{\mu},k}^{\mu} = \nabla^{v^{\mu}} \delta_{j^{\mu},k}^{\mu}$; v^{μ} – порядок разности μ -й составляющей; $\delta_{-m^{\text{пер}},k}^1 = c_{-m^{\text{пер}},k}$, $\delta_{j^{\mu},k}^{\mu} = d_{j^{\mu},k}$, $\mu = \overline{2,T}$; T – количество моделируемых составляющих; $c_{-m^{\text{пер}},k} = \langle f, \phi_{-m^{\text{пер}},k} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты сглаженной составляющей КМА масштаба $m^{\text{пер}}$; $d_{j^{\mu},k} = \langle f, \Psi_{j^{\mu},k} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты детализирующих составляющих КМА масштабов j^{μ} ; $\phi_{-m^{\text{пер}},k}(t)$ – масштабирующая функция; $\Psi_{j^{\mu},k}(t)$ – вейвлет-функция; $h_{j^{\mu}}^{\mu}, \theta_{j^{\mu},n}^{\mu}$ – порядок и параметры скользящего среднего μ -й составляющей; $a_{j^{\mu},k}^{\mu}$ – остаточные ошибки модели μ -й составляющей; $b_{-m^{\text{пер}},k}^1 = \phi_{-m^{\text{пер}},k}$; $b_{j^{\mu},k}^{\mu} = \Psi_{j^{\mu},k}$, $\mu = \overline{2,T}$; $N_{j^{\mu}}^{\text{пер}}$ – длина μ -й составляющей.

Аномальная компонента $U(t)$ модели (1) включает составляющие $\beta_{i,\eta}^{\text{ВОЗМ}}(t)$, которые определяют нестационарные процессы в ионосфере, и в вейвлет-пространстве могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{ВОЗМ}}(t) &= \sum_{\eta,n} P_{1,\eta}(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{\eta,n} P_{2,\eta}(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{\eta,n} P_{3,\eta}(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t), \\ P_{1,\eta}(x) &= \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{1,\eta} \text{ или } |x| > T_{2,\eta}, \\ x, & \text{если } T_{1,\eta} < |x| \leq T_{2,\eta}, \end{cases} \\ P_{2,\eta}(x) &= \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{2,\eta} \text{ или } |x| > T_{3,\eta}, \\ x, & \text{если } T_{2,\eta} < |x| \leq T_{3,\eta}, \end{cases} \\ P_{3,\eta}(x) &= \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{3,\eta}, \\ x, & \text{если } |x| > T_{3,\eta}, \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

где $d_{\eta,n} = \langle U, \Psi_{\eta,n} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты на масштабе η ; $\{\Psi_{\eta,n}\}_{\eta,n \in \mathbb{Z}}$ – вейвлет-базис. Амплитуда вейвлет-коэффициентов $|d_{\eta,n}|$, следуя [20], [25], определена в качестве меры интенсивности для ионосферных аномалий на масштабе η (соотношение (3)). Таким образом, для определения *аномалии малой интенсивности* (класс 1) используются пороги $T_{1,\eta}$, для определения *аномалии умеренной интенсивности* (класс 2) – пороги $T_{2,\eta}$, для определения *аномалии высокой интенсивности* (класс 3) – пороги $T_{3,\eta}$.

На основе представлений (2) и (3) получаем *обобщенную многокомпонентную модель временного ряда параметров ионосферы*:

$$f(t) = A^{\text{ПЕГ}}(t) + U(t) + e(t) = \sum_{\mu=1,T} \sum_{k=1,N_{j^{\mu}}^{\text{пер}}} s_{j^{\mu},k}^{\mu} b_{j^{\mu},k}^{\mu}(t) + \sum_{i=1,3} \sum_{\eta,n} P_{i,\eta}(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t) + e(t).$$

2.2. Операции обнаружения и оценки параметров ионосферных аномалий

1. Очевидно, что вследствие аномальных изменений во временном ходе параметров ионосферы возрастут остаточные ошибки компоненты $A^{PER}(t)$ модели (см. соотношение (2)). Следовательно, обнаружение аномалий может быть основано на проверке условия (см. [20], [21])

$$\varepsilon_{j^{per}}^{\mu} = \sum_{q=1}^{Q_{\mu}} |a_{j^{per},k+q}^{\mu}| > H_{\mu,j^{per}}, \tag{4}$$

где $q \geq 1$ – шаг упреждения данных, Q_{μ} – длина упреждения данных на основе μ -й составляющей модели, $a_{j^{per},k+q}^{\mu} = s_{j^{per},k+q}^{\mu,факт} - s_{j^{per},k+q}^{\mu,модель}$, $s_{j^{per},k}^{\mu,модель} = \sum_{l=1}^{p_{j^{per}}^{\mu}} \gamma_{j^{per},l}^{\mu} \omega_{j^{per},k+q-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{per}}^{\mu}} \theta_{j^{per},n}^{\mu} a_{j^{per},k+q-n}^{\mu}$, $H_{\mu,j^{per}}$ – пороговое значение μ -й составляющей. Пороговое значение $H_{\mu,j^{per}}$, следуя [23], определено на основе оценки дисперсии остаточных ошибок модели с учетом вероятностных пределов (см. [20]):

$$H_{\mu,j^{per}}(Q_{\mu}) = u_{\xi/2} \left\{ 1 + \sum_{q=1}^{Q_{\mu}-1} (\psi_{j^{per},q}^{\mu})^2 \right\}^{1/2} \sigma_{a_{j^{per}}^{\mu}}, \tag{5}$$

где $u_{\xi/2}$ – квантиль уровня $(1 - \xi/2)$ стандартного нормального распределения; $\sigma_{a_{j^{per}}^{\mu}}^2$ – дисперсия остаточных ошибок модели μ -й составляющей; $\psi_{j^{per},q}^{\mu}$ – весовые коэффициенты модели μ -й составляющей, которые определяются из соотношения

$$\left(1 - \phi_{j^{per},1}^{\mu} B - \phi_{j^{per},2}^{\mu} B^2 - \dots - \phi_{j^{per},p_{j^{per}}^{\mu} + v^{\mu}}^{\mu} B^{p_{j^{per}}^{\mu} + v^{\mu}} \right) (1 + \psi_{j^{per},1}^{\mu} B + \psi_{j^{per},2}^{\mu} B^2 + \dots) = \left(1 - \theta_{j^{per},1}^{\mu} B - \theta_{j^{per},2}^{\mu} B^2 - \dots - \theta_{j^{per},h_{j^{per}}^{\mu}}^{\mu} B^{h_{j^{per}}^{\mu}} \right),$$

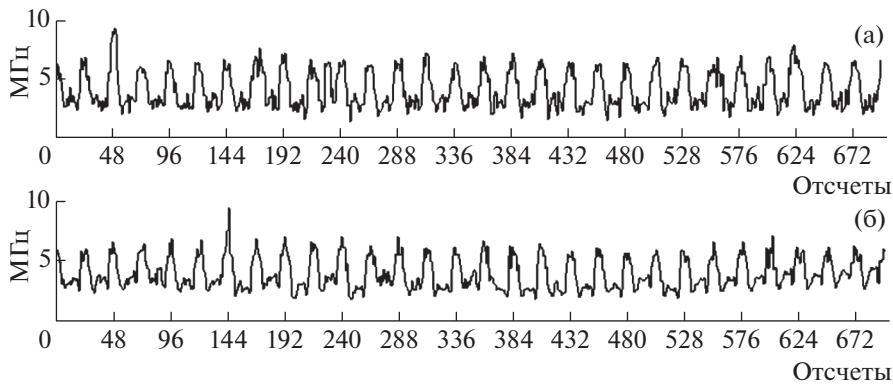
где $\phi_{j^{per},p_{j^{per}}^{\mu} + v^{\mu}}^{\mu}$ – обобщенный оператор авторегрессии: $\phi_{j^{per}}^{\mu} = \gamma_{j^{per}}^{\mu}(B)(1 - B)^{v^{\mu}}$, B – оператор сдвига назад: $B^l \omega_{j^{per},k}^{\mu}(t) = \omega_{j^{per},k-l}^{\mu}(t)$, $\psi_{j^{per},0}^{\mu} = 1$.

Поскольку амплитуда остаточной ошибки $|a_{j^{per},k}^{\mu}|$ характеризует величину отклонения текущего значения функции от ее характерного уровня, интенсивность аномалии на масштабе j^{per} может быть оценена как

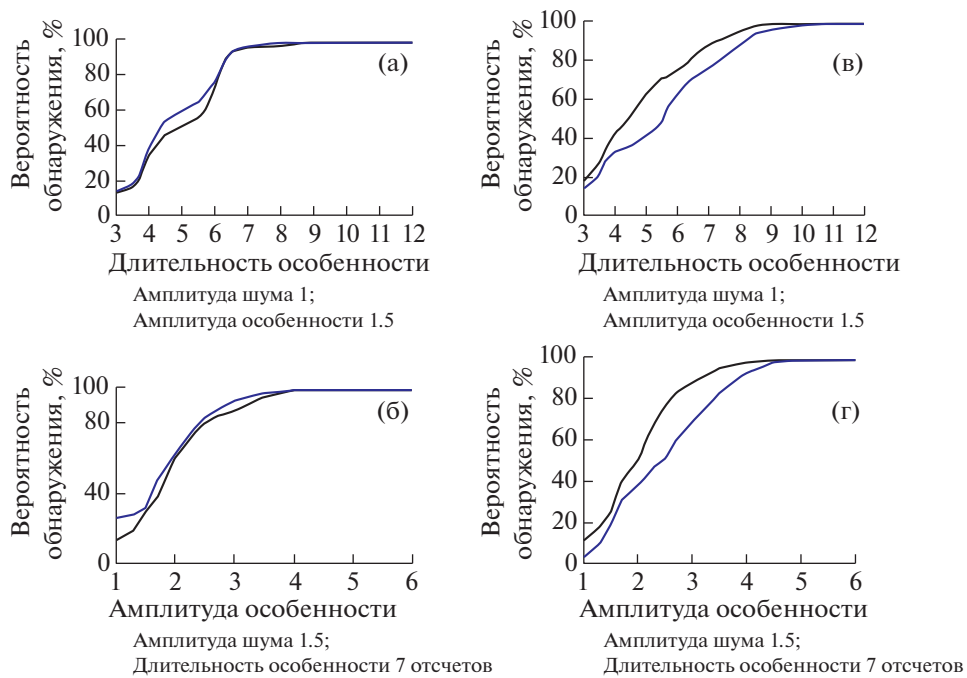
$$Y_{j^{per},k+1,k+L_{\mu}}^{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L_{\mu}} \sum_{l=1}^{L_{\mu}} (a_{j^{per},k+l}^{\mu})^2}}{H_{\mu,j^{per}}}, \tag{6}$$

где L_{μ} – длина временного окна.

Эффективность операций (4), (5) оценивалась на основе статистического моделирования. Структура модельных временных рядов соответствовала регистрируемым временным рядам параметров ионосферы и включала следующие компоненты: (1) – медианные значения данных foF2 (использовались данные, регистрируемые в периоды спокойной ионосферы при отсутствии геомагнитных возмущений и землетрясений на Камчатке с энергетическим классом $Ks > 12$); (2) – локальные особенности различного вида, длительности и амплитуды; (3) – белый шум. Использовались локальные особенности различного вида: синусоида, моделированная функцией Гаусса, прямоугольный импульс, треугольный импульс. Длительность локальных особенностей изменялась от 3 до 17 отсчетов, их амплитуда варьировалась в диапазоне 1.5–6, амплитуда белого шума – в диапазоне 0.5–3. В качестве примера на фиг. 1 представлен модельный временной ряд с шумом и локальными особенностями в виде треугольного импульса (фиг. 1а), и регистрируемые временные ряды критической частоты ионосферы (foF2) станции “Паратунка”. Оценки зависимости вероятности обнаружения локальных особенностей вида “треугольный импульс” с учетом их длительности и амплитуды представлены на фиг. 2. В соответствии со структурой временных рядов ионосферных параметров для различных сезонов и уровней активности Солнца (SA)



Фиг. 1. (а) – Модельный временной ряд; (б) – временной ряд foF2, регистрируемый на станции “Паратунка” в период с 01.01.2011 по 30.01.2011.



Фиг. 2. Графики вероятностей обнаружения локальных особенностей в зависимости от их амплитуды и длительности (низкая СА показана черным цветом, высокая СА – синим): (а), (б) – зимний сезон; (в), (г) – летний сезон.

оценки выполнялись отдельно. Анализ фиг. 2 показывает, что метод позволяет выделять локальные особенности, имеющие длительность не менее семи отсчетов для зимнего сезона (сигнал/шум = 2) и от девяти отсчетов и более для летнего сезона с вероятностью от 93%. Данный результат показывает высокую эффективность метода для выделения аномальных изменений в ионосфере, связанных с возникновением ионосферных бурь.

2. Составляющие $\beta_{i,\eta}^{возм}(t)$ аномальной компоненты $U(t)$ (см. соотношение (3)) являются случайными функциями, поэтому для их идентификации логично применить адаптивные пороги $P_{i,\eta}^{ад}, i = \overline{1,3}$, и коэффициенты $d_{\eta,n}$ в соотношении (3) принять равными

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^{1+}, & \text{если } P_{1,\eta}^{ад} < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \leq P_{2,\eta}^{ад}, \\ 0, & \text{если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| < P_{1,\eta}^{ад} \text{ или } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| > P_{2,\eta}^{ад}, \\ d_{\eta,n}^{1-}, & \text{если } -P_{2,\eta}^{ад} \leq (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) < -P_{1,\eta}^{ад}, \end{cases}$$

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^{2+}, & \text{если } P_{2,\eta}^{\text{ад}} < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) \leq P_{3,\eta}^{\text{ад}}, \\ 0, & \text{если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}| < P_{2,\eta}^{\text{ад}} \text{ или } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}| > P_{3,\eta}^{\text{ад}}, \\ d_{\eta,n}^{2-}, & \text{если } -P_{3,\eta}^{\text{ад}} \leq (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) < -P_{2,\eta}^{\text{ад}}, \end{cases} \quad (7)$$

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^{3+}, & \text{если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) > P_{3,\eta}^{\text{ад}}, \\ 0, & \text{если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}| < P_{3,\eta}^{\text{ад}}, \\ d_{\eta,n}^{3-}, & \text{если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{\text{med}}) < -P_{3,\eta}^{\text{ад}}, \end{cases}$$

где $P_{i,\eta}^{\text{ад}} = V_i St_\eta$, V_i – пороговый коэффициент, 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 $d_{\eta,n}^{\text{med}}$ – среднее значение и медианное значение соответственно. Значения с учетом суточного хода ионосферных данных вычисляются на основе скользящего временного окна, имеющего длительность Φ . Положительные аномалии класса i определяются на основе вейвлет-коэффициентов $d_{\eta,n}^{i+}$, отрицательные аномалии класса i определяются на основе вейвлет-коэффициентов $d_{\eta,n}^{i-}$.

Для различных классов i оценку интенсивности положительных ($J^+(n)$) и отрицательных ($J^-(n)$) аномалий в момент времени $t = n$ можно определить по формуле

$$J^{i+(-)}(n) = \sum_{\eta} |d_{\eta,n}^{i+(-)}|, \quad (8)$$

а общую интенсивность положительных ($J^+(n)$) и отрицательных ($J^-(n)$) аномалий по формуле

$$J^{+(-)}(n) = \sum_{\eta} |d_{\eta,n}^{+(-)}|. \quad (9)$$

Для оценки адаптивных порогов $P_{i,\eta}^{\text{ад}}, i = \overline{1,3}$, минимизировался апостериорный риск (см. [27]). Пороги разбивают пространство значений X анализируемой функции на четыре непесекающиеся области $X_i, i = \overline{0,3}$. В таком случае *правило выбора решения* устанавливает соответствие между решениями о наличии/отсутствии аномалии класса i и областями. В соответствии с [27], используя *правило выбора решения* для заданного состояния h_j^i (характеризует наличие/отсутствие аномалии класса i), определим среднюю величину потерь в виде

$$R_j^i(x) = \sum_{l=0}^3 \Pi_{il} P\{x \in X_l / h_j^i\},$$

где Π_{il} – функция потерь, $P\{x \in X_l / h_j^i\}$ – условная вероятность попадания выборки в область X_l , если в действительности имеет место состояние $h_j^i, i \neq l$, где i, l – индексы состояний (знак “/” означает условную вероятность).

Путем усреднения условной функции риска по всем состояниям h_j^i найдем *средний риск* в виде

$$R = \sum_{i=0}^3 p_i R_j^i,$$

где p_i – априорная вероятность состояния h_j^i .

Наилучшим правилом будет такое, для которого средний риск будет наименьшим (байесовский риск, см. [27]). Учитывая, что априорное распределение состояний p_i нам не известно, для выбора *наилучшего правила* будем использовать *апостериорный риск*. Апостериорные вероятности $P\{h_j^i / x\}$ в этом случае позволяют получить наиболее полную характеристику состояний h_j^i при

располагаемых априорных данных. Для простой функции потерь $\Pi_{il} = \begin{cases} 1, & i \neq l \\ 0, & i = l \end{cases}$ апостериорный риск $R_l(x)$ равен

$$R_l(x) = \sum_{i \neq l} P\{h_j^i / x \in X_l\}.$$

В этом случае критерием качества выбора решения является критерий наименьшей частоты ошибок. Пороги $P_{i,\eta}^{\text{ад}}, i = \overline{1,3}$, определяются наилучшим правилом выбора решения, обеспечивающим наименьшее значение апостериорного риска $R_l(x)$. Оценки выполнялись отдельно для периодов высокой и низкой активности Солнца. При формировании классов также учитывались следующие особенности ионосферных данных.

1. *Аномалии малой интенсивности* (класс 1) характеризуют возникновение короткопериодных аномальных особенностей малой амплитуды ($J^{+(-)}(n)$ в диапазоне 400–600 для района Камчатки). Для формирования класса и оценки порогового коэффициента V_1 использовались данные foF2 района Камчатки, регистрируемые в периоды спокойного геомагнитного поля (К-индекс < 3).

2. *Аномалии умеренной интенсивности* (класс 2) характеризуют возникновение короткопериодных аномальных особенностей средней амплитуды (для района Камчатки $J^{+(-)}(n) > 600$ и $J^{+(-)}(n) \leq 1100$). Для формирования класса и оценки порогового коэффициента V_2 использовались данные foF2 района Камчатки, регистрируемые в периоды слабозмущенного геомагнитного поля (К-индекс имел значения в диапазоне 3–4).

3. *Аномалии высокой интенсивности* (класс 3) характеризуют возникновение короткопериодных аномальных особенностей большой амплитуды ($J^{+(-)}(n) > 1100$ для района Камчатки). Для формирования класса и оценки порогового коэффициента V_3 использовались данные foF2 района Камчатки, регистрируемые в периоды возмущенного геомагнитного поля (К-индекс имел значения в диапазоне 5–8).

2.3. Моделирование и анализ ионосферных данных в периоды магнитных бурь

В работе при моделировании использовались 15-мин и часовые данные критической частоты ионосферы foF2, полученные на станции регистрации “Паратунка” (53.0° с.ш.; 158.7° в.д., п-ов Камчатка, ИКИР ДВО РАН). Выбирались данные в периоды спокойных геомагнитных условий (суммарное суточное значение К-индекса ≤ 20 , максимальные значения К-индекса ≤ 4) и не содержащие сильных землетрясений (энергетический класс $K_s \geq 12$, <http://sdis.emsd.ru/main.php>). Учитывая, что ионосферные временные ряды содержат пропуски, возникающие в силу физических (например, возникновение спорадического E-слоя) и технических причин, в оценках использовались данные за периоды с наименьшим количеством пропусков – от 1 до 6%. Пропуски заполнялись на основе медианных значений, полученных с учетом суточного хода ионосферных параметров. Для операций кратномасштабного анализа (КМА) использовался вейвлет-базис Добеши порядка 3, который был определен с помощью процедуры минимизации погрешности при выполнении аппроксимации функции (см. [20]). Использовались часовые данные foF2 за период с 1968 по 2013 г. и 15-мин данные foF2 за период 2015–2018 гг. Для каждого сезона выполнялась отдельная оценка параметров моделей (см. [20]).

Для часовых данных foF2 получена модель вида

$$f(t) = \sum_{\mu=1,2} \sum_{k=1, N_{-3}^{\mu}} s_{-3,k}^{\mu} b_{-3,k}^{\mu}(t) + \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{БОЗМ}}(t) + e(t),$$

где для зимнего сезона:

$$s_{-3,k}^1 = -0.6\omega_{-3,k-1}^1 - 0.6\omega_{-3,k-2}^1 + 0.4\omega_{-3,k-3}^1 + a_{-3,k}^1,$$

$$s_{-3,k}^2 = -0.97\omega_{-3,k-1}^2 - 0.93\omega_{-3,k-2}^2 + a_{-3,k}^2,$$

для летнего сезона высокой СА:

$$\begin{aligned}s_{-3,k}^1 &= -0.5\omega_{-3,k-1}^1 - 0.6\omega_{-3,k-2}^1 + a_{-3,k}^1, \\ s_{-3,k}^2 &= -0.9\omega_{-3,k-1}^2 - 0.8\omega_{-3,k-2}^2 + a_{-3,k}^2,\end{aligned}$$

для летнего сезона низкой СА:

$$\begin{aligned}s_{-3,k}^1 &= -0.8\omega_{-3,k-1}^1 - 0.7\omega_{-3,k-2}^1 + a_{-3,k}^1, \\ s_{-3,k}^2 &= -0.9\omega_{-3,k-1}^2 - 0.9\omega_{-3,k-2}^2 + a_{-3,k}^2.\end{aligned}$$

При оценке порогов $H_{\mu,-3}$, определяющих периоды возникновения ионосферных аномалий (см. соотношения (4), (5)), использовались шаг упреждения $q = 1$ и доверительная вероятность 70%, $H_{\mu,-3}$ приняты равными:

– для зимнего сезона высокой (низкой) СА $H_{1,-3} = 1.4$ ($H_{1,-3} = 1.2$) – для сглаженной компоненты $f_{-3}(t)$; $H_{2,-3} = 0.97$ ($H_{2,-3} = 0.7$) – для детализирующей компоненты $g_{-3}(t)$;

– для летнего сезона высокой (низкой) СА $H_{1,-3} = 1.6$ ($H_{1,-3} = 1.3$) – для сглаженной компоненты $f_{-3}(t)$; $H_{2,-3} = 0.9$ ($H_{2,-3} = 0.8$) – для детализирующей компоненты $g_{-3}(t)$.

Для 15-мин данных foF2 получена модель вида

$$f(t) = \sum_{\mu=1,2} \sum_{k=1, N_{5}^{\mu}} s_{-5,k}^{\mu} b_{-5,k}^{\mu}(t) + \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{ВОЗМ}}(t) + e(t),$$

где для летнего сезона низкой СА:

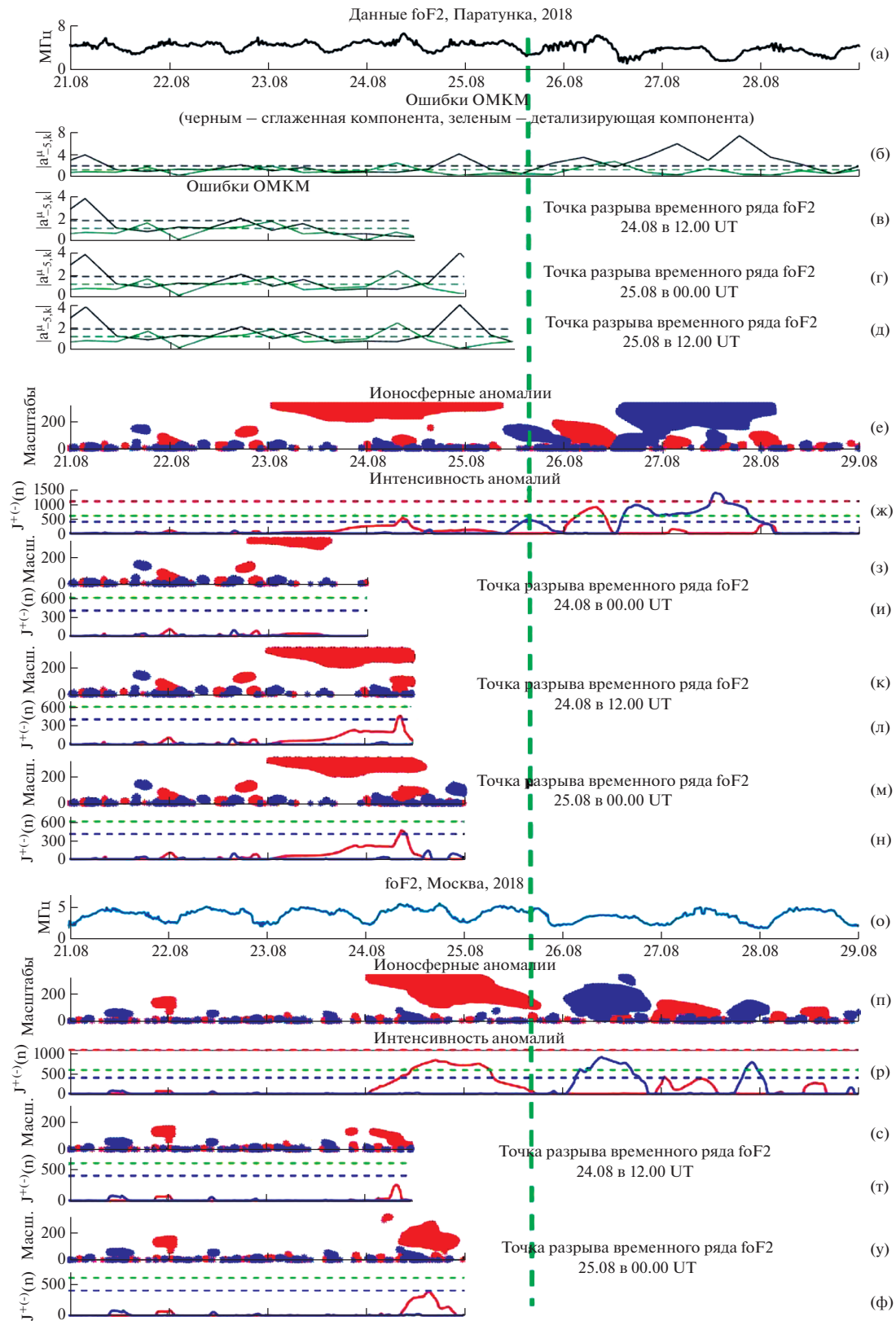
$$\begin{aligned}s_{-5,k}^1 &= -0.9\omega_{-5,k-1}^1 - 0.9\omega_{-5,k-2}^1 + a_{-5,k}^1, \\ s_{-5,k}^2 &= 0.4 - 0.3\omega_{-5,k-1}^2 - 0.3\omega_{-5,k-2}^2 + 0.5\omega_{-5,k-3}^2 + a_{-5,k}^2,\end{aligned}$$

для зимнего сезона низкой СА:

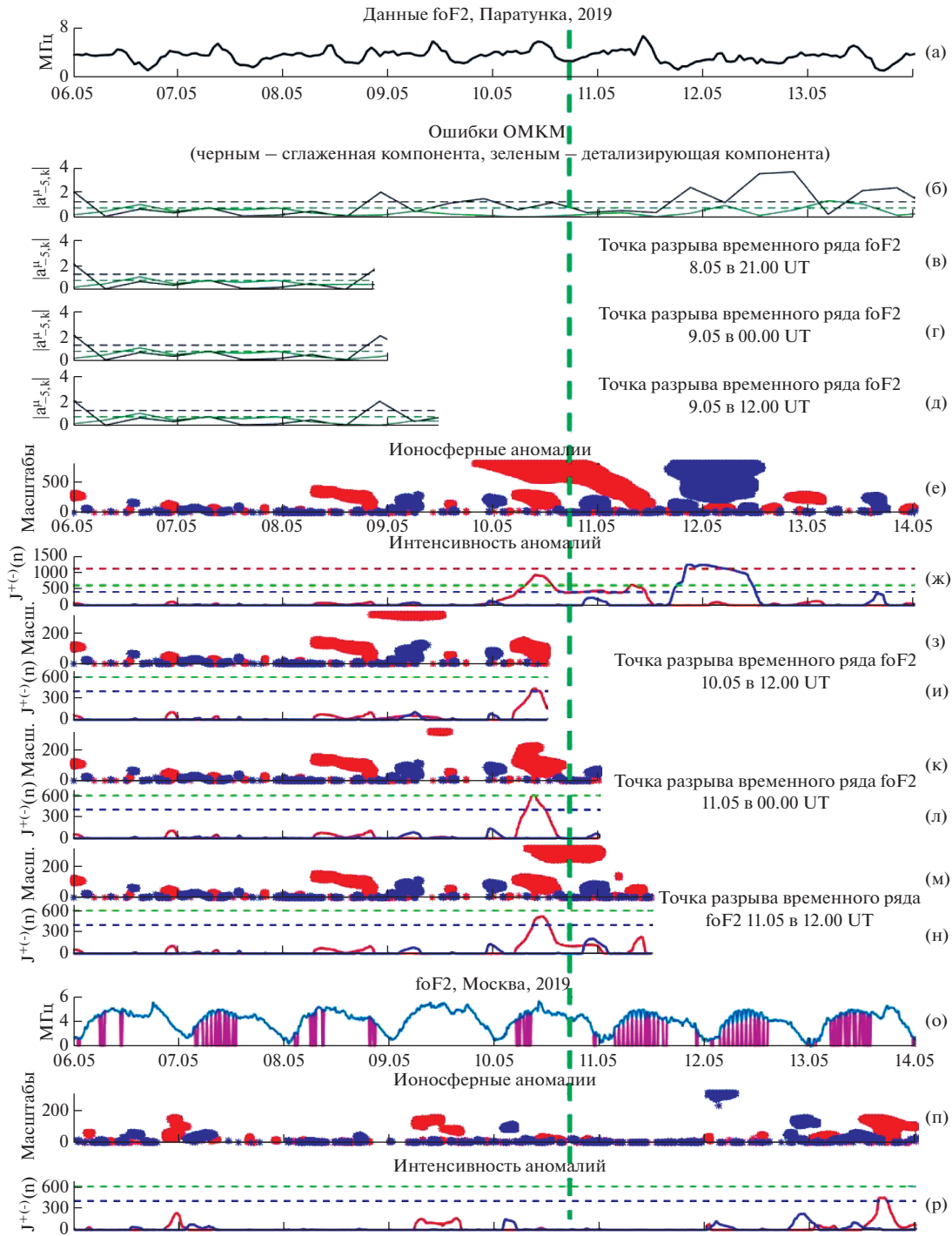
$$\begin{aligned}s_{-5,k}^1 &= -0.6\omega_{-5,k-1}^1 - 0.6\omega_{-5,k-2}^1 + 0.4\omega_{-5,k-3}^1 + a_{-5,k}^1, \\ s_{-5,k}^2 &= -0.5\omega_{-5,k-1}^2 - 0.4\omega_{-5,k-2}^2 + 0.5\omega_{-5,k-3}^2 + a_{-5,k}^2.\end{aligned}$$

При оценке порогов $H_{\mu,-5}$ (соотношения (4), (5)) использовались шаг упреждения $q = 1$ и доверительная вероятность 70%. Для летнего сезона низкой СА пороги приняты равными $H_{1,-5} = 1.8$ – для сглаженной компоненты $f_{-5}(t)$; $H_{2,-5} = 1.1$ – для детализирующей компоненты $g_{-5}(t)$.

Результаты применения метода в период сильной магнитной бури 25–26 августа 2018 г. (фиг. 3) показывают возникновение длительных положительных ионосферных аномалий слабой интенсивности (класс 1) с максимумом на станции “Паратунка” около 10.00 UT 24 августа и на станции “Москва” – около 16.00 UT. Во время бури в ионосфере наблюдаются колебательные процессы, ошибки моделирования превысили 70% доверительный интервал (фиг. 3б). Далее 26 августа на восстановительной фазе магнитной бури ионосферные аномалии достигли наибольшей интенсивности (класс 3, фиг. 3е, ж, п, р), длительность отрицательной ионосферной бури на станции “Паратунка” составляла около 35 ч и на станции “Москва” – около 18 ч. В этот период результаты моделирования (фиг. 3б) показывают возникновение длительной ионосферной бури, о чем свидетельствуют существенные изменения во временном ходе foF2 – превышение ошибок сглаженной компоненты $f_{-3}(t)$ модели составило 3 СКО. По результатам исследования (см. [25]) в период анализируемого события наблюдается характерная динамика параметров ионосферы в возмущенный период – накануне магнитной бури на станциях возникли положительные ионосферные аномалии слабой интенсивности (незначительное повышение электронной концентрации ионосферы относительно фонового уровня), в период начальной фазы магнитной бури электронная концентрация ионосферы оставалась повышенной, в период восстановительной фазы электронная концентрация существенно понижалась и возникли интенсивные ионосферные бури. Анализ результатов последовательной обработки ионосферных данных (фиг. 3в–д, з–н, с–ф) подтверждает эффективность применения предлагаемого метода для обнаружения ионосферных аномалий в оперативном режиме. Положительная аномалия, обнаруженная накануне магнитной бури, превысила по интенсивности пороговое значение на стан-



Фиг. 3. Результаты анализа 15-мин данных foF2 станций “Паратунка” (Камчатский край) и “Москва” в период магнитной бури 25–26 августа 2018 г. (начало события отмечено вертикальной штриховой линией). Горизонтальными штриховыми линиями на (б)–(д) показаны пороги: черным – $H_{1,-5}$, зеленым – $H_{2,-5}$; на (ж), (и), (л), (н), (р), (т), (ф) показаны границы интенсивности $J^{+(-)}(n)$: красным – высокая, зеленым – умеренная, синим – малая.



Фиг. 4. Результаты анализа данных foF2 станций “Паратунка” (Камчатский край) и “Москва” в период магнитной бури 10–11 мая 2019 г. (начало события отмечено вертикальной штриховой линией). Горизонтальными штриховыми линиями на (б)–(д) показаны пороги: черным – H_{1-5} , зеленым – H_{2-5} ; на (ж), (и), (л), (н), (р) – границы интенсивности $J^{+(-)}(n)$: красным – высокая, зеленым – умеренная, синим – малая.

ции “Паратунка” 24 августа в 09.00 UT, а на станции “Москва” приблизилась к пороговому значению на 7 ч позже.

Результаты применения метода в период магнитной бури 10–11 мая 2019 г. представлены на фиг. 4. Результаты моделирования (фиг. 4б) показывают, что 9 мая в период увеличения ССВ на-

блюдаются аномальные изменения во временном ходе foF2 – превышение ошибок сглаженной компоненты $f_{-3}(t)$ модели составило 1.6 СКО. Анализ ионосферных данных станции “Паратунка” (фиг. 4е,ж) показывает возникновение за несколько часов до начала события положительной аномалии умеренной интенсивности (класс 2) с максимумом около 11.00 UT 10 мая и длительностью около 28 ч. Результаты последовательной обработки данных (фиг. 4з–н) показывают, что интенсивность положительной аномалии на станции “Паратунка” превысила пороговое значение за 7 ч до начала магнитной бури. На восстановительной фазе магнитной бури электронная концентрация в ионосфере существенно понизилась, что привело к возникновению отрицательной ионосферной бури высокой интенсивности (класс 3) длительностью около 18 ч. По результатам моделирования (фиг. 4б) этот период сопровождался существенными изменениями временного хода данных foF2 – превышение ошибок составило более 3 СКО для компоненты $f_{-3}(t)$ модели и 1.7 СКО для компоненты $g_{-3}(t)$ модели. На станции “Москва”, вследствие наличия длительных пропусков в данных (пропуски отмечены вертикальными линиями на фиг. 4о, которые могут возникать при автоматическом распознавании ионограмм), наблюдаемых как накануне, так и в период анализируемого события, достоверность результатов низкая и не подлежала анализу.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод моделирования и анализа параметров ионосферы позволяет определять регулярные составляющие временного ряда и обнаруживать аномальные изменения разной амплитуды и длительности. Оценки показали высокую чувствительность метода и возможность его применения в режиме оперативного анализа данных (по мере поступления данных в систему обработки). На примере обработки критической частоты ионосферы foF2 для районов Камчатки и Москвы показана эффективность метода в задачах обнаружения ионосферных аномалий, предшествующих и сопутствующих периодам магнитных бурь. Уровень ионосферных возмущений оценивался на основе введенных классов (аномалии малой, умеренной и высокой интенсивностей). На основе метода подтверждена возможность возникновения короткопериодных аномалий слабой и умеренной интенсивности, предшествующих сильным магнитным бурям и характеризующим возникновение колебательных процессов в ионосфере на фоне повышенной солнечной активности. Метод имеет прикладную значимость в задачах прогноза космической погоды и предсказания магнитных бурь. Реализация метода выполнена в системе комплексного анализа геофизических данных Aurora (<http://lsaoperanalysis.ikir.ru/lsaoperanalysis.html>).

Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим регистрацию ионосферных данных, которые использовались в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan // J. Nation. Inst. Inform. and Comm. Technology. 2009. V. 56. № 3. P. 391–406.
2. Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Adv. Space Res. 2013. V. 52. № 3. P. 343–366.
3. Danilov A.D. F-2 region response to geomagnetic disturbances // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2001. V. 63. № 2. P. 441–449.
4. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НУ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
5. Liu L., Wan W., Zhang M.L., Zhao B. Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms // Annales Geophysicae. 2008. V. 26. № 4. P. 893–903. <https://doi.org/10.1134/S1990793115050206>
6. Liu L., Wan W., Zhang M.L., Zhao B., Ning B. Prestorm enhancements in NmF2 and total electron content at low latitudes // J. Geophys. Res. 2008. V. 113(A02311). P. 1–12.
7. Saranya P.L., Venkatesh K., Prasad D.S.V.V.D., Rama Rao P.V.S., Niranjana K. Pre-storm behaviour of NmF2 and TEC (GPS) over equatorial and low latitude stations in the Indian sector // Adv. Space Res. 2011. V. 48. № 2. P. 207–217.
8. Chernogor L.F., Rozumenko V.T. Earth–Atmosphere–Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Phys. and Radio Astron. 2008. V. 13. № 2. P. 120–137.
9. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Rakhmatulin R.A., Parkhomov V. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick’s Day magnetic storms of 2013 and 2015

- and on 8–9 March 2008: Prediction of ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. № 2. P. 2398–2423.
10. *Bilitza D., Reinisch B.W.* International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Adv. Space Res.* 2008. V. 42. P. 599–609.
 11. *Wathanasangmechai K., Supnithi P., Lerkvaranyu S., Tsugawa T., Nagatsuma T., Maruyama T.* TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand // *Earth, Planets and Space.* 2012. V. 64. № 6. P. 473–483.
 12. *Zhao X., Ning B., Liu L., Song G.* A prediction model of short-term ionospheric foF2 based on AdaBoost // *Adv. Space Res.* V. 53. № 3. P. 387–394.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.001.2014>
 13. *Sai Gowtam V., Tulasi Ram S.* An artificial neural network-based ionospheric model to predict NmF2 and hmF2 using long-term data set of FORMOSAT-3/COSMIC Radio Occultation. Observations: preliminary results // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024795>
 14. *Tebabal A., Radicella S.M., Nigussie M., Damtie B., Nava B., Yizengaw E.* Local TEC modelling and forecasting using neural networks // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* 2018. V. 172. P. 143–151.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.004>
 15. *Mikhailov A., Morena B., Miro G., Marin D.* A method for foF2 monitoring over Spain using the El Arenosillo digisonde current observations // *Annals of Geophys.* 1999. V. 42. № 4.
<https://doi.org/10.4401/ag-3748>
 16. *Solomentsev D.V., Titov A.A., Khattatov B.V.* Three-dimensional assimilation model of the ionosphere for the European region // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013. V. 53. № 1. P. 73–84.
<https://doi.org/10.1134/S0016793212060114>
 17. *Knyazeva M.A., Namgaladze A.A., Beloushko K.E.* Field-aligned currents influence on the ionospheric electric fields: modification of the upper atmosphere model // *Russ. J. Phys. Chemistry.* 2015. V. 9. № 5. P. 758–763.
<https://doi.org/10.1134/S1990793115050206>
 18. *Shubin V.N., Karpachev A.T., Telegin V.A., Tchybulya K.G.* Global model SMF2 of the F2-layer maximum height // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2015. V. 55. № 5. P. 609–622.
<https://doi.org/10.1134/S001679321505014X>
 19. *Song R., Zhang X., Zhou Ch., Liu J., He J.* Prediction TEC in China based on the neural networks optimized by genetic algorithm // *Adv. Space Res.* 2018. V. 62. № 4.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.03.043>
 20. *Mandrikova O.V., Fetisova N.V., Polozov Y.A., Solovev 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. V. 67. № 1. P. 131–146.
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0301-4>
 21. *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 Geophys.* 2015. V. 58. № 5.
<https://doi.org/10.4401/ag-6729>
 22. *Mallat S.* A wavelet tour of signal processing. 3rd Ed. London: Acad. Press, 2008. 832 p.
 23. *Box G., Jenkins G.* Time series analysis: Forecasting and control. San Francisco: Holden Day, 1970. 553 p.
 24. *Mandrikova O.V., Glushkova N.V., Zhiver'ev I.V.* Modeling and analysis of ionospheric parameters by a combination of wavelet transform and autoregressive models // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014. V. 54. № 5. P. 593–600.
<https://doi.org/10.1134/S0016793214050107>
 25. *Mandrikova O., Polozov Yu., Fetisova N., Zalyaev T.* Analysis of the dynamics of ionospheric parameters during periods of increased solar activity and magnetic storms // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* 2018. V. 181. P. 116–126.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.019>
 26. *Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Yu.* Method of ionospheric parameter analysis in the problems of real-time data processing // *J. Phys.: Conf. Ser. by IOP Publ.* 2018. V. 1096(012091).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012091>
 27. *Левин Б.П.* Теоретические основы статистической радиотехники. Изд. 2-е. М.: Советское радио, 1975. 392 с.