

Автоматизированный метод обнаружения ионосферных возмущений

О.В. Мандрикова¹, Н.В. Фетисова¹

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

Аннотация. Предложен автоматизированный метод анализа параметров ионосферы и обнаружения ионосферных возмущений. Основу метода составляет разработанная авторами обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы (ОМКМ). Модель описывает регулярные вариации параметров ионосферы и аномальные изменения разной длительности и интенсивности. В работе описаны операции обнаружения ионосферных аномалий, приведены оценки эффективности метода. На примере обработки данных критической частоты ионосферы (foF2) района Камчатки показана возможность применения метода в оперативном режиме. Метод реализован в системе комплексного анализа геофизических данных Aurora (<http://Isaoperanalysis.ikir.ru/Isaoperanalysis.html>).

1. Введение

Работа направлена на создание автоматизированных методов анализа данных ионосферы и обнаружения ионосферных возмущений. Ионосфера чутко реагирует на изменения в околоземном космическом пространстве (корональные выбросы и вспышки на Солнце, изменения параметров солнечного ветра, магнитные бури и суббури) [1, 7, 9, 10, 18]. В возмущенные периоды в ионосфере возникают аномальные процессы – существенные повышения и понижения электронной концентрации, характеризующие возникновение ионосферных бурь [7, 18]. Ионосферные бури оказывают существенное негативное влияние на работу современных технических систем (системы теле-, радио- и спутниковой связи, космического позиционирования GPS, ГЛОНАСС, а также электрические сети, трубопроводы и др.) и могут привести к сбоям и повреждениям оборудования (например, [6]). Поэтому своевременное обнаружение ионосферных аномалий имеет важное прикладное значение. Хотя механизмы возникновения ионосферных бурь известны (например, [7]), оперативное обнаружение и прогнозирование ионосферных возмущений в настоящее время не реализовано [8, 18].

Задачи анализа ионосферных данных решаются большим количеством авторов [4, 9, 17, 18-23]. Среди основных подходов можно выделить традиционные усредняющие методы (например, [17]), физические модели [9, 21], эмпирические модели [4, 20], нейросетевые методы [18, 19, 21-23] и др. Традиционные усредняющие методы приводят к потере части важной информации и не являются достаточно эффективными [4, 17]. Эффективность современных методов (например, нейросетевые [18, 19, 21-23]) зависит от оперативных данных геофизического мониторинга (используются индексы магнитной и солнечной активностей,

спектры солнечного ультрафиолетового излучения и др.) и в возмущенные периоды вследствие возрастания уровня помех существенно снижается. Отсутствие полной информации о динамике ионосферных процессов ограничивает область применения физических моделей [9, 21]. В данной работе используется разработанный авторами гибридный подход, основанный на совмещении вейвлет-преобразования (например, [11]) с методами авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС, [5]). Впервые подход для анализа ионосферных данных предложен в работах [12, 13], его основу составляет обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы (ОМКМ) [14-16]. В статье приведены оценки эффективности разработанного метода, описаны операции обнаружения ионосферных аномалий и оценки их параметров. Метод реализован в системе комплексного анализа геофизических данных Aurora (<http://lsaoperanalysis.ikir.ru/lsaoperanalysis.html>).

2. Описание метода

2.1 Обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы

Временной ряд параметров ионосферы может быть представлен в виде [13, 14]:

$$f(t) = A^{PEG}(t) + U(t) + e(t) = \sum_{\mu=1, T} \sum_j G_j^\mu \alpha_j^\mu(t) + \sum_{i, \eta} \beta_{i, \eta}^{603M}(t) + e(t), \quad (1)$$

где $A^{PEG}(t) = \sum_{\mu=1, T} \sum_j G_j^\mu \alpha_j^\mu(t)$ ($\mu = \overline{1, T}$ – 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.);

$U(t) = \sum_{i, \eta} \beta_{i, \eta}^{603M}(t)$ – 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.

Компонента $A^{PEG}(t)$ модели (1) может быть представлена в параметрическом виде [13]:

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

где $s_{j^{PEG}, k}^\mu = \sum_{l=1}^{p_{j^{PEG}}^\mu} \gamma_{j^{PEG}, l}^\mu \omega_{j^{PEG}, k-l}^\mu - \sum_{n=1}^{h_{j^{PEG}}^\mu} \theta_{j^{PEG}, n}^\mu a_{j^{PEG}, k-n}^\mu$ – оценочное значение регулярной μ -ой

составляющей; $p_{j^{PEG}}^\mu$, $\gamma_{j^{PEG}, l}^\mu$ – порядок и параметры авторегрессии μ -ой составляющей;

$\omega_{j^{PEG}, k}^\mu = \nabla^{v^\mu} \delta_{j^{PEG}, k}^\mu$, v^μ – порядок разности μ -ой составляющей,

$\delta_{-m^{PEG}, k}^1 = c_{-m^{PEG}, k}$, $\delta_{j^{PEG}, k}^\mu = d_{j^{PEG}, k}$, $\mu = \overline{2, T}$, T – количество моделируемых составляющих,

$c_{-m^{PEG}, k} = \langle f, \phi_{-m^{PEG}, k} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты сглаженной составляющей КМА масштаба m^{PEG} ,

$d_{j^{PEG}, k} = \langle f, \Psi_{j^{PEG}, k} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты детализирующих составляющих КМА масштабов

j^{PEG} , $\phi_{-m^{PEG}, k}(t)$ – масштабирующая функция, $\Psi_{j^{PEG}, k}(t)$ – вейвлет-функция; $h_{j^{PEG}}^\mu$, $\theta_{j^{PEG}, n}^\mu$ –

порядок и параметры скользящего среднего μ -ой составляющей; $a_{j^{PEG}, k}^\mu$ – остаточные ошибки

модели μ -ой составляющей, $b_{-m^{PEG}, k}^1 = \phi_{-m^{PEG}, k}$; $b_{j^{PEG}, k}^\mu = \Psi_{j^{PEG}, k}$, $\mu = \overline{2, T}$, $N_{j^{PEG}}^\mu$ – длина μ -ой

составляющей.

Составляющие $\beta_{i,\eta}^{603M}(t)$ компоненты $U(t)$ модели (1) определяют нестационарные изменения параметров ионосферы (ионосферные возмущения) и в вейвлет-пространстве могут быть представлены в виде [16]:

$$\sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{603M}(t) = \sum_{\eta,n} P_{1,\eta}(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{\eta,n} P_{2,\eta}(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{\eta,n} P_{3,\eta}(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t), \quad (3)$$

$$P_{1,\eta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{1,\eta} \text{ или } |x| > T_{2,\eta} \\ x, & \text{если } T_{1,\eta} < |x| \leq T_{2,\eta} \end{cases}, \quad P_{2,\eta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{2,\eta} \text{ или } |x| > T_{3,\eta} \\ x, & \text{если } T_{2,\eta} < |x| \leq T_{3,\eta} \end{cases}, \quad P_{3,\eta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{3,\eta} \\ x, & \text{если } |x| > T_{3,\eta} \end{cases}$$

где $d_{\eta,n} = \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты на масштабе η ; $\{\Psi_{\eta,n}\}_{\eta,n \in Z}$ – вейвлет-базис. В соотношении (3) амплитуда вейвлет-коэффициентов $|d_{\eta,n}|$, следуя работам [14, 16], принята за меру интенсивности ионосферных аномалий масштаба η . Соответственно пороги $T_{1,\eta}$ определяют *аномалии малой интенсивности* (класс 1), пороги $T_{2,\eta}$ – *умеренной интенсивности* (класс 2), пороги $T_{3,\eta}$ – *высокой интенсивности* (класс 3).

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

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

2.2 Операции обнаружения и оценка параметров ионосферных аномалий

1. В периоды нестационарных изменений в динамике параметров ионосферы возрастут остаточные ошибки компоненты $A^{PEG}(t)$ модели (см. соотношение (2)). Поэтому обнаружение ионосферных возмущений может быть основано на проверке условия [3]:

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

где $q \geq 1$ – шаг упреждения данных; Q_{μ} – длина упреждения данных на основе μ -ой составляющей модели;

$$a_{j^{per},k+q}^{\mu} = s_{j^{per},k+q}^{\mu, \text{факт}} - s_{j^{per},k+q}^{\mu, \text{модель}};$$

$s_{j^{per},k}^{\mu, \text{модель}} = \sum_{l=1}^{p_{j^{per}}^{\mu}} \gamma_{j^{per},l}^{\mu} \omega_{j^{per},k+q-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{per}}^{\mu}} \theta_{j^{per},n}^{\mu} a_{j^{per},k+q-n}^{\mu}$; $H_{\mu,j^{per}}$ – пороговое значение μ -ой составляющей, которое как показано в работах [3, 13] может быть определено на основе оценки дисперсии остаточных ошибок модели.

Амплитуда остаточной ошибки $|a_{j^{per},k}^{\mu}|$ характеризует интенсивность ионосферного возмущения на масштабе η и может быть оценена как [3]:

$$Y_{j^{per},k+1,k+L_{\mu}}^{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L_{\mu}} \sum_{l=1}^{L_{\mu}} \left(a_{j^{per},k+l}^{\mu} \right)^2}}{H_{\mu,j^{per}}}, \quad (5)$$

где L_{μ} – длина временного окна.

2. Составляющие $\beta_{i,\eta}^{603M}(t)$ компоненты $U(t)$ модели (см. соотношение (3)) имеют случайную природу, поэтому для их идентификации логично применить адаптивные пороги $P_{i,\eta}^{a0}$, $i = 1, 3$ и коэффициенты $d_{\eta,n}$ в соотношении (3) принять равными

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^{1+}, \text{ если } P_{1,\eta}^{a\delta} < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \leq P_{2,\eta}^{a\delta} \\ 0, \text{ если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| < P_{1,\eta}^{a\delta} \text{ или } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| > P_{2,\eta}^{a\delta} \\ d_{\eta,n}^{1-}, \text{ если } -P_{2,\eta}^{a\delta} \leq (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) < -P_{1,\eta}^{a\delta} \end{cases}, d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^{2+}, \text{ если } P_{2,\eta}^{a\delta} < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \leq P_{3,\eta}^{a\delta} \\ 0, \text{ если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| < P_{2,\eta}^{a\delta} \text{ или } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| > P_{3,\eta}^{a\delta} \\ d_{\eta,n}^{2-}, \text{ если } -P_{3,\eta}^{a\delta} \leq (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) < -P_{2,\eta}^{a\delta} \end{cases} \quad (6)$$

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

где $P_{i,\eta}^{a\delta} = V_i \cdot St_{\eta}$; 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 $d_{\eta,n}^{med}$ – соответственно среднее значение и медиана, которые вычисляются в рамках скользящего временного окна длины Φ и с учетом суточного хода ионосферных данных, вейвлет-коэффициенты $d_{\eta,n}^{i+}$ определяют положительные аномалии класса i , вейвлет-коэффициенты $d_{\eta,n}^{i-}$ определяют отрицательные аномалии класса i .

Оценка порогов $P_{i,\eta}^{a\delta}, i = 1, 3$ выполнялась в работе путем минимизации апостериорного риска [2]. Средняя величина потерь оценивалась как [2]

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

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 $h_j^i, i \neq l, l$ – индексы состояний h_j^i (характеризует наличие/отсутствие ионосферной аномалии класса i), знак "/" означает условную вероятность. Усредняя условную функцию риска по всем состояниям h_j^i имеем *средний риск*:

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

где p_i – априорная вероятность состояния h_j^i .

Поскольку мы не знаем априорное распределение состояний p_i , оценивался *апостериорный риск*. Для простой функции потерь $\Pi_{il} = \begin{cases} 1, i \neq l \\ 0, i = l \end{cases}$ апостериорный риск $R_l(x)$ равен

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

Пороги $P_{i,\eta}^{a\delta}, i = 1, 3$ 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 учитывались следующие особенности ионосферных данных:

1. *Аномалии малой интенсивности* (класс 1) характеризуют возникновение короткопериодных аномальных особенностей малой амплитуды. Для формирования класса и оценки порогов $P_{1,\eta}^{a\delta}$ 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 формирования класса и

оценки порогов $P_{2,\eta}^{a\delta}$ использовались данные foF2 района Камчатки, регистрируемые в периоды слабо-возмущенного геомагнитного поля (K-индекс имел значения в диапазоне 3 – 4).

3. *Аномалии высокой интенсивности* (класс 3) характеризуют возникновение короткопериодных аномальных особенностей большой амплитуды. Для формирования класса и оценки порогов $P_{3,\eta}^{a\delta}$ использовались данные foF2 района Камчатки, регистрируемые в периоды возмущенного геомагнитного поля (K-индекс имел значения в диапазоне 5 – 8).

Интенсивность положительных ($J^{i+}(n)$) и отрицательных ($J^{i-}(n)$) аномалий каждого класса i оценивалась по формуле:

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

2.3 Оценка эффективности метода

Для оценки эффективности метода выполнено статистическое моделирование. Сгенерированные модельные временные ряды имели структуру, соответствующую временным рядам параметров ионосферы, и включали следующие составляющие: (1) – медианные значения временного ряда foF2, полученные по данным, регистрируемым в спокойные периоды (периоды, в которые отсутствовали геомагнитные возмущения и сейсмические события на Камчатке энергетического класса $K_s > 12$); (2) – разномасштабные локальные особенности (разной формы, длительности и амплитуды); (3) – белый шум. Рассматривались локальные особенности вида треугольный и прямоугольный импульсы. Длительность локальных особенностей изменялась от 3 до 30 отсчетов, амплитуда особенности A_{oc} имела значения от 0,5 до 6. На рисунке 1 представлен пример формирования модельного временного ряда, содержащего разномасштабные особенности вида треугольный импульс (рисунок 1 е). Длительность особенности равна 6 отсчетов (на нулевом масштабном уровне соответствует 24 отсчетам (6 ч)), амплитуда особенности составляла 1,5 от амплитуды шума ($A_{oc} / A_{шума} = 1,5$).

Также на рисунке 1, в качестве примера, представлен временной ряд 15-минутных данных foF2, зарегистрированный на станции «Паратунка» в период с 1 по 28 июля 2017 г. С учетом структуры временных рядов параметров ионосферы оценки выполнялись отдельно для каждого сезона и уровня солнечной активности. На рисунке 1 з, и показаны результаты оценок вероятности обнаружения локальных особенностей в зависимости от их амплитуды.

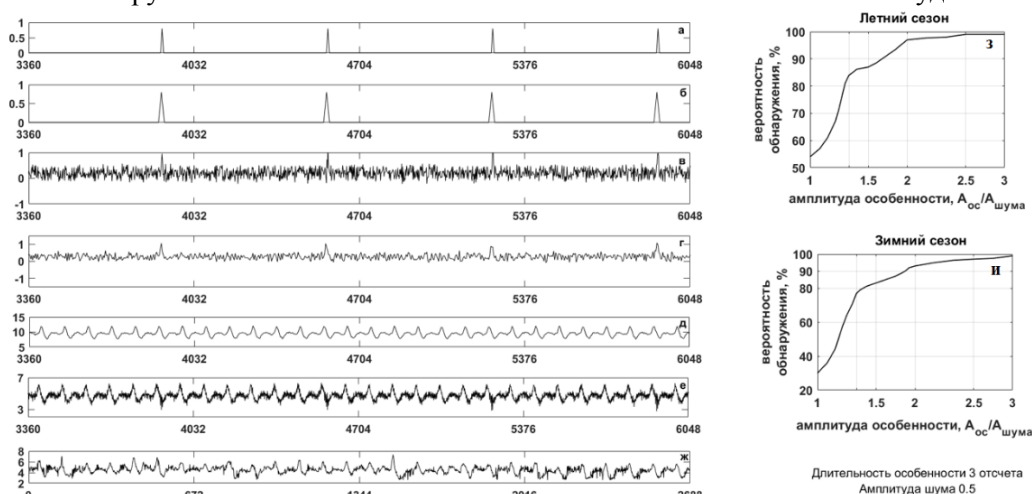


Рисунок 1. Модельный временной ряд: локальные особенности 1-го (а) и 2-го (б) масштабных уровней; в-д) – компоненты временного ряда foF2 с локальными особенностями и белым шумом; е) – модельный временной ряд; ж) – временной ряд foF2 станция «Паратунка»; з, и) – графики вероятностей обнаружения особенностей в зависимости от их амплитуды (операция (б)).

Анализ результатов показывает, что с вероятностью от 93% (в зависимости от сезона) на основе операции (б) могут быть обнаружены локальные особенности длительностью от 3

отсчетов и более ($A_{oc} / A_{шума} = 2$). Полученные результаты показывают высокую эффективность метода для выделения ионосферных возмущений. Результаты оценки эффективности обнаружения ионосферных возмущений на основе операции (4) представлены в работе [15].

3. Результаты применения метода в периоды магнитных бурь

При построении моделей использовались 15-минутные данные критической частоты ионосферы foF2 станции «Паратунка» (53.0^0 СШ; 158.7^0 ВД, п-ов Камчатка, ИКИР ДВО РАН), регистрируемые в периоды спокойных геомагнитных условий (суммарный за сутки К-индекс ≤ 20 , максимальный 3-х часовой К-индекс ≤ 4) и не содержащие сильных сейсмических событий (отсутствовали землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 12$ (<http://sdis.emsd.ru/main.php>)). Вейвлет-преобразование выполнялось с использованием функций Добеши порядка 3. Следуя результатам работы [13], оценка параметров моделей выполнялась отдельно для каждого сезона.

По результатам оценок (использовались данные за период с 2015 по 2018 гг.) получена модель:

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

где для летнего сезона низкой солнечной активности:

$$s_{-5,k}^1 = -0,92\omega_{-5,k-1}^1 - 0,88\omega_{-5,k-2}^1 + a_{-5,k}^1, \quad s_{-5,k}^2 = 0,41 - 0,30\omega_{-5,k-1}^2 - 0,30\omega_{-5,k-2}^2 + 0,48\omega_{-5,k-3}^2 + a_{-5,k}^2,$$

для зимнего сезона низкой солнечной активности:

$$s_{-5,k}^1 = -0,61\omega_{-5,k-1}^1 - 0,62\omega_{-5,k-2}^1 + 0,37\omega_{-5,k-3}^1 + a_{-5,k}^1, \quad s_{-5,k}^2 = -0,45\omega_{-5,k-1}^2 - 0,44\omega_{-5,k-2}^2 + 0,48\omega_{-5,k-3}^2 + a_{-5,k}^2.$$

Пороги $H_{\mu,-5}$ (соотношение (4)) оценивались для шага упреждения $q=1$ и доверительной вероятности 70%. Для летнего сезона низкой солнечной активности пороги приняты равными: $H_{1,-5} = 1,8$ – для составляющей $f_{-5}(t)$; $H_{2,-5} = 1,1$ – для составляющей $g_{-5}(t)$.

На рисунке 2, показаны результаты применения метода в период сильной магнитной бури 25-26 августа 2018 г. Анализировались ионосферные данные станций регистраций «Паратунка» (Камчатка) и «Москва». Анализ результатов обработки показывает, что накануне магнитной бури в анализируемых районах возникли длительные положительные ионосферные аномалии слабой интенсивности (класс 1) (рисунок 2 е, ж, п, р) с максимумом на станции Паратунка около 10.00 UT 24 августа и на станции Москва – около 16. 00 UT. Результаты моделирования данных foF2 (рисунок 2 б) подтверждают наличие аномальных процессов в этот период – 23 августа и в первую половину суток 24 августа (ошибки компоненты $g_{-5}(t)$ вышли за пределы доверительного интервала, что свидетельствует о возникновении короткопериодных колебательных процессов в ионосфере). В период восстановительной фазы магнитной бури 26 августа в анализируемых районах возникли интенсивные отрицательные ионосферные бури (класс 3, рисунок 2 е, ж, п, р), длительностью около 35 ч на станции Паратунка и 18 ч. на станции Москва (превышение 4 СКО для компоненты $f_{-5}(t)$ модели, рисунок 2 б). Результаты последовательной обработки данных (рисунок 2 в-д, з-н, с-ф) показывают возможность обнаружения ионосферных аномалий в режиме оперативного анализа и подтверждают эффективность предлагаемого метода. Интенсивность обнаруженной накануне магнитной бури положительной аномалии на станции Паратунка превысила порог 24 августа в 09.00 UT, а на станции Москва приблизилась к пороговому уровню на 7 часов позже.

4. Выводы

Разработанный метод анализа параметров ионосферы позволяет в автоматическом режиме обнаруживать ионосферные возмущения разной интенсивности и длительности. Оценки показали высокую чувствительность метода и возможность его применения в оперативном режиме.

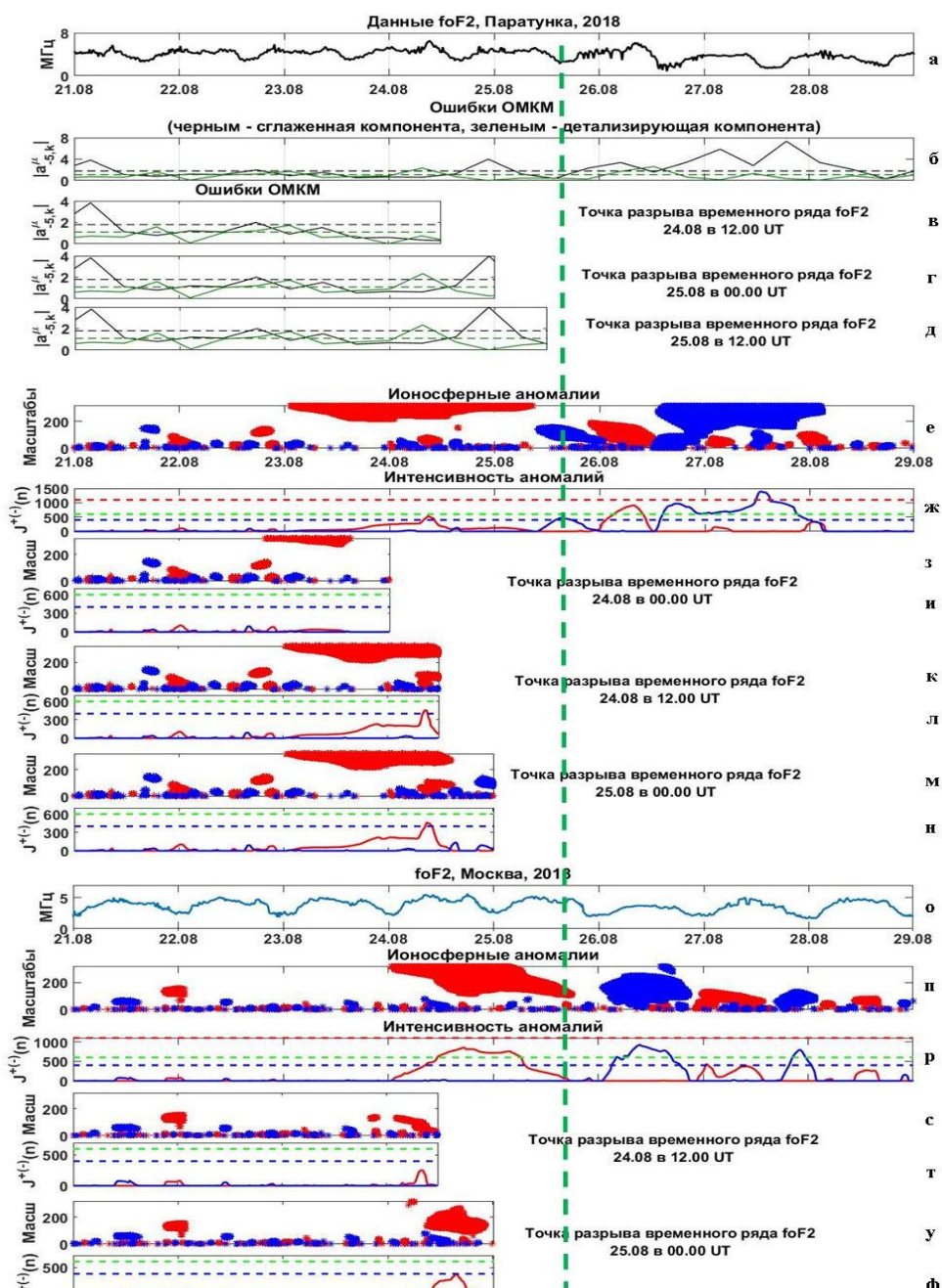


Рисунок 2. Результаты обработки 15-минутных данных foF2 станций Паратунка и Москва. Вертикальный пунктир – момент начала магнитной бури. Пороги на графиках б – д (пунктир): черным – $H_{1,-5}$, зеленым – $H_{2,-5}$. Границы интенсивности ($J^{+(-)}(n)$) на графиках ж, и, л, н, р, т, ф (пунктир): красным – высокая, зеленым – умеренная, синим – малая.

На примере обработки критической частоты ионосферы foF2 районов Камчатка и Москва показана возможность применения метода для обнаружения ионосферных возмущений малой интенсивности, предшествующих магнитным бурям. Экспериментально подтверждена возможность возникновения ионосферных возмущений 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>).

5. Благодарности

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

6. Литература

- [1] Афраймович, Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова – Иркутск: ГУНУРВХВСНЦСО РАМН, 2006. – 480 с.
- [2] Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники – М.: Советское радио, 1969. – 752 с.
- [3] Фетисова, Н.В. Алгоритм выделения интенсивных аномальных изменений во временном ходе параметров ионосферы // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 1064-1071. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1064-1071.
- [4] Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters / D. Bilitza, B.W. Reinisch // *Advances in space research*. – 2008. – Vol. 42. – P. 599-609.
- [5] Box, G. Time series analysis: Forecasting and control / G. Box, G. Jenkins // San Francisco: Holden Day, 1970. – 553 p.
- [6] Chernogor, L.F. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System / L.F. Chernogor, V.T. Rozumenko // *Radio Physics and Radio Astronomy*. – 2008. – Vol. 13, № 2. – P. 120-137.
- [7] Danilov, A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // *Advances in Space Research*. – 2013. – Vol. 52, № 3. – P. 343-366.
- [8] Dmitriev, A.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 / A.V. Dmitriev, A.V. Suvorova, M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, K.G. Ratovsky, R.A. Rakhmatulin, V. Parkhomov // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – Vol. 122. – Т. 2. – P. 2398-2423.
- [9] Knyazeva, M.A. Field-aligned currents influence on the ionospheric electric fields: modification of the upper atmosphere model / M.A. Knyazeva, A.A. Namgaladze, K.E. Beloushko // *Russian journal of physical chemistry*. – 2015. – Vol. 9(5). – P. 758-763. DOI: 10.1134/S1990793115050206.
- [10] Liu, L. Prestorm enhancements in NmF2 and total electron content at low latitudes / L. Liu, W. Wan, M.L. Zhang, B. Zhao, B. Ning // *Journal of geophysical research*. – 2008. – Vol. 113(A02311). – P. 1–12.
- [11] Mallat, S. A wavelet tour of signal processing – London: Academic Press, 2008. – 832 p.
- [12] Mandrikova, O.V. Modeling and analysis of ionospheric parameters by a combination of wavelet transform and autoregressive models / O.V. Mandrikova, N.V. Glushkova, I.V. Zhivet'ev // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2014. – Vol. 54(5). – P. 593-600. DOI: 10.1134/S0016793214050107.
- [13] Mandrikova, O.V. Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere / O.V. Mandrikova, N.V. Fetisova, Y.A. Polozov, I.S. Solovev, M.S. Kupriyanov // *Earth, Planets and Space*. – 2015. – Vol. 67(1). – P. 131-146. DOI: 10.1186/s40623-015-0301-4.
- [14] Mandrikova, O. Analysis of the dynamics of ionospheric parameters during periods of increased solar activity and magnetic storms / O. Mandrikova, Yu. Polozov, N. Fetisova, T. Zalyaev // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2018. – Vol. 181. – P. 116-126. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.019.

- [15] Mandrikova, O. Method of ionospheric parameter analysis in the problems of real-time data processing / O. Mandrikova, N. Fetisova, Yu. Polozov // Journal of Physics: Conference Series by IOP Publishing. – 2018. – Vol. 1096.
- [16] Mandrikova, O. A method for modeling of ionospheric parameters and detection of ionospheric disturbances / O. Mandrikova, N. Fetisova, Yu. Polozov // 19th Russia National Conference Mathematical methods for pattern recognition, 2019. – P. 200.
- [17] Mikhailov, A. A method for foF2 monitoring over Spain using the El Arenosillo digisonde current observations / A. Mikhailov, B. Morena, G. Miro, D. Marin // Annals of Geophysics. – 1999. – Vol. 42(4). DOI: 10.4401/ag-3748.
- [18] Nakamura, M. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan / M. Nakamura, T. Maruyama, Y. Shidama // Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. – 2009. – Vol. 56. – P. 391-406.
- [19] Sai Gowtam, V. 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 / V. Sai Gowtam, S. Tulasi Ram // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2017. – Vol. 122. DOI: 10.1002/2017JA024795.
- [20] Shubin, V.N. Global model SMF2 of the F2-layer maximum height / V.N. Shubin, A.T. Karpachev, V.A. Telegin, K.G. Tchybulya // Geomagnetism and Aeronomy. – 2015. – Vol. 55(5). – P. 609-622. DOI: 10.1134/S001679321505014X.
- [21] Solomentsev, D.V. Three-dimensional assimilation model of the ionosphere for the European region / D.V. Solomentsev, A.A. Titov, B.V. Khattatov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – Vol. 53(1). – P. 73-84. DOI: 10.1134/S0016793212060114.
- [22] Song, R. Prediction TEC in China based on the neural networks optimized by genetic algorithm / R. Song, X. Zhang, Ch. Zhou, J. Liu, J. He // Advances in Space Research. – 2018. – Vol. 62(4). DOI: 10.1016/j.asr.2018.03.043.
- [23] Tebabal, A. Local TEC modelling and forecasting using neural networks / A. Tebabal, S.M. Radicella, M. Nigussie, B. Damtie, B. Nava, E. Yizengaw // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – Vol. 172. – P. 143-151. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.03.004.

An automated method for detecting ionospheric disturbances

O.V. Mandrikova¹, N.V. Fetisova¹

¹Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Mirnaya str. 7, Paratunka, Kamchatka region, Russia, 684034

Abstract. The paper proposes an automated method for the ionospheric parameter analysis and ionospheric disturbances detection. The method is based on a generalized multicomponent model of ionospheric parameters (GMCM) developed by the authors. The model describes regular variations of the ionosphere parameters and anomaly changes of various duration and intensity. The paper describes operations of detecting ionospheric anomalies and presents estimate of the method efficiency. On the example of the processing of the ionospheric critical frequency data (foF2) of the Kamchatka region, it is shown the possibility of applying the method in online data analysis (as recorded data become available). The method has been implemented in Aurora system for complex analysis of geophysical data (<http://lsaoperanalysis.ikir.ru/lsaoperanalysis.html>).