

7. Радиочастотная идентификация. Технологии, стандарты, компоненты. URL: http://www.vital-ic.com/files/Catalog_RFID_light.pdf.

8. Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.0.9. URL: http://www.keytex.ru/files/Class_1_Generation_2_UHF_Air_Interface_Protocol_Standard_Version_1.0.9.pdf.

9. TI UHF Gen2 Protocol Reference Guide. URL: <http://www.keytex.ru/files/UHF-ProtocolRefGuide.pdf>.

10. Дмитриев В. Ф. Исследование корреляционного метода для решения задачи антиколлизии для систем радиочастотной идентификации на ПАВ // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5. С. 48–53.

11. Беспалов М. С., Скляренко В. А. Дискретные функции Уолша и их приложения: учеб. пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. 68 с.

N. A. Verzun, M. O. Kolbanev, B. Ya. Sovetov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

A. M. Kolbanev
SC «Er-Telecom Holding» (Saint Petersburg)

ANTI-COLLISION ALGORITHMS OF RADIO-FREQUENCY IDENTIFICATION SYSTEMS

The review of modern technologies of construction of radio-frequency identification (RFID) systems, which are an integral part of the Internet of things, is presented. The advantages and disadvantages of radio-frequency identification compared to the other methods of identification of smart things are described. The classification of radio-frequency labels by the most essential for RFID systems features is given. The purpose of anti-collision algorithms in radio-frequency identification systems is considered. The classification of anti-collision algorithms that may be used for the organization of interaction of radio-frequency labels with the reader in different-purpose RFID systems is presented. The possibilities of random, deterministic, spatial and correlation algorithms of anti-collision are described and analyzed. A correlation approach to the elimination (avoidance) of collisions in relation to RFID tags on surface acoustic waves is developed.

Internet of things, object identification, RFID system, RFID tag, multiple access, anti-collision algorithms

УДК 519.65

О. В. Мандрикова, Н. В. Фетисова

Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии

В. В. Геппенер

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Обобщенная многокомпонентная модель временного ряда параметров ионосферы

Предложена обобщенная многокомпонентная модель временного ряда параметров ионосферы (ОМКМ), позволяющая описать регулярный временной ход параметров и выделить периоды аномальных изменений в данных. Идентификация модели основана на совместном применении вейвлет-преобразования и моделей авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС). На примере часовых данных критической частоты ионосферы (foF2) станции «Паратунка» (ИКИР ДВО РАН, Камчатка) описан процесс идентификации ОМКМ-моделей для различных сезонов и различных уровней солнечной активности. Сравнение полученных ОМКМ-моделей с эмпирической Международной справочной моделью ИРИ для анализируемой станции показало эффективность применения предлагаемой авторами модели. Результаты моделирования показали высокую эффективность модели в задачах выделения ионосферных аномалий, возникающих накануне и в периоды магнитных бурь.

Вейвлет-преобразование, авторегрессионные модели, параметры ионосферы, аномалии

Введение и постановка задачи. Цель – разработать математические модели для аналитического

описания временных рядов сложной структуры и построения автоматизированных систем модели-

рования и анализа. В статье рассматривается задача построения модели сложного временного ряда на примере ОМКМ параметров ионосферы. Описан способ построения и оценки модели и приведены примеры ее применения для выделения ионосферных неоднородностей, формирующихся в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь. Предлагаемый подход основан на современных методах распознавания образов и цифровой обработки сигналов, а также их совмещении с классическими методами анализа временных рядов. С использованием данных наземной сети станций северо-восточного сегмента России (станции ИКИР ДВО РАН) рассмотрен этап идентификации модели, показана возможность ее применения для задач выделения аномальных изменений в ионосферной системе в возмущенные периоды.

Динамика ионосферы определяется многочисленными эффектами внешнего (космическая погода) и внутреннего (литосфера, атмосфера) происхождения [1]–[6]. Структура ионосферы и регулярные для ионосферного хода изменения сильно зависят от времени суток и сезона, солнечной и геомагнитной активности, географического положения (полярная и авроральная зоны, среднеширотные и экваториальные области) [1], [3]–[7]. Нерегулярные изменения параметров ионосферы наблюдаются в периоды солнечных вспышечных событий и (или) магнитных возмущений, приводящих к образованию ионосферных неоднородностей (возмущений). Возмущения вызывают серьезные нарушения в работе современных наземных и космических технических средств [1], [4], [7], поэтому их своевременное обнаружение имеет важное прикладное значение. Они формируются в ионосфере вследствие резкого изменения плотности электронов по сравнению с некоторым характерным (спокойным) уровнем [1], [5], [7]. Ионосферные неоднородности часто возникают в экваториальной и авроральной зонах, но могут наблюдаться и в средних широтах, и их интенсивность существенно увеличивается с ростом солнечной активности [1], [4]–[8]. Один из основных параметров, характеризующих состояние ионосферы, – критическая частота F2-слоя ионосферы (foF2). Процессы, протекающие в F2-слое ионосферы в возмущенные периоды, имеют сложный характер и для одной и той же ионосферной бури зависят от координат станции регистрации, начала геомагнитной бури, местного времени и др. [4], [5]. Ионосфер-

ные возмущения находят отражение в регистрируемых данных foF2 в виде аномальных изменений различной структуры и длительности [9]–[16]. Анализ данных foF2 и обнаружение аномальных изменений является предметом данного исследования.

Задачи анализа ионосферных параметров и выделения аномалий решаются большим количеством авторов [1]–[7], [9], [17]–[25]. Среди основных подходов можно выделить традиционный метод скользящей медианы [1], [22], [24], физические модели [2], [17], [26], эмпирические модели ионосферы [18], [19], нейросетевые модели [7], [9], [25]. Применение традиционных методов, основанных на медианном сглаживании, позволяет изучать наиболее устойчивые характеристики ионосферного процесса, но приводит к потере информации о динамике ионосферных возмущений [9], [10], [15]. Точность и эффективность современных моделей (эмпирические [18], [19], физические [2], [17], [26] и нейросетевые [7], [9], [25]) во многом зависит от наличия качественных геофизических данных (используются индексы магнитной и солнечной активности, спектры солнечного ультрафиолетового излучения, температура и плотность нейтрального состава атмосферы), определяющих состояние околоземного космического пространства и используемых в моделировании. Поэтому наибольшие погрешности современных моделей наблюдаются в области высоких широт и в районах с редкой сетью наблюдений данных [2], [6], [17], [25]. Также достоверность этих методов существенно снижается в возмущенные периоды [1], [2], [6], [7], [17], [25].

В настоящее время интенсивное развитие в задачах анализа сложных временных рядов получают методы вейвлет-преобразования [20], [21], [27], [28]. Проведенные в последнее время исследования подтвердили эффективность этого математического аппарата в области геофизики [11]–[16], [20], [21]. Обладая высокой разрешающей способностью, вейвлет-преобразование позволяет выделять тонкие локальные структуры данных, что невозможно реализовать спектральными методами [12], [20], [27], [28]. Наличие быстрых алгоритмов вейвлет-преобразования обеспечивает возможность их реализации в режиме реального времени, что весьма важно для решения задач оперативного анализа данных [27]. В области моделирования временных рядов наибольшее распространение получили модели АРСС, позволяющие построить адекватные модели даже при

наличии ограниченных выборок [29], [30]. Также преимуществом моделей АРПСС является их математическая обоснованность и, как следствие, возможность получения результатов с заданной доверительной вероятностью. Но учитывая, что оценка моделей АРПСС, а также их диагностика и оптимизация полностью базируются на предположении, что данные имеют нормальное распределение, их непосредственное применение для моделирования параметров ионосферы малоэффективно. Представленная в статье ОМКМ параметров ионосферы основана на комплексном подходе, объединяющем вейвлет-преобразование (используются кратномасштабные вейвлет-разложения (КМА)) и модели АРПСС. ОМКМ включает регулярную составляющую, описывающую характерные изменения параметров, протекающие в условиях спокойной ионосферы, и возмущенную составляющую, описывающую аномальные изменения. Применение КМА позволяет изучить структуру параметров ионосферы и выделить информативные компоненты, описывающие регулярные изменения. Поскольку выделенные компоненты имеют более простую структуру, это позволяет для их идентификации применять методы АРПСС. Для выделения аномальных изменений параметров ионосферы используется подход, основанный на анализе ошибок полученных моделей.

Построение обобщенной многокомпонентной модели временного ряда параметров ионосферы. Идентификация регулярной составляющей ОМКМ. В [15], [31] показано, что на основе КМА временной ряд параметров ионосферы $f(t)$ может быть представлен в виде

$$f(t) = f_{-m}^{\text{per}}(t) + \sum_{j^{\text{per}}} g_j^{\text{per}}(t) + \sum_{\eta} \beta_{\text{ВОЗМ}}^{\eta}(t) + e(t) = A^{\text{РЕГ}}(t) + \sum_{\eta} \beta_{\text{ВОЗМ}}^{\eta}(t) + e(t), \quad (1)$$

где $A^{\text{РЕГ}}(t) = f_{-m}^{\text{per}}(t) + \sum_{j^{\text{per}}} g_j^{\text{per}}(t)$ – регулярная составляющая временного ряда, $f_{-m}^{\text{per}}(t) = \sum_k c_{-m}^{\text{per},k} \varphi_{-m}^{\text{per},k}(t)$ – сглаженная компонента временного ряда масштаба $-m^{\text{per}}$, $g_j^{\text{per}}(t) = \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k}(t)$, $j = -1, -m^{\text{per}}$ – детализирующая компонента временного ряда, $c_{-m}^{\text{per},k} =$

$$= \langle f, \varphi_{-m}^{\text{per},k} \rangle, \quad d_{j^{\text{per}},k} = \langle f, \Psi_{j^{\text{per}},k} \rangle, \quad f_{-m}^{\text{per}} \in V_{-m}^{\text{per}}, \quad V_{-m}^{\text{per}} = \text{clos}_{L^2(R)} \left[2^{-\frac{m^{\text{per}}}{2}} \varphi(2^{-m^{\text{per}}} t - k) \right] : k \in Z, \quad \varphi_{-m}^{\text{per},k}(t) = 2^{-\frac{m^{\text{per}}}{2}} \varphi(2^{-m^{\text{per}}} t - k) - \text{масштабирующая функция}, \quad g_j \in W_j, \quad W_j = \text{clos}_{L^2(R)} \left(2^{\frac{j}{2}} \Psi(2^j t - k) \right) : k \in Z, \quad \Psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \times \Psi(2^j t - k) - \text{базисный вейвлет}; \quad \sum_{\eta} \beta_{\text{ВОЗМ}}^{\eta}(t) -$$

аномальная составляющая временного ряда (в случае регулярных изменений данных предполагается, что $\sum_{\eta} \beta_{\text{ВОЗМ}}^{\eta}(t) = 0$); $e(t)$ – случайная составляющая, включающая помехи искусственного происхождения (запуски ракет, промышленные взрывы и др.), а также аппаратные сбои.

Регулярные компоненты $f_{-m}^{\text{per}}(t)$ и $g_j^{\text{per}}(t)$ обладают свойством строгой стационарности [15], [31] и, следуя [29], могут быть представлены в виде процесса АРПСС порядка (p, v, h) :

$$\omega_{-m}^{\text{per},k}(t) = \gamma_{-m}^{\text{per},1} \omega_{-m}^{\text{per},k-1} + \dots + \gamma_{-m}^{\text{per},p} \times \omega_{-m}^{\text{per},k-p} - \theta_{-m}^{\text{per},1} a_{-m}^{\text{per},k-1} - \dots - \theta_{-m}^{\text{per},h} a_{-m}^{\text{per},k-h}, \quad (2)$$

где $\omega_{-m}^{\text{per},k} = \nabla^v c_{-m}^{\text{per},k}$, ∇^v – оператор взятия разности порядка v ; $p, \gamma_{-m}^{\text{per},1}, \dots, \gamma_{-m}^{\text{per},p}$ – порядок и параметры авторегрессии сглаженной компоненты; $h, \theta_{-m}^{\text{per},1}, \dots, \theta_{-m}^{\text{per},h}$ – порядок и параметры скользящего среднего сглаженной компоненты; $a_{-m}^{\text{per},k}$ – остаточные ошибки модели сглаженной компоненты;

$$\omega_{j^{\text{per}},k}(t) = \gamma_{j^{\text{per}},1} \omega_{j^{\text{per}},k-1} + \dots + \gamma_{j^{\text{per}},p_j^{\text{per}}} \times \omega_{j^{\text{per}},k-p_j^{\text{per}}} - \theta_{j^{\text{per}},1} a_{j^{\text{per}},k-1} - \dots - \theta_{j^{\text{per}},h_j^{\text{per}}} a_{j^{\text{per}},k-h_j^{\text{per}}}. \quad (3)$$

Здесь $\omega_{j^{\text{per}},k} = \nabla^{v_j^{\text{per}}} d_{j^{\text{per}},k}$, $\nabla^{v_j^{\text{per}}}$ – оператор взятия разности порядка v_j^{per} , $p_j^{\text{per}}, \dots, \gamma_{j^{\text{per}},p_j^{\text{per}}}$

$\overline{\gamma_{j^{\text{рег}},1}, \gamma_{j^{\text{рег}}, p_{j^{\text{рег}}}}$ – порядок и параметры авторегрессии детализирующей компоненты с разрешением $j^{\text{рег}}$, $\overline{h_{j^{\text{рег}}}, \theta_{j^{\text{рег}},1}, \theta_{j^{\text{рег}}, h_{j^{\text{рег}}}}$ – порядок и параметры скользящего среднего детализирующей компоненты с разрешением $j^{\text{рег}}$, $a_{j^{\text{рег}}, k}$ – остаточные ошибки модели детализирующей компоненты с разрешением $j^{\text{рег}}$.

Модель (1) назовем обобщенной многокомпонентной моделью (ОМКМ) временного ряда параметров ионосферы.

Объединяя модели компонент (2) и (3), получим *представление регулярной составляющей модели временного ряда* $A^{\text{РЕГ}}(t)$ (см. (1)) в виде

$$A^{\text{РЕГ}}(t) = \sum_{\mu=1, T} \sum_{k=1, N_{j^{\text{рег}}}^{\mu}} s_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} b_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu}(t), \quad (4)$$

где

$$s_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu}(t) = \sum_{l=1}^{p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}} \gamma_{j^{\text{рег}}, l}^{\mu} \omega_{j^{\text{рег}}, k-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}} \theta_{j^{\text{рег}}, n}^{\mu} a_{j^{\text{рег}}, k-n}^{\mu}$$

– оценочное значение регулярной μ -й компоненты, $p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}$, $\gamma_{j^{\text{рег}}, l}^{\mu}$ – порядок и параметры авторегрессии μ -й компоненты, $h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}$, $\theta_{j^{\text{рег}}, n}^{\mu}$ – порядок и параметры скользящего среднего μ -й компоненты, $\omega_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} = \nabla^{v^{\mu}} \delta_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu}$, v^{μ} – порядок разности μ -й компоненты, $\delta_{j^{\text{рег}}, k}^1 = c_{j^{\text{рег}}, k}$, $\delta_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} = d_{j^{\text{рег}}, k}$, $\mu = \overline{2, T}$, T – количество моделируемых компонент, $a_{j^{\text{рег}}, k}$ – остаточные ошибки модели μ -й компоненты, $N_{j^{\text{рег}}}^{\mu}$ – длина μ -й компоненты, $b_{j^{\text{рег}}, k}^1 = \varphi_{j^{\text{рег}}, k}$ – масштабирующая функция, $b_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} = \Psi_{j^{\text{рег}}, k}$, $\mu = \overline{2, T}$ – вейвлет-базис μ -й компоненты.

После идентификации пробного варианта модели необходимо получить *эффективные оценки параметров*. Следуя методам АРПСС [29], процедура оценивания параметров может быть осно-

вана на исследовании функции правдоподобия. В терминах предлагаемой модели для регулярной составляющей (4), при заданных величинах $\left(\left(\omega_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} \right)_{*}, \left(a_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} \right)_{*} \right)$, функция правдоподобия

для оцениваемых параметров $\left(\gamma_{j^{\text{рег}}, p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \theta_{j^{\text{рег}}, h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \sigma_{a_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu}} \right)$ имеет вид [29]:

$$l_{*}^{\mu} \left(\gamma_{j^{\text{рег}}, p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \theta_{j^{\text{рег}}, h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \sigma_{a_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu}} \right) = - N_{j^{\text{рег}}}^{\mu} \ln \sigma_{a_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu}} - \frac{S_{*}^{\mu} \left(\gamma_{j^{\text{рег}}, p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \theta_{j^{\text{рег}}, h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}} \right)}{2 \left(\sigma_{a_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu}} \right)^2},$$

где $l_{*}^{\mu} \left(\gamma_{j^{\text{рег}}, p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \theta_{j^{\text{рег}}, h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \sigma_{a_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu}} \right)$ – условная логарифмическая функция правдоподобия, $S_{*}^{\mu} \left(\gamma_{j^{\text{рег}}, p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \theta_{j^{\text{рег}}, h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}} \right)$ – условная сумма квадратов:

$$S_{*}^{\mu} \left(\gamma_{j^{\text{рег}}, p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \theta_{j^{\text{рег}}, h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}} \right) = \sum_{k=1}^{N_{j^{\text{рег}}}^{\mu}} \left(a_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} \right)^2 \times \left(\gamma_{j^{\text{рег}}, p_{j^{\text{рег}}}^{\mu}}, \theta_{j^{\text{рег}}, h_{j^{\text{рег}}}^{\mu}} / \left(\omega_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} \right)_{*}, \left(a_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} \right)_{*}, \omega_{j^{\text{рег}}, k}^{\mu} \right).$$

Заметим, согласно [29] оценки наименьших квадратов являются хорошим приближением к оценкам максимального правдоподобия, поэтому в предположении о нормальности можно изучать поведение условного правдоподобия, исследуя условную сумму квадратов.

Идентификация возмущенной составляющей ОМКМ. В периоды ионосферных возмущений произойдет изменение структуры временного ряда и, как следствие, возрастут остаточные ошибки регулярной составляющей ОМКМ (см. (1), (4)). Поэтому *операция выделения компонент модели* $\sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t)$ может быть основана на ана-

лизе ошибок составляющей модели $A^{\text{РЕГ}}(t)$,

определяемых в момент времени k с упреждением q как

$$a_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu} = s_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu,\text{факт}} - s_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu,\text{прогноз}},$$

где

$$q \geq 1, s_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu,\text{прогноз}} = \sum_{l=1}^{p_{j^{\text{пер}}}^{\mu}} \gamma_{j^{\text{пер}},l}^{\mu} \omega_{j^{\text{пер}},k+q-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{\text{пер}}}^{\mu}} \theta_{j^{\text{пер}},n}^{\mu} a_{j^{\text{пер}},k+q-n}^{\mu}.$$

Отсюда следует, что процедура выделения аномальных изменений в ионосферных данных, свидетельствующих о возникновении ионосферных возмущений, может быть основана на проверке условия

$$\varepsilon_{\mu} = \sum_{q=1}^{Q_{\mu}} \left| a_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu} \right| > T_{\mu},$$

где Q_{μ} – длина упреждения данных на основе модели μ -й компоненты; T_{μ} – пороговое значение μ -й компоненты, определяющее наличие аномалии в μ -й компоненте [15].

Основываясь на свойствах АРПСС [29], для компоненты $A^{\text{РЕГ}}(t)$ можно с заданной вероятностью получать упрежденные данные и оценить их доверительный интервал. В аномальные периоды ошибки $A^{\text{РЕГ}}(t)$, очевидно, выйдут за доверительный интервал. Поэтому процедура выделения ионосферных аномалий может быть основана на следующем алгоритме.

Алгоритм выделения аномальных изменений в параметрах ионосферы, основанный на анализе ошибок регулярной составляющей ОМКМ:

1. Загружаем в память данные, на основе КМА выполняем разложение до уровня $m = m^{\text{пер}}$, получаем их представление в виде (предполагается, что компоненты $\sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = 0$): $f(t) = f_{-m^{\text{пер}}}(t) + \sum_{j^{\text{пер}}} g_{j^{\text{пер}}}(t)$.

2. На основе предварительно оцененных моделей компонент $f_{-m^{\text{пер}}}(t) = \sum_{k=1, N_{-m^{\text{пер}}}^{\mu}} s_{-m^{\text{пер}},k}^1 \times b_{-m^{\text{пер}},k}^1(t)$ и

$$\sum_{j^{\text{пер}}} g_{j^{\text{пер}}}(t) = \sum_{\mu=2}^T \sum_{k=1, N_{-m^{\text{пер}}}^{\mu}} s_{j^{\text{пер}},k}^{\mu} b_{j^{\text{пер}},k}^{\mu}(t)$$

выполняем моделирование.

3. Вычисляем остаточные ошибки моделей:

$$a_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu} = s_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu,\text{факт}} - s_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu,\text{прогноз}}.$$

4. Периоды времени $[k+1, k+q]$, для которых

$$\varepsilon_{\mu} = \sum_{q=1}^{Q_{\mu}} |a_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu}| > T_{\mu},$$

принимает за аномальные.

Моделирование и анализ временного ряда параметров ионосферы. В обработке использовались данные критической частоты ионосферы foF2 станции «Паратунка» (52°58' с. ш. и 158°15' в. д.) за период с 1968 г. по 2013 г. Для определения степени геомагнитной возмущенности использовался К-индекс, рассчитанный на основе геомагнитных данных станции «Паратунка». С целью моделирования спокойного временного хода данных foF2 в оценках использовались временные интервалы относительно спокойного геомагнитного поля (суммарный за сутки К-индекс (ΣK) не превышал значения 24) и не содержащие сильных сейсмических событий на Камчатке (землетрясения с энергетическим классом $K_s \geq 12$, произошедшие в радиусе до 300 км от станции «Паратунка»). Учитывая сезонный характер ионосферного процесса, данные foF2 за разные сезоны моделировались отдельно. При получении оценок также учитывался уровень солнечной активности, который оценивался по среднемесячным значениям радиоизлучения на длине волны f10.7: значение $f10.7 < 100$ – активность была принята за низкую, в противном случае активность считалась высокой. КМА выполнялся по вейвлет-базису Добеши 3-го порядка, который был определен минимизацией погрешности аппроксимации [0]. Эксперименты показали, что регулярная составляющая ОМКМ имеет вид

$$A^{\text{РЕГ}}(t) = f_{-3}(t) + g_{-3}(t) + \sum_{j=-1}^{-2} g_j(t),$$

где $f_{-3}(t) = \sum_k s_{-3,k}^1 \Phi_{-3,k}(t)$, $g_{-3}(t) = \sum_k s_{-3,k}^2 \times \Psi_{-3,k}(t)$ – регулярные сглаженная и детализирующая компоненты; $g_j(t), j = -1, -2$ – детализирующие компоненты, принятые за шумовые.

В процессе идентификации были идентифицированы нижеследующие модели регулярных компонент, параметры которых зависят от сезона и уровня солнечной активности (СА) [15]:

– зимний сезон (высокая и низкая СА):

$$s_{-3,k}^1 = -0.62\omega_{-3,k-1}^1 - 0.63\omega_{-3,k-2}^1 + 0.36\omega_{-3,k-3}^1, s_{-3,k}^2 = -0.97\omega_{-3,k-1}^2 - 0.93\omega_{-3,k-2}^2;$$

– летний сезон (высокая СА):

$$s_{-3,k}^1 = -0.50\omega_{-3,k-1}^1 - 0.58\omega_{-3,k-2}^1, s_{-3,k}^2 = -0.88\omega_{-3,k-1}^2 - 0.80\omega_{-3,k-2}^2;$$

– летний сезон (низкая СА):

$$s_{-3,k}^1 = -0.83\omega_{-3,k-1}^1 - 0.73\omega_{-3,k-2}^1, s_{-3,k}^2 = -0.95\omega_{-3,k-1}^2 - 0.86\omega_{-3,k-2}^2.$$

Оценки на основе исследования функции максимального правдоподобия представлены в табл. 1 (анализируемый период 20.06.2001–08.07.2001 г.) и табл. 2 (анализируемый период 01.01.1991–23.01.1991 г.). Результаты диагностической проверки моделей [15], выполненные на осно-

ве применения совокупного критерия согласия, представлены в табл. 3 (зимний сезон) и табл. 4 (летний сезон). Полученные оценки (табл. 1–4) подтверждают адекватность построенных моделей.

Для проверки гипотезы о совпадении полученных моделей компонент $f_{-3}(t)$ и $g_{-3}(t)$ на различных временных интервалах применялась F-статистика Фишера [32]. Результаты проверки гипотезы о совпадении моделей компонент для зимнего и летнего сезонов представлены в табл. 5 (анализировались периоды с 15 января по 3 февраля 2006 г. и с 28 июня по 17 июля 2004 г.). Анализ табл. 5 показывает, что для компоненты $g_{-3}(t)$ может быть применена общая модель для летнего и зимнего сезонов. В случае компоненты $f_{-3}(t)$ гипотеза о совпадении моделей компонент летнего и зимнего сезонов отвергается. На примере летнего сезона (анализировались периоды с 20 июня по 07 июля 2001 г. и с 28 июня по 17 июля 2004 г.) была рассчитана F-статистика для проверки возможности применения общей модели для разных уровней солнечной активности в

Таблица 1

Регулярная сглаженная компонента $f_{-3}(t)$								
Второй параметр	Первый параметр							
	-0.65	-0.62	-0.59	-0.56	-0.53	-0.50	-0.47	-0.44
-0.65	102.46	102.00	101.86	102.05	102.57	103.41	104.57	106.06
-0.62	102.46	101.88	101.63	101.69	102.09	102.81	103.85	105.23
-0.59	102.81	102.10	101.73	101.68	101.95	102.55	103.48	104.73
-0.56	103.49	102.66	102.17	102.00	102.15	102.63	103.44	104.57
-0.53	104.51	103.57	102.95	102.66	102.69	102.73	103.74	104.75
-0.50	105.87	104.81	104.07	103.66	103.57	103.81	104.38	105.27
-0.47	107.57	106.38	105.53	105.00	104.79	104.91	105.35	106.12
-0.44	109.61	108.30	107.33	106.67	106.35	106.35	106.67	107.32
Регулярная детализирующая компонента $g_{-3}(t)$								
Второй параметр	Первый параметр							
	-0.99	-0.96	-0.93	-0.90	-0.87	-0.84	-0.81	-0.78
-0.89	31.00	31.23	31.66	32.29	33.12	34.15	35.39	36.82
-0.86	30.54	30.66	30.97	31.49	32.21	33.13	34.25	35.57
-0.83	30.29	30.29	30.49	30.90	31.50	32.31	33.32	34.53
-0.80	30.24	30.13	30.22	30.51	31.00	31.70	32.59	33.69
-0.77	30.39	30.17	30.15	30.32	30.71	31.29	32.07	33.06
-0.74	30.75	30.42	30.28	30.35	30.62	31.08	31.76	32.63
-0.71	31.32	30.87	30.62	30.58	30.73	31.09	31.65	32.40
-0.68	32.09	31.53	31.17	31.01	31.05	31.30	31.74	32.39
-0.65	33.07	32.39	31.92	31.65	31.58	31.71	32.04	32.58
-0.62	34.25	33.46	32.88	32.49	32.31	32.33	32.55	32.97

Таблица 2

Регулярная сглаженная компонента ПАР(3.1)					
Третий параметр = 0.36					
Второй параметр	Первый параметр				
	-0.72	-0.67	-0.62	-0.57	-0.52
-0.73	227.44	198.21	235.73	340.03	511.09
-0.68	179.94	117.39	121.60	192.58	330.32
-0.63	199.28	103.41	74.31	111.97	216.40
-0.58	285.47	156.28	93.87	98.21	169.33
-0.53	438.49	276.00	180.27	151.30	189.10
Третий параметр = 0.0					
	-0.72	-0.67	-0.62	-0.57	-0.52
-0.73	1066.80	1290.90	1581.80	1939.40	2363.80
-0.68	1273.20	1464.00	1721.50	2045.90	2437.00
-0.63	1546.40	1703.90	1928.10	2219.20	2576.90
-0.58	1886.50	2010.70	2201.60	2459.30	2783.70
-0.53	2293.40	2384.30	2541.90	2766.30	3057.40
Регулярная детализирующая компонента ПАР(2.1)					
	-0.97	-0.92	-0.87	-0.82	-0.77
-0.98	31.42	43.58	68.35	105.71	155.68
-0.93	37.27	43.15	61.63	92.72	136.40
-0.88	55.96	55.56	67.76	92.56	129.97
-0.83	87.49	80.81	86.73	105.25	136.37

Таблица 3

Высокая солнечная активность	Модель компоненты $f_{-3}(t)$	90- и 95 %-е квантили для χ^2 -распределения	Модель компоненты $g_{-3}(t)$	90- и 95 %-е квантили для χ^2 -распределения
15.12.1970–29.12.1970	18.36	24.8 / 27.6	28.44	26.0 / 28.9
07.02.1981–21.02.1981	22.68		17.28	
07.02.2002–25.02.2002	22.08		26.40	
05.12.2011–17.12.2011	8.10		7.20	
30.01.2012–11.02.2012	16.20		13.50	
04.02.2013–18.02.2013	25.90		23.76	
19.02.2016–05.03.2016	19.50		21.06	
Низкая солнечная активность	Модель компоненты $f_{-3}(t)$	90- и 95 %-е квантили для χ^2 -распределения	Модель компоненты $g_{-3}(t)$	90- и 95 %-е квантили для χ^2 -распределения
13.12.1983–29.12.1983	8.82	24.8 / 27.6	15.12	26.0 / 28.9
10.02.1985–28.02.1985	16.72		38.70	
05.01.2007–18.01.2007	26.52		5.780	

рамках одного сезона (табл. 6). Анализ табл. 6 показывает, что параметры компоненты $f_{-3}(t)$ зависят от уровня солнечной активности и не могут быть объединены в общую модель, в отличие от компоненты $g_{-3}(t)$.

На рис. 1 представлены результаты моделирования временного ряда критической частоты ионосферы foF2 за период 19.11.16–01.12.16 г. График *a* – регистрируемый временной ряд foF2

(станция «Паратунка»); *b* – моделирование сглаженной компоненты (*1* – фактические значения компоненты, *2* – модельные значения компоненты); *v* – ошибки модели сглаженной компоненты; *z* – моделирование детализирующей компоненты (*1* – фактические значения компоненты, *2* – модельные значения компоненты); *d* – ошибки модели детализирующей компоненты; *e* – К-индекс геомагнитной активности (станция «Паратунка»). Стрелкой отмечен момент возникновения сей-

Таблица 4

Высокая солнечная активность	Модель компоненты $f_{-3}(t)$	90- и 95 %-е квантили для χ^2 -распределения	Модель компоненты $g_{-3}(t)$	90- и 95 %-е квантили для χ^2 -распределения
21.06.1969–05.07.1969	9.36	26.0 / 28.9	21.60	26.0 / 28.9
03.06.1971–22.06.1971	27.26		17.39	
10.07.1990–28.07.1990	16.92		18.33	
13.08.2000–26.08.2000	44.20		12.92	
03.08.2002–17.08.2002	24.84		23.76	
06.07.2002–18.07.2002	5.40		14.10	
15.06.2016–27.06.2016	20.70		21.90	
Низкая солнечная активность	Модель компоненты $f_{-3}(t)$	90- и 95 %-е квантили для χ^2 -распределения	Модель компоненты $g_{-3}(t)$	90- и 95 %-е квантили для χ^2 -распределения
25.06.1987–06.07.1987	9.45	26.0 / 28.9	8.64	26.0 / 28.9
09.08.2010–22.08.2010	16.02		20.30	

Таблица 5

Модель компоненты $f_{-3}(t)$	Модель компоненты $g_{-3}(t)$	Критические значения F	
		для уровня значимости $p \leq 0.01$	для уровня значимости $p \leq 0.05$
33.3	23.42	26.23	8.56

Таблица 6

Модель компоненты $f_{-3}(t)$	Модель компоненты $g_{-3}(t)$	Критические значения F	
		для уровня значимости $p \leq 0.01$	для уровня значимости $p \leq 0.05$
55.46	6.1	26.23	8.56

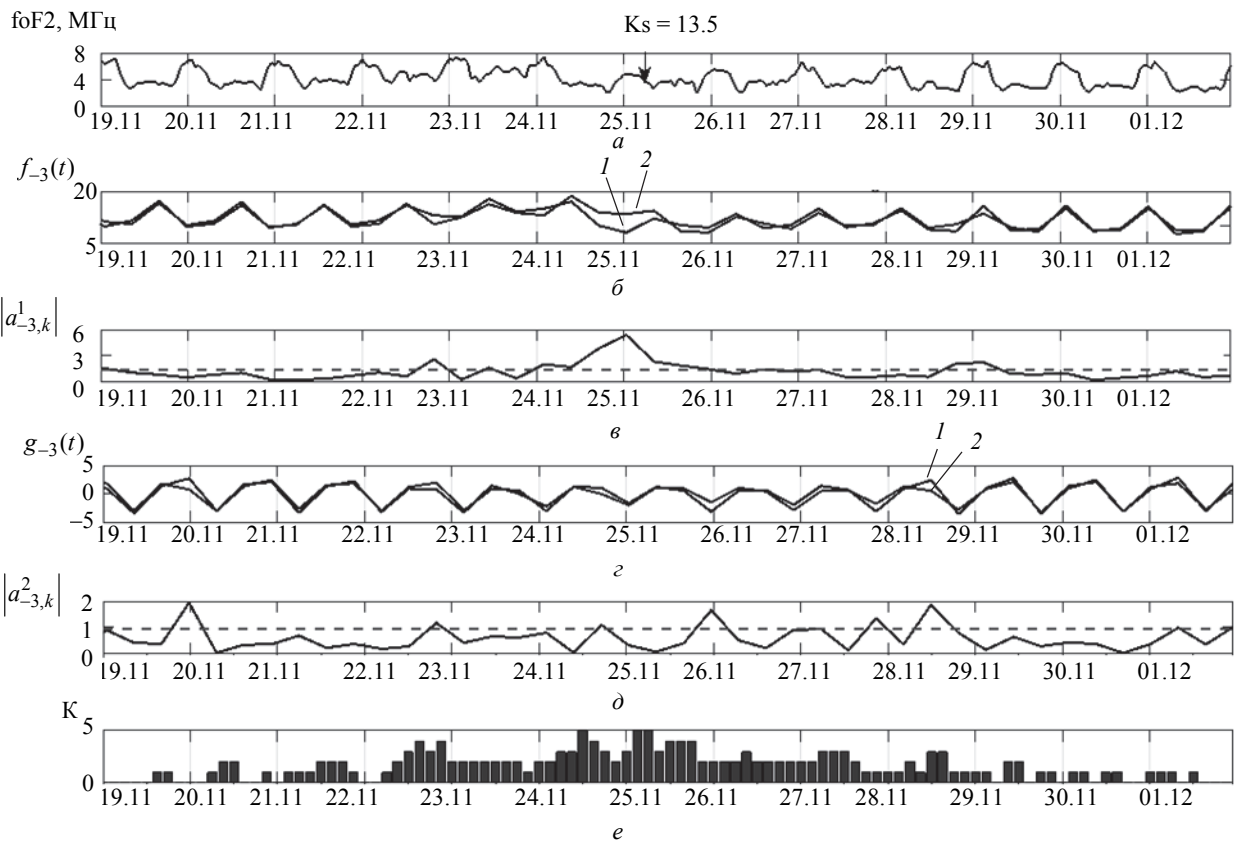


Рис. 1

смического события, произошедшего 25 ноября 2016 г. в 07:26 UT с энергетическим классом $K_s = 13.5$ (рис. 1, *a*). Анализ рис. 1 показывает, что в периоды спокойной ионосферы (отсутствуют землетрясения, К-индекс < 3) ошибки полученной модели не выходят за границы доверительных интервалов (рис. 1, *в*, *д*, доверительные интервалы показаны пунктирной линией), что подтверждает ее адекватность. В возмущенные периоды, обусловленные повышением геомагнитной и сейсмической активностей, ошибки модели возрастают и выходят за пределы доверительных интервалов (СО), что свидетельствует об аномальных изменениях в данных foF2. Наиболее существенное возрастание ошибок: более 4 СО для компоненты $f_{-3}(t)$, более 1.5 СО для компоненты $g_{-3}(t)$ наблюдается в период с 24 по 26 ноября. Возрастание ошибок детализирующей компоненты $g_{-3}(t)$ 20 ноября, возникшее на фоне спокойных геомагнитных условий, возможно, обусловлено присутствием двух корональных дыр на видимом диске Солнца (<http://ipg.geospace.ru/>).

На рис. 2 представлены результаты выделения аномальных изменений в данных foF2 на основе ОМКМ и модели ИРИ [19] (станция «Паратунка», анализируемый период 12.02.2016 – 22.02.2016 г). График *a* – регистрируемый временной ряд foF2 (станция «Паратунка»); *б* – ошибки модели сглаженной компоненты; *в* – ошибки модели детализирующей компоненты; *г* – ошибки ИРИ; *д* – К-индекс геомагнитной активности (станция «Паратунка»). В периоды спокойной ионосферы ошиб-

ки ОМКМ по сравнению с ИРИ являются белым шумом (подтверждается результатами диагностики), что свидетельствует об адекватности ОМКМ. В период повышения геомагнитной активности, с 14 по 20 февраля 2016 г. (рис. 2, *д*), ошибки ОМКМ возрастают и выходят за их доверительные интервалы (рис. 2, *б*, *в*, доверительные интервалы показаны пунктирной линией). Период сильной магнитной бури с 16 по 19 февраля сопровождается наиболее существенным возрастанием ошибок, которое составило более 3.5 СО для компоненты $f_{-3}(t)$ и 2.5 СО для компоненты $g_{-3}(t)$. Наличие доверительных интервалов ОМКМ позволяет фиксировать аномалию в ионосфере, что затруднительно выполнить для ИРИ. Возрастание ошибок ИРИ наблюдается как в период возмущенного, так и в период спокойного геомагнитного поля (с 21:00 до 08:00 UT). Данные результаты подтверждают эффективность предлагаемой ОМКМ.

Результаты исследования показали, что предлагаемая в работе обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы (ОМКМ) и основанные на ее использовании алгоритмы анализа данных позволяют детально изучать динамику ионосферного процесса как в условиях спокойной ионосферы, так и в возмущенные периоды (периоды повышенной солнечной и геомагнитной активности, а также периоды повышенной сейсмической активности на Камчатке). На примере обработки данных станции «Паратунка» (Камчатский край, регистрацию данных выпол-

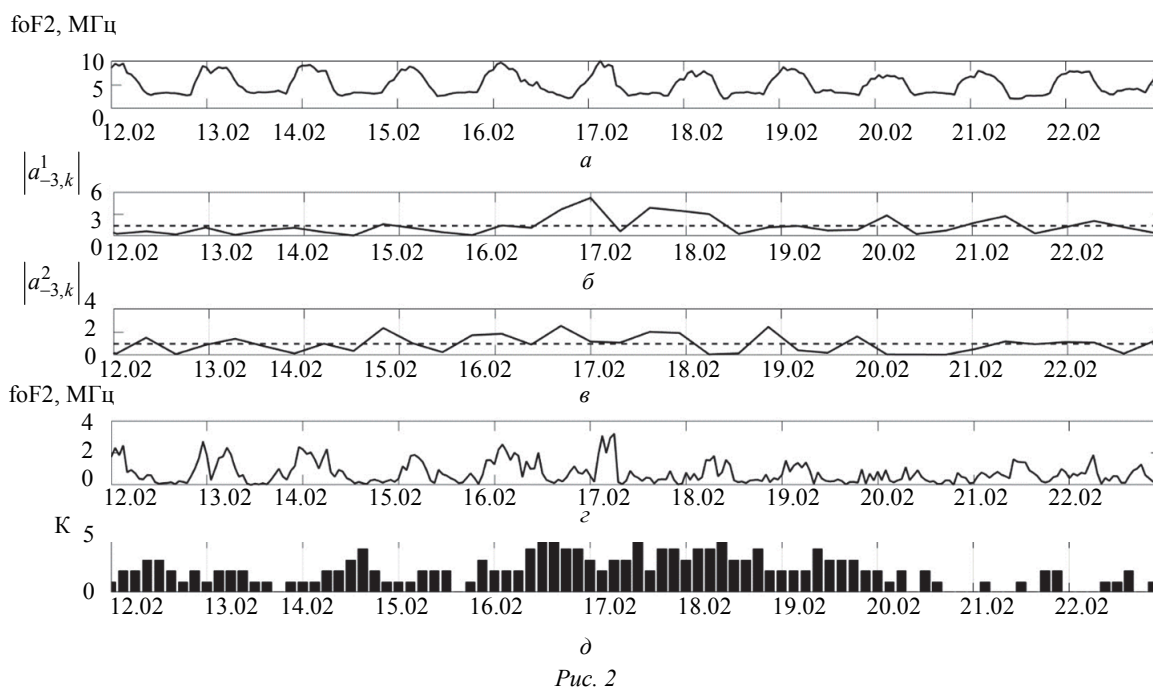


Рис. 2

няет ИКИР ДВО РАН) рассмотрен процесс идентификации модели и доказана ее адекватность. Сопоставление ОМКМ с международной эмпирической ИРИ-моделью показало эффективность предлагаемого подхода и возможность его использования в задачах выделения и оценки интенсивности ионосферных неоднородностей, наблюдаемых на фоне повышенной солнечной активности и сильных магнитных бурь. Реализация ОМКМ в режиме реального времени (по мере поступления данных в систему) обеспечивает возможность ее использования в задачах опера-

тивного прогноза космической погоды и выделения периодов возникновения ионосферных бурь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №14-11-00194. Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим регистрацию ионосферных данных, которые использовались в работе, а также выражают признательность сотрудникам Камчатского филиала геофизической службы РАН, обеспечивающим качество регистрации сейсмических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / ГУ НУ РВХ ВСНЦ СО РАН. Иркутск, 2006. 480 с.
2. Ботова М. Г., Романовская Ю. В., Намгаладзе А. А. Вариации ионосферы: сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений // Вестн. МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 385–393.
3. Благовещенский Д. В., Калишин А. С. Механизм возрастания критической частоты ионосферы до начала суббури // Геомагнетизм и аэрномия. 2009. Т. 49, № 3. С. 213–223.
4. Космическая среда вокруг нас / Н. Будько, А. Зайцев, А. Карпачев и др. Троицк: ТРОВАНТ, 2006. 232 с.
5. Данилов А. Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 5. С. 1–33.
6. Первалова Н. П. Исследование ионосферных возмущений методом трансionoсферного GPS-зондирования: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Ин-т солнечно-земной физики СО РАН. Иркутск, 2014.
7. Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji // Japan J. of the National Institute of Information and Communications Technology. 2009. Vol. 56. P. 391–406.
8. Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Advances in Space Research. 2013. Vol. 52(3). P. 343–366.
9. Мандрикова О. В., Богданов В. В., Полозов Ю. А. Моделирование сигнала критической частоты на основе нейронных сетей с целью поиска аномального поведения // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2006): сб. докл. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. Т. 2. С. 158–160.
10. Анализ и интерпретация геофизических параметров на основе многокомпонентных моделей / О. В. Мандрикова, Ю. А. Полозов, В. В. Богданов, В. В. Геппенер. Владивосток: Дальнаука, 2013. 192 с.
11. Мандрикова О. В., Богданов В. В., Соловьев И. С. Вейвлет-анализ данных магнитного поля Земли // Геомагнетизм и аэрномия. 2013. Т. 53, № 2. С. 282–288.
12. Magnetic and ionospheric observations in the Far Eastern region of Russia during the magnetic storm of 5. / D. G. Baishev, A. V. Moiseyev, R. N. Boroyev, S. E. Kobyakova, A. E. Stepanov, O. V. Mandrikova, I. S. Solovev, S. Yu. Khomutov, Yu. A. Polozov, A. Yoshikawa, K. Yumoto // Sun and Geosphere. 2015. Vol. 10, № 2. P. 133–140.
13. Mandrikova O. V., Solovev I. S., Zalyaev T. L. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // Earth Planet Space. 2014. Vol. 66, № 1. doi:10.1186/s40623-014-0148-0.
14. Ionospheric parameter modeling and anomaly discovery by combining the wavelet transform with autoregressive models / O. V. Mandrikova, N. V. Fetisova (Glushkova), R. T. Al-Kasasbeh, D. M. Klionskiy, V. V. Gep-pener, M. Y. Ilyash // Annals of Geophysics. 2015. Vol. 58. doi:10.4401/ag-6729.
15. 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 / 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.
16. Mandrikova O. V., Fetisova N. V., Polozov Yu. A. Ionospheric parameter analysis and discovery of anomaly during ionospheric storms // Proc. of the 11th Intern. School and Conf. «Problems of Geocosmos», St. Petersburg, Russia, Oct. 03–07, 2016. Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. P. 262–270.
17. Соломенцев Д. В., Хаттатов Б. В., Титов А. А. Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы для европейского региона // Геомагнетизм и аэрномия. 2013. Т. 53, № 1. С. 78–90.
18. Глобальная спутниковая модель высоты максимума слоя F2 / В. Н. Шубин, А. Т. Карпачев, В. А. Телегин, К. Г. Цыбуля // Геомагнетизм и аэрномия. 2015. Т. 5, № 5. С. 623.

19. Bilitza D., Reinisch B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvement and new parameters // Advances in space research. 2008. Vol. 42. P. 599–609.
20. Wavelet analysis of ionospheric disturbances / M. Hamoudi, N. Zaourar, R. Mebarki, L. Briquieu, M. Parrot // Geophysical Research Abstracts. 2009. Vol. 11. P. 8523.
21. Seismo-ionospheric anomalies detection based on integrated wavelet / L. He, L. Wu, S. Liu, B. Ma // 2011 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vancouver BC, 2011. P. 1834–1837.
22. Ionospheric electron content anomalies detected by a FORMOSAT-3/COSMIC empirical model before and after the Wenchuan Earthquake / Y. Kakinami, J. Liu, L. Tsai, K. Oyama // Intern. J. of Remote Sensing. 2010. Vol. 31(13). P. 3571–3578.
23. Mansilla G. A. Ionospheric effects of an intense geomagnetic storm / Studia Geophysica et Geodaetica. 2007. Vol. 51(4). P. 563–574.
24. 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.
25. Predicting foF2 in the China region using the neural networks improved by the genetic algorithm / R. Wang, C. Zhou, Z. Deng, B. Ni, Z. Zhao // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. Vol. 92. P. 7–17.
25. Сравнение критической частоты foF2 по данным ионозондов, ассимиляционной модели ионосферы ФГБУ ЦАО и эмпирической модели IRI над территорией РФ / А. А. Титов, Д. В. Соломенцев, В. У. Хаттатов, Б. В. Хаттатов, В. И. Денисова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 255–263.
26. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 672 с.
27. Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001. 412 с.
28. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 604 с.
29. Привальский В. Е., Панченко В. А., Асарина Е. Ю. Модели временных рядов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 772 с.
30. Мандрикова О. В., Фетисова Н. В., Геппенер В. В. Многокомпонентная модель временного ряда параметров ионосферы // XX Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 239–242.
31. Боровков А. А. Математическая статистика. Новосибирск: Наука; Изд-во Ин-та математики, 1997. 772 с.

O. V. Mandrikova, N. V. Fetisova

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation

V. V. Geppener

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

GENERALIZED MULTICOMPONENT MODEL OF IONOSPHERIC PARAMETER TIME SERIES

A generalized multicomponent model of ionospheric parameter time series (GMCM) was proposed. The model offers the possibility to represent the regular time course of the parameters and to detect the anomalous periods in the data. The model identification is based on the joint application of the wavelet transform and the autoregressive-integrated moving average models (ARIMA). The GMCM identification was carried out on the basis of hourly data on the ionospheric critical frequency (foF2) of the Paratunka station (IKIR FEB RAS, Kamchatka) for different seasons and solar activity levels. The comparison of the obtained GMCM-models with the Empiric International Reference IRI model for the analyzed station has shown the efficiency of the proposed model. The modeling results have shown high efficiency of the model for detecting ionospheric anomalies occurring on the eve and during ionospheric storms. The research was supported by the RNF Grant № 14-11-00194.

Wavelet-transform, autoregression models, ionospheric parameters, anomalies