# Моделирование и анализ природных временных рядов на основе обобщенной многокомпонентной модели\*

## О.В. Мандрикова, Н.В. Фетисова, Ю.А. Полозов

oksanam1@mail.ru; nv.glushkova@ya.ru; up\_agent@mail.ru

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, 684034, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная 7

Предложена обобщенная многокомпонентная модель природного временного ряда сложной структуры (OMKM), позволяющая описать иррегулярные вариации данных. Рекуррентная составляющая модели имеет параметрический вид и описывает регулярный временной ход данных. Аномальные компоненты модели имеют вид нелинейных аппроксимирующих схем и описывают иррегулярные изменения. На примере временных рядов критической частоты F2-слоя ионосферы по данным мировой сети ионосферных станций описана реализация модели и показаны результаты ее применения. Приведено сравнение с международной эмпирической моделью ИРИ, подтвердившее эффективность ОМКМ для автоматического обнаружения аномальных изменений данных в периоды ионосферных бурь. Результаты исследования важны в задачах геофизического мониторинга и оперативного прогноза космической погоды.

**Ключевые слова**: Модель временного ряда; вейвлет-преобразование; авторегрессионные модели; параметры ионосферы; аномалии

**DOI:** 10.21469/22233792.4.2.01

#### 1 Введение

Работа направлена на построение методов моделирования и анализа природных временных рядов сложной структуры и создание на их основе автоматизированных программных систем. В статье рассматривается задача, связанная с моделированием временных рядов параметров ионосферы и обнаружением аномальных изменений данных, характеризующих возникновение ионосферных возмущений. Временной ряд параметров ионосферы имеет сложную нестационарную структуру, включает суточные и сезонные составляющие, определяемые солнечной активностью и геомагнитными условиями, а также географическим положением станции регистрации данных (полярная и авроральная зоны, среднеширотные и экваториальные области) [1–5]. В возмущенные периоды вследствие резкого изменения электронной плотности в ионосфере формируются неоднородности (возмущения), имеющие различную длительность и интенсивность [6–8]. Ионосферные возмущения возникают в случайные моменты времени, могут иметь положительную и отрицательную фазы [3,5] и в регистрируемых параметрах проявляются в виде аномальных особенностей различной структуры и длительности. Интенсивные и длительные ионосферные возмущения вызывают серьезные нарушения в работе современных наземных и космических технических средств [1,2,5], поэтому их своевременное обнаружение весьма важно [1, 2, 5, 9]. Сложная нестационарная структура регистрируемых ионосферных данных не позволяет применять традиционные методы моделирования и анализа (регрессионные, сглаживающие, спектральные, ARIMA [10,11] и др.), которые не могут адекватно описать динамику параметров ионосферы. Точность современных моделей (эмпирические [12, 13],

<sup>\*</sup>The research was supported by a grant of Russian Science Foundation No 14-11-00194.

нейросетевые [14–17]) во многом зависит от наличия качественных входных данных, что не всегда реализуемо и не позволяет их применять в оперативном анализе.

В данной работе для моделирования временных рядов параметров ионосферы используется разработанная авторами обобщенная многокомпонентная модель [9, 18], которая позволяет описать регулярные вариации параметров ионосферы и аномальные изменения, возникающие в периоды ионосферных возмущений. Идентификация ОМКМ основана на комплексном подходе, объединяющем методы вейвлет-преобразования и ARIMA модели. Используемый подход впервые предложен в работе [9], в данной статье приведена численная реализация модели и результаты ее применения. Использовались данные критической частоты F2-слоя ионосферы (foF2). В работе также приведено сравнение OMKM с международной справочной эмпирической моделью ИРИ (IRI, International Reference Ionosphere) [13,19], подтвердившее перспективность предлагаемого подхода. Предлагаемая OMKM в отличие от аналогов позволяет в автоматическом режиме выделить аномальные изменения данных и оценить их характеристики.

## 2 Обобщенная многокомпонентная модель временного ряда параметров ионосферы

Временной ряд параметров ионосферы имеет регулярную и аномальную составляющие и может быть представлен в виде обобщенной многокомпонентной модели:

$$f(t) = R(t) + U(t) + e(t) = \sum_{\mu=1,\dots,T} \alpha^{\mu}(t) + \sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t) + e(t).$$
(1)

где  $R(t) = \sum_{\mu=1,...,T} \alpha^{\mu}(t) (\mu = 1, ..., T$ – номер компоненты) – рекуррентная составляющая, описывает регулярные вариации параметров ионосферы (в периоды отсутствия возмущений в ионосфере) и включает компоненты  $\alpha^{\mu}(t)$ , определяемые уровнем солнечной активности, геомагнитными условиями и местом регистрации данных (географические координаты);  $U(t) = \sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t)$  – иррегулярная (аномальная) составляющая, включает разномасштабные компоненты  $\beta^{\eta}_{\text{возм}}(t)$ , имеющие случайную природу и возникающие в периоды ионосферных возмущений (предполагается, что в случае регулярных изменений данных составляющая U(t) = 0); e(t) – случайная составляющая, включающая помехи искусственного происхождения (например, запуски ракет, промышленные взрывы и др.), а также аппаратные сбои.

#### 2.1

На основе кратномасштабных вейвлет-разложений (KMA [20, 21]) рекуррентная составляющая R(t) модели (1) может быть представлена в виде [9, 18]

$$R(t) = f_{-m^{\text{per}}}(t) + \sum_{j^{\text{per}}} g_{j^{\text{per}}}(t), \qquad (2)$$

где  $f_{-m^{\text{per}}}(t) = \sum_{k} c_{-m^{\text{per}},k} \varphi_{-m^{\text{per}},k}(t)$  – сглаженная компонента (тренд) временного ряда масштаба  $m^{\text{per}}$ , коэффициенты  $c_{-m^{\text{per}},k} = \langle f, \varphi_{-m^{\text{per}},k} \rangle$ , масштабирующая функция  $\varphi_{-m^{\text{per}},k}(t) = 2^{\frac{-m^{\text{per}}}{2}} \varphi \left(2^{-m^{\text{per}}}t-k\right), \quad f_{-m^{\text{per}}} \in V_{-m^{\text{per}}}, \quad V_{-m^{\text{per}}} = clos_{L^2(R)} \left(2^{\frac{-m^{\text{per}}}{2}} \varphi \left(2^{-m^{\text{per}}}t-k\right)\right) : k \in \mathbb{Z}, \quad g_{j^{\text{per}}}(t) = \sum_{k} d_{j^{\text{per}},k} \Psi_{j^{\text{per}},k}(t)$  – детализирующая компонента масштаба  $j = -j^{\text{per}}$ , коэффициенты которой  $d_{j^{\text{per}},k} = \langle f, \Psi_{j^{\text{per}},k} \rangle$  характеризуют амплитуду колебания (величину отклонения от тренда) в момент времени t = k,

 $g_{j^{\text{per}}} \in W_{j^{\text{per}}}, \ W_{j^{\text{per}}} = \text{clos}_{L^{2}(R)} \left( 2^{\frac{j^{\text{per}}}{2}} \Psi \left( 2^{j^{\text{per}}} t - k \right) \right) : k \in \mathbb{Z}, \ \Psi_{j^{\text{per}},k} \left( t \right) = 2^{\frac{j^{\text{per}}}{2}} \Psi \left( 2^{j^{\text{per}}} t - k \right) -$ базисный вейвлет.

В случае стационарности компонент  $f_{-m^{\text{per}}}(t)$  и  $g_{j^{\text{per}}}(t)$ , оценка их параметров может быть выполнена на основе ARIMA методов [10], и справедливо соотношение

$$\omega_{-m^{\mathrm{per}},k}(t) = \gamma_{-m^{\mathrm{per}},1}\omega_{-m^{\mathrm{per}},k-1} + \dots + \gamma_{-m^{\mathrm{per}},p}\omega_{-m^{\mathrm{per}},k-p} - \theta_{-m^{\mathrm{per}},1}a_{-m^{\mathrm{per}},k-1} - \dots - \theta_{-m^{\mathrm{per}},h}a_{-m^{\mathrm{per}},k-h},$$
(3)

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

$$\omega_{j^{\text{per}},k}(t) = \gamma_{j^{\text{per}},1}\omega_{j^{\text{per}},k-1} + \dots + \gamma_{j^{\text{per}},p_{j^{\text{per}}}}\omega_{-m,k-p_{j^{\text{per}}}} - \\ -\theta_{j^{\text{per}},1}a_{j^{\text{per}},k-1} - \dots - \theta_{j^{\text{per}},h_{j^{\text{per}}}}a_{j^{\text{per}},k-h_{j^{\text{per}}}},$$
(4)

где  $\omega_{j^{\text{per}},k} = \nabla^{\nu_{j^{\text{per}}}} d_{j^{\text{per}},k}, \nabla^{\nu_{j^{\text{per}}}}$  – оператор взятия разности порядка  $\nu_{j^{\text{per}}}, p_{j^{\text{per}}}, \gamma_{j^{\text{per}},1}...\gamma_{j^{\text{per}},p_{j^{\text{per}}}}$  – порядок и параметры авторегрессии детализирующей компоненты с разрешением  $j^{\text{per}}, h_{j^{\text{per}}}, \theta_{j^{\text{per}},1}...\theta_{j^{\text{per}},h_{j^{\text{per}}}}$  – порядок и параметры скользящего среднего детализирующей компоненты с разрешением  $j^{\text{per}}, a_{j^{\text{per}},k}$  – остаточные ошибки модели детализирующей компоненты с разрешением  $j^{\text{per}}$ .

Путем объединения моделей компонент (3) и (4) получаем представление R(t) в виде

$$R(t) = \sum_{\mu=1,...,T} \sum_{k=1,...,N_{j^{\text{per}},k}} s_{j^{\text{per}},k}^{\mu} b_{j^{\text{per}},k}^{\mu}(t) , \qquad (5)$$

где  $s_{j^{\text{per}},k}^{\mu}(t) = \sum_{l=1}^{p_{j^{\text{per}}}^{\mu}} \gamma_{j^{\text{per}},l}^{\mu} \omega_{j^{\text{per}},k-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{\text{per}},n}^{\mu}} a_{j^{\text{per}},k-n}^{\mu}$  – оценочное значение регулярной  $\mu$ -ой компоненты,  $p_{j^{\text{per}},n}^{\mu}$ ,  $\gamma_{j^{\text{per}},l}^{\mu}$  – порядок и параметры авторегрессии  $\mu$ -ой компоненты,  $h_{j^{\text{per}},k}^{\mu}$  – порядок и параметры скользящего среднего  $\mu$ -ой компоненты,  $\omega_{j^{\text{per}},k}^{\mu} = \nabla^{\nu^{\mu}} \delta_{j^{\text{per}},k}^{\mu}$ ,  $\nu^{\mu}$  – порядок разности  $\mu$ -ой компоненты,  $\delta_{j^{\text{per}},k}^{1} = c_{j^{\text{per}},k}$ ,  $\delta_{j^{\text{per}},k}^{\mu} = d_{j^{\text{per}},k}$ ,  $\mu = 2, ..., T, T$  – количество моделируемых компоненты,  $b_{j^{\text{per},k}}^{1} = \varphi_{j^{\text{per},k}}$  – масштабирующая функция,  $b_{j^{\text{per},k}}^{\mu} = \Psi_{j^{\text{per},k}}$ ,  $\mu = 2, ..., T$  – вейвлет-базис  $\mu$ -ой компоненты.

2.2

Поскольку компоненты  $\beta^{\eta}_{\text{возм}}(t)$  иррегулярной составляющей U(t) модели (1) имеют локальную структуру, наиболее эффективным способом их описания является применение нелинейных адаптивных аппроксимирующих схем [22], и справедливо соотношение [23]:

$$U(t) = \sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = \sum_{(\eta,n)\in P_M} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{(\eta,n)\notin P_M} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t) = U_M(t) + e(t), \tag{6}$$

где  $U_M(t) = \sum_{(\eta,n)\in P_M} \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle \Psi_{\eta,n}(t)$  – проекция U(t) на M векторов, индексы которых содержатся в некотором множестве  $P_M$ ; компонента  $e(t) = \sum_{(\eta,n)\notin P_M} \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle \Psi_{\eta,n}(t)$  – следствие влияния шумового фактора (предполагается, что данная компонента некоррелированная и аддитивная). Идентификация компоненты  $U_M(t)$  может быть основана на применении пороговых функций [20,24]

$$U_M(t) = \begin{cases} \sum_{\eta,n} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t), \text{ если } |d_{\eta,n}| \ge T_\eta, \\ 0, \text{ если } |d_{\eta,n}| < T_\eta. \end{cases}$$
(7)

Учитывая существенную нестационарность моделируемого временного ряда в работе введены адаптивные пороги  $T_{\eta} = T_{\eta}^{\text{ад}}$  и коэффициенты  $\{d_{\eta,n}\}_{(\eta,)\in P_{M}}$  в соотношении (7) приняты равными [23]

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^+, \text{ если} \left( d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med} \right) \geqslant T_{\eta}^{\mathrm{ad}}, \\ d_{\eta,n}^-, \text{ если} \left( d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med} \right) \leqslant -T_{\eta}^{\mathrm{ad}}, \end{cases}$$
(8)

где  $T_{\eta}^{\mathrm{ad}} = V * St_{\eta}$ , величина  $St_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{n=1}^{\Phi} \left( d_{\eta,n} - \overline{d_{\eta,n}} \right)^2}$ ,  $\overline{d_{\eta,n}}$  и  $d_{\eta,n}^{med}$  – среднее значение и медиана, соответственно, которые с учетом суточного хода ионосферных данных вычис-

медиана, соответственно, которые с учетом суточного хода ионосферных данных вычисляются в рамках скользящего временного окна длины Ф.

Поскольку амплитуда вейвлет-коэффициента  $|d_{\eta,n}|$  характеризует амплитуду аномальной особенности на масштабе  $\eta$  (см. [20]), ее логично определить в качестве *меры интенсивности аномалии на масштабе*  $\eta$ . Интенсивность аномалии в момент времени t = nопределим как

$$I_n = \sum_{\eta} \frac{|d_{\eta,n}|}{\|d_{\eta,n}\|_2},$$
(9)

где  $\|d_{\eta,n}\|_2 = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_\eta} (d_{\eta,n})^2}$ ,  $N_\eta$  – длина ряда на масштабе  $\eta$ .

Учитывая разномасштабную структуру компонент  $\beta_{\text{возм}}^{\eta}(t)$ , разобьём множество пар индексов  $P_M$  (см. соотн. (6)) на два подмножества  $P_{M_1} = \{(\eta, n)\}_{\eta \leq \eta_1}$  и  $P_{M_2} = \{(\eta, n)\}_{\eta > \eta_1}$ ,  $P_M = P_{M_1} \cup P_{M_2}$ . Тогда *иррегулярная составляющая* U(t) модели (1) примет вид

$$U(t) = \sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = \sum_{(\eta,n)\in P_{M_1}} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{(\eta,n)\in P_{M_2}} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t) + e(t) = A_{\text{крат}}(t) + A_{\text{длит}}(t) + e(t).$$
(10)

где компонента  $A_{\text{крат}}(t) = \sum_{(\eta,n)\in P_{M_1}} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t)$ описывает мелкомасштабные аномальные из-

менения, наблюдаемые в периоды солнечных вспышек, геомагнитных возмущений и техногенного воздействия, а компонента  $A_{\text{длит}}(t) = \sum_{(\eta,n) \in P_{M_2}} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t)$  описывает крупномасштабные аномальные изменения, наблюдаемые в периоды длительных ионосферных бурь.

Предполагая, что в периоды длительных аномальных изменений  $(A_{\text{длит}}(t) \neq 0)$  произойдет изменение структуры временного ряда и, как следствие, возрастут остаточные ошибки  $a_{j^{\text{per}},k}^{\mu}$  рекуррентной составляющей R(t) модели (см. соотн. (5)), идентификация компонент $A_{\text{длит}}(t)$  (см. (10)) может быть основана на проверке условия

$$\varepsilon_{j^{\text{per}}}^{\mu} = \sum_{q=1}^{Q_{\mu}} \left| a_{j^{\text{per}},k+q}^{\mu} \right| > H_{\mu,j^{\text{per}}},$$
(11)

где  $a_{j^{\text{per}},k+q}^{\mu} = s_{j^{\text{per}},k+q}^{\mu,\text{факт}} - s_{j^{\text{per}},k+q}^{\mu,\text{модель}}$ , где  $q \ge 1$  – шаг упреждения данных,  $s_{j^{\text{per}},k+q}^{\mu,\text{модель}} = \sum_{l=1}^{p_{j^{\text{per}}}^{\mu}} \gamma_{j^{\text{per}},l}^{\mu} \omega_{j^{\text{per}},k+q-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{\text{per}}}^{\mu}} \theta_{j^{\text{per}},n}^{\mu} a_{j^{\text{per}},k+q-n}^{\mu}$ ,  $Q_{\mu}$  – длина упреждения данных на основе модели  $\mu$ -ой компоненты,  $H_{\mu,j^{\text{per}}}$  – пороговое значение  $\mu$ -ой компоненты, определяющее наличие аномальных изменений в  $\mu$ -ой компоненте.

Пороговое значение  $H_{\mu,j^{\text{per}}}$  в (11), следуя работе [10], может быть оценено как

$$H_{\mu,j^{\text{per}}}(Q_{\mu}) = u_{\frac{\epsilon}{2}} \left\{ 1 + \sum_{q=1}^{Q_{\mu}-1} \left( \psi_{j^{\text{per}},q}^{\mu} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \sigma_{a_{j^{\text{per}},k+q}^{\mu}},$$
(12)

где  $u_{\frac{\xi}{2}}$  – квантиль уровня  $(1-\frac{\xi}{2})$  стандартного нормального распределения,  $\sigma_{a_{j^{\mathrm{per}},k+q}^{\mu}}$  – дисперсия остаточных ошибок модели  $\mu$ -й компоненты,  $\psi_{j^{\mathrm{per}},q}^{\mu}$  – весовые коэффициенты модели  $\mu$ -ой компоненты, которые определяются из соотношения [10]:

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

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

Поскольку амплитуда ошибки  $|a_{j^{\text{per}},k}^{\mu}|$  характеризует на масштабе  $j^{\text{per}}$  величину отклонения фактического значения функции от ее характерного значения (см. соотн. (11)), интенсивность аномалии на масштабе  $j^{\text{per}}$  в период  $t = k+1, ..., k+Q_{\mu}$  может быть оценена как

$$Y^{\mu}_{j^{\text{per}};k+1,k+Q_{\mu}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{Q_{\mu}} \sum_{q=1}^{Q_{\mu}} \left(a^{\mu}_{j^{\text{per}},k+q}\right)^2}}{H_{\mu,j^{\text{per}}}}.$$
(13)

#### 3 Реализация модели и результаты ее применения

Оценка параметров регулярной составляющей R(t) модели (см. соотн. (5)) выполнялась с использованием часовых (период 1968 – 2013 гг.) и 15-минутных (период 2015 – 2018 гг.) данных критической частоты ионосферы (foF2) станции «Паратунка» (52°58'СШ и 158°15' ВД). Вейвлет-разложение (КМА) выполнялось по вейвлет-базису Добеши 3-го порядка, который определен путем минимизации погрешности аппроксимации [9]. На этапе идентификации использовались данные foF2, регистрируемые в периоды спокойных геомагнитных условий (отсутствовали геомагнитные бури), и не содержащие сильных сейсмических событий на Камчатке. 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. Результаты идентификации показали, что:

1. Для часовых данных

$$R(t) = \sum_{\mu=1,2} \sum_{k=1,\dots,N_{-3}^{\mu}} s_{-3,k}^{\mu} b_{-3,k}^{\mu} + e(t) ,$$

где  $s_{-3,k}^{\mu}(t) = \sum_{l=1}^{p_{-3}^{\mu}} \gamma_{-3,l}^{\mu} \omega_{-3,k-l}^{\mu} + a_{-3,k}^{\mu}(t), j = -3$  соответствует 3-му уровню вейвлетразложения (уровень разложения определялся на основе алгоритма [9]):

- зимний сезон (высокая и низкая СА):

 $s_{-3,k}^{1} = -0.62 \cdot \omega_{-3,k-1}^{1} - 0.63 \cdot \omega_{-3,k-2}^{1} + 0.36 \cdot \omega_{-3,k-3}^{1} + a_{-3,k}^{1}(t)$  – оценочное значение компоненты  $f_{-3}(t); s_{-3,k}^{2} = -0.97 \cdot \omega_{-3,k-1}^{2} - 0.93 \cdot \omega_{-3,k-2}^{2} + a_{-3,k}^{2}(t)$  – оценочное значение компоненты  $g_{-3}(t)$ .

- летний сезон высокая СА:  $s_{-3,k}^1 = -0.50 \cdot \omega_{-3,k-1}^1 - 0.58 \cdot \omega_{-3,k-2}^1 + a_{-3,k}^1(t)$  – оценочное значение компоненты  $f_{-3}(t)$ ;  $s_{-3,k}^2 = -0.88 \cdot \omega_{-3,k-1}^2 - 0.80 \cdot \omega_{-3,k-2}^2 + a_{-3,k}^2(t)$  – оценочное значение компоненты  $g_{-3}(t)$ . - летний сезон низкая СА:

 $s_{-3,k}^1 = -0.83 \cdot \omega_{-3,k-1}^1 - 0.73 \cdot \omega_{-3,k-2}^1 + a_{-3,k}^1(t)$  – оценочное значение компоненты  $f_{-3}(t)$ ;  $s_{-3,k}^2 = -0.95 \cdot \omega_{-3,k-1}^2 - 0.86 \cdot \omega_{-3,k-2}^2 + a_{-3,k}^2(t)$  – оценочное значение компоненты  $g_{-3}(t)$ . 2. Для 15-минутных данных

$$R(t) = \sum_{\mu=1,2} \sum_{k=1,\dots,N_{-5}^{\mu}} s_{-5,k}^{\mu} b_{-5,k}^{\mu} + e(t) ,$$

где  $s_{-5,k}^{\mu}(t) = \sum_{l=1}^{2} \gamma_{-5,l}^{\mu} \omega_{-5,k-l}^{\mu} + a_{-5,k}^{\mu}(t), j = -5$  соответствует 5-му уровню вейвлетразложения (уровень разложения определялся на основе алгоритма [9]). Параметры модели для летнего сезона (низкая CA):

 $s_{-5,k}^{1} = -0.83 \cdot \omega_{-5,k-1}^{1} - 0.84 \cdot \omega_{-5,k-2}^{1} + a_{-5,k}^{1}(t)$ – оценочное значение компоненты  $f_{-5}(t)$ ;  $s_{-5,k}^{2} = -0.86 \cdot \omega_{-5,k-1}^{2} - 0.79 \cdot \omega_{-5,k-2}^{2} + a_{-5,k}^{2}(t)$ – оценочное значение компоненты  $g_{-5}(t)$ .

Оценка порогов  $H_{\mu,j^{\text{per}}}$  (см. (6)) выполнялась с использованием данных, регистрируемых в спокойные периоды, на основе величины (12). Оценки показали зависимость  $H_{\mu,j^{\text{per}}}$ от сезона и уровня СА:

- 1. для зимнего сезона  $H_{1,-3} = 1.37/1.22$  (высокая/низкая CA) пороговое значение для компоненты  $f_{-3}(t), H_{2,-3} = 0.97/0.73$  (высокая/низкая CA) пороговое значение для компоненты  $g_{-3}(t)$
- 2. для летнего сезона (часовые данные)  $H_{1,-3} = 1.60/1.30$  (высокая/низкая CA) пороговое значение для компоненты  $f_{-3}(t), H_{2,-3} = 0.88/0.80$  (высокая/низкая CA) – пороговое значение для компоненты  $g_{-3}(t)$
- 3. для летнего сезона (15-минутные данные, низкая СА)  $H_{1,-5} = 1.87$  пороговое значение для компоненты  $f_{-5}(t), H_{2,-5} = 1.34$  пороговое значение для компоненты  $g_{-5}(t)$

Оценка порогового коэффициента V (см. (8)) выполнялись путем оценки апостериорного риска (напр. [25])), которая показала, что:

для высокой CA  $2.5 \leq V \leq 3.5$ ,

для низкой CA  $1.5 \leq V \leq 2.5$ .

Идентифицированная модель реализована программно и доступна по адресу [26]. Схема программной реализации модели показана на рис. 1.

На рис. 2–4 представлены результаты моделирования в периоды магнитных бурь, произошедших 19-21 декабря 2015 г. (рис. 2) и 16-17 июля 2017 г. (рис. 3, 4).

Для анализа события 19-21 декабря 2015 г. (рис. 2) выполнена обработка часовых ионосферных данных станций Паратунка (Камчатский край) и Норфолк (Австралия). Анализ результатов показывает, что до начала магнитной бури на анализируемых станциях выделена положительная аномалия (операция (8)), показана на рис. 2 б,в,е,ж красным цветом),



Рис. 1 Схема программной реализации модели

которая свидетельствует об аномальном повышении электронной концентрации ионосферы. Отметим, что применение медианного метода (рис. 2 а) и модели ИРИ (рис. 2 к), в отличие от ОМКМ, не позволило выделить данную аномальную особенность. Анализ ошибок модели ИРИ (рис. 2 к) также показывает наличие их корреляции, что свидетельствует о погрешности данной модели. В период события положительная аномалия сменилась отрицательной (аномальное понижение концентрации электронов, аномалия показана синим цветом на рис. 2 б,в,е,ж), которая достигла максимальной интенсивности в восстановительную фазу магнитной бури. Оценка остаточных ошибок ОМКМ, см. операции (11), (13) (рис. 2 г,д,з,и), показывает в этот период наличие длительных (около 39 ч (Паратунка) и 36 ч (Норфолк)) и интенсивных (см. рис. 2 д, и) аномальных изменений во временном ходе параметров ионосферы (Паратунка: превышение 5.6 СКО для компоненты  $f_{-3}(t)$  и 2.4 СКО для компоненты  $g_{-3}(t)$ , Норфолк: превышение 2.6 СКО для компоненты  $f_{-3}(t)$  и и 2.4 СКО для компоненты  $g_{-3}(t)$ ). Сравнение результатов с медианным методом и моделью ИРИ (рис. 2 а, к) подтверждает возникновение сильных ионосферных возмущений во время восстановительной фазы магнитной бури (наблюдаются существенные отклонения



**Рис. 2** Результаты моделирования часовых данных foF2 на основе ОМКМ и ИРИ за период 17.12 – 23.12.2015 г. (станции Паратунка, Норфолк): а) регистрируемые данные foF2 (черным), 27-дневная медиана (зеленым), г) пунктиром показаны доверительные интервалы ОМКМ (доверительная вероятность 70%)

текущих значений данных от медианных значений (рис. 2 а,) и локальное возрастание ошибок модели ИРИ (рис. 2 к)).



**Рис. 3** Результаты моделирования 15-минутных данных foF2 за период 14 – 19 июля 2017 г.(станция Паратунка): а) регистрируемые данные foF2 (черным), 27-дневная медиана (зеленым), г) пунктиром показаны доверительные интервалы ОМКМ (доверительная вероятность 70%)

На рис. 3, 4 представлены результаты обработки 15-ти минутных ионосферных данных станции Паратунка (Камчатский край) в период магнитной бури 16-17 июля 2017. Анализ результатов моделирования показывает аналогичный рассмотренному выше событию характер поведения ионосферы. Накануне магнитной бури 15 июля 2017 г. наблюдается локальное повышение электронной концентрации (эффект предповышения в ионосфере [3,27], положительная аномалия показана на рис. 3 б,в красным цветом). Анализ остаточных ошибок ОМКМ (рис. 3 г) также свидетельствует о наличии изменений во временном ходе ионосферных данных накануне события (для компоненты  $f_{-5}(t)$  превышение составило 2.2 СКО). Более детальный анализ этого периода с использованием различных значений параметра  $\Phi$  (см. рис. 4) подтверждает возникновение эффекта предповышения в ионосфере накануне события и показывает эффективность ОМКМ и возможность ее использования для автоматического обнаружения данных ионосферных эффектов. В период начальной фазы магнитной бури электронная концентрация кратковременно повысилась (положительная аномалия на рис. 3 б; существенные отклонения текущих значений данных от медианных значений на рис. 3 а), что, вероятно, связано с проникновением электрического поля в средние и низкие широты (эффект PPEF [28]) На фазе восстановления возникла длительная отрицательная ионосферная буря (аномалия показана синим на рис. 3 б,в), о чем также свидетельствуют существенные возрастания ошибок ОМКМ (превышение составило 4 СКО для компоненты  $f_{-5}(t)$  и 2 СКО для  $g_{-5}(t)$ (рис. 3 г) и отклонения временного хода foF2 от медианных значений (рис. 3 а).



**Рис. 4** Результаты применения операции (8) с использованием различных значений параметра  $\Phi$  (использовались  $\Phi = 5, 10, 14$  дней).

#### 4 Выводы

Применение обобщенной многокомпонентной модели (OMKM) к данным ионосферы позволило детально изучить динамику ионосферного процесса в возмущенные периоды и показало ее преимущества, по сравнению с медианным методом и моделью ИРИ. Результаты исследования подтвердили эффективность ОМКМ для автоматического обнаружения и оценки ионосферных неоднородностей, наблюдаемых на фоне повышенной солнечной активности и магнитных бурь.

Предлагаемая ОМКМ для станции Паратунка (Камчатский край) реализована численно (http://aurorasa.ikir.ru:8580), и в дальнейшем авторы планируют расширить статистику обрабатываемых данных и число рассматриваемых станций.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект №14-11-00194. Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим регистрацию ионосферных и геомагнитных данных, которые использовались в работе.

### Литература

- [1] *Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли Иркутск: ГУ НУ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
- [2] Будько Н., Зайцев А., Карпачев А., Козлов А., Филиппов Б. Космическая среда вокруг нас Троицк: ТРОВАНТ, 2006. 232 с.

- [3] Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Advances in Space Research, 2013. V. 52(3). Pp. 343–366.
- [4] Перевалова Н. П. Исследование ионосферных возмущений методом трансионосферногоGPSзондирования. Автореферат диссертации доктора физико-математических наук – Иркутск: Институт солнечно-земной физики Со РАН, 2014 г.
- [5] Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan // Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, 2009. V. 56(3). Pp. 391–406.
- [6] Baishev D. G., Moiseyev A. V., Boroyev R. N., Kobyakova S. E., Stepanov A. E., Mandrikova O. V., Solovev I. S., Khomutov S. Yu., Polozov Yu. A., Yoshikawa A., Yumoto K. Magnetic and ionospheric observations in the Far Eastern region of Russia during the magnetic storm of 5 April 2010 // Sun and Geosphere, 2015. V. 10(2). Pp. 133-140.
- [7] Mansilla G. A. Ionospheric effects of an intense geomagnetic storm // Studia Geophysica et Geodaetica, 2007. Vol. 51(4). Pp. 563–574.
- [8] Mandrikova O. V., Polozov Yu. A., Solovev I. S., Fetisova (Glushkova) N. V., Zalyaev T. L., Kupriyanov M. S., Dmitriev A. V. Methods of analysis of geophysical data during increased solar activity // Pattern Recognition and Image Analysis, 2016. Vol. 26(2). Pp. 406-418. doi: http: //dx.doi.org/D0I:10.1134/S1054661816020103.
- [9] 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 // Earth Planet Space, 2015. Vol. 67. doi: http://dx.doi.org/10.1186/ s40623-015-0301-4.
- [10] Box G. E. P., Jenkins G. M. Time series analysis, forecasting and control. San Francisco : Holden-Day, 1976. 575 p.
- [11] Привальский В. Е., Панченко В. А., Асарина Е. Ю. Модели временных рядов СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 772 с.
- [12] Shubin V. N., Karpachev A. T., Telegin V. A., Tsybulya K. G. Global model SMF2 of the F2-layer maximum height // Geomagnetism and Aeronomy, 2015. Vol 55(5). Pp.609-622.
- [13] Bilitza D., Reinisch B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvement sand new parameters // Advances in Space Research, 2008. V. 42. Pp. 599–609.
- [14] Wang R., Zhou C., Deng Z., Ni B., Zhao Z. Predicting foF2 in the China region using the neural networks improved by the genetic algorithm // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2013. Vol. 92. Pp. 7–17.
- [15] Zhao X., Ning B., Liu L., Song G. A prediction model of short-term ionospheric foF2 based on AdaBoost, In Advances in Space Research // Advances in Space Research, 2008. V. 53(3). Pp. 387-394. doi: http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.001.
- [16] Martin J., Morton Yu., Zhou Q. Neural network development for the forecasting of upper atmosphere parameter distributions // Advances in Space Research, 2005. Vol. 36. Pp. 2480-2485.
- [17] Watthanasangmechai K., Supnithi P., Lerkvaranyu S., Tsugawa T., Nagatsuma T., Maruyama T. TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand // Earth Planet Space, 2012. Vol. 64(6). Pp. 473-483.
- [18] Mandrikova O. V., Fetisova (Glushkova) N. V., Al-Kasasbeh R. T., Klionskiy D. M., Geppener V. V., Ilyash M. Y. Ionospheric parameter modeling and anomaly discovery by combining the wavelet transform with autoregressive models // Annals of Geophysics, 2015. V. 58. doi: http://dx.doi.org/DOI:10.4401/ag-6729.

- [19] Титов А. А., Соломенцев Д. В., Хаттатов В. У., Хаттатов Б. В., Денисова В. И. Сравнение критической частоты foF2 по данным ионозондов, ассимиляционной модели ионосферы ФГБУ ЦАО и эмпирической модели IRI над территорией РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. №1, С. 255-263.
- [20] Mallat S. A wavelet tour of signal processing, third edition: The sparse way. USA: Academic Press, 2008. 832 p.
- [21] Chui C. K. An introduction in wavelets. New York: Academic Press, 1992. 264 p.
- [22] Мандрикова О. В., Полозов Ю. А., Богданов В. В., Геппенер В. В. Анализ и интерпретация геофизических параметров на основе многокомпонентных моделей Владивосток: Дальнаука, 2013. 192 с.
- [23] Mandrikova O., Fetisova N., Polozov Yu. Method for the analysis of ionospheric parameter and the detection of ionospheric anomalies in the tasks of online data processing // The III International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2017). — Samara: New technology, 2017. P. 2401-2410.
- [24] Геппенер В. В., Мандрикова О. В. Совмещение параметрического и непараметрического подходов к построению моделей нестационарных временных рядов, имеющих сложную структуру, с целью повышения качества их обработки // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2003. №2, С. 14-17.
- [25] *Левин Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. Изд. 2-е. М.: Сов.радио, 1975. 392 с.
- [26] Aurora. URL: http://aurorasa.ikir.ru:8580.
- [27] Blagoveshchensky D. V., Kalishin A. S. Increase in the critical frequency of the ionospheric F region prior to the substorm expansion phase // Geomagnetism and Aeronomy, 2009. V. 11(2). Pp. 200-209.
- [28] Abdu M. A. Major phenomena of the equatorial ionospherethermosphere system under disturbed conditions // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1997. Vol 59(13), P. 1505-1519. doi: http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00152-6

Поступила в редакцию 12.09.2018

# Modeling and analysis of natural time series on the basis of general multicomponent model

#### O. V. Mandrikova, N. V. Fetisova, Yu. A. Polozov

#### oksanam1@mail.ru; nv.glushkova@ya.ru; up\_agent@mail.ru

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

The work is focused on the development of methods for modelling and analysis of natural time series and the construction of automated systems on their basis. The present paper proposes a general multicomponent model (GMCM) of complex time series that allows describing irregular variations in the data. The GMCM recurrent component is represented by a parametric form and describes the regular time course of the data. The GMCM anomalous components are represented by nonlinear approximating schemes and describe irregular variations. On the example of the ionospheric critical frequency time series of F2-layer (data from the world network of ionospheric stations were used), the implementation of the model is described, and the results of its application are presented. A comparison with the IRI international empirical model and the median method confirmed the efficiency of the GMCM. The proposed GMCM, in contrast to analogs, allows us to detect anomalous changes in the data and to estimate their characteristics in automatic mode. The model is implemented numerically and is available from the Internet (http://aurorasa.ikir.ru:8580). The results of the research are important in the tasks of geophysical monitoring and operational forecast of space weather. The investigation is supported by RSF Grant No14-11-00194.

**Keywords**: time series model; wavelet transform; autoregressive models; ionospheric parameters; anomalies

**DOI:** 10.21469/22233792.4.2.01

### References

- Afraimovich E. L. and N. P. Perevalova. 2006. GPS-monitoring of the Earth upper atmosphere [GPS-monitoring verhnej atmosfery Zemli] Irkutsk: GU NU RVH VSNC SO RAMN. 480 p. (In Russian)
- [2] Bud'ko N., A. Zajcev, A. Karpachev, A. Kozlov and B. Filippov. 2006. The space environment around us [Kosmicheskaya sreda vokrug nas] Troick: TROVANT. 232 p. (In Russian)
- [3] Danilov A. D. 2013. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Advances in Space Research. 52(3):343—366.
- [4] Perevalova N. P. 2014. Investigation of ionospheric disturbances by the method of transionospheric GPS-sounding. The author's abstract of the thesis of the Doctor of Physical and Mathematical Sciences [Issledovanie ionosfernyh vozmushchenij metodom transionosfernogoGPSzondirovaniya. Avtoreferat dissertacii doktora fiziko- matematicheskih nauk] Irkutsk: Institut solnechno-zemnoj fiziki So RAN. (In Russian)
- [5] Nakamura M., T. Maruyama and Y. Shidama. 2009. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan // Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. 56(3):391–406.
- [6] Baishev D. G., 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 and K. Yumoto. 2015. Magnetic and ionospheric observations in the Far Eastern region of Russia during the magnetic storm of 5 April 2010 // Sun and Geosphere. 10(2):133-140.
- [7] Mansilla G. A. 2007. Ionospheric effects of an intense geomagnetic storm // Studia Geophysica et Geodaetica. 51(4):563–574.
- [8] Mandrikova O. V., Yu. A. Polozov, I.S. Solovev, N. V. Fetisova (Glushkova), T. L. Zalyaev, M.S. Kupriyanov and A.V. Dmitriev. 2016. Methods of analysis of geophysical data during increased solar activity // Pattern Recognition and Image Analysis. 26(2):406-418. doi: http: //dx.doi.org/DOI:10.1134/S1054661816020103.
- [9] Mandrikova O. V., N. V. Fetisova, Y. A. Polozov, I. S. Solovev and M. S. Kupriyanov. 2015. Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere // Earth Planet Space. 67. doi: http://dx.doi.org/10.1186/ s40623-015-0301-4.
- [10] Box G. E. P. and G. M. Jenkins. 1976. Time series analysis, forecasting and control. San Francisco: Holden-Day. 575 p.
- [11] Prival'skij V. E., V. A. Panchenko and E. Yu Asarina. 1992. Time Series Models [Modeli vremennyh ryadov] SPb.: Gidrometeoizdat. 772 p. (In Russian)
- [12] Shubin V. N., A. T. Karpachev, V. A. Telegin and K. G. Tsybulya. 2015. Global model SMF2 of the F2-layer maximum height // Geomagnetism and Aeronomy. 55(5):609–622.

- [13] Bilitza D. and B. W. Reinisch. 2008. International Reference Ionosphere 2007: Improvement sand new parameters // Advances in Space Research. 42:599–609.
- [14] Wang R., C. Zhou, Z. Deng, B. Ni and Z. Zhao. 2013. Predicting foF2 in the China region using the neural networks improved by the genetic algorithm // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 92:7–17.
- [15] Zhao X., B. Ning, L. Liu and G. Song. 2008. A prediction model of short-term ionospheric foF2 based on AdaBoost, In Advances in Space Research // Advances in Space Research. 53(3):387– 394. doi: http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.001.
- [16] Martin J., Yu. Morton and Q. Zhou. 2005. Neural network development for the forecasting of upper atmosphere parameter distributions // Advances in Space Research. 36:2480–2485.
- [17] Watthanasangmechai K., P. Supnithi, S. Lerkvaranyu, T. Tsugawa, T. Nagatsuma and T. Maruyama. 2012. TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand // Earth Planet Space. 64(6):473–483.
- [18] Mandrikova O. V., N. V. Fetisova (Glushkova), R. T. Al-Kasasbeh, D. M. Klionskiy, V. V. Geppener and M. Y. Ilyash. 2015. Ionospheric parameter modeling and anomaly discovery by combining the wavelet transform with autoregressive models // Annals of Geophysics. 58. doi: http://dx.doi.org/DOI:10.4401/ag-6729.
- [19] Titov A. A., D. V. Solomencev, V. U. Hattatov, B. V. Hattatov and V. I. Denisova. 2014. Comparison of the critical frequency foF2 according to ionosonde data, the assimilation model of the ionosphere of FGBU CAO and the empirical IRI model over the territory of the Russian Federation [Sravnenie kriticheskoj chastoty foF2 po dannym ionozondov, assimilyacionnoj modeli ionosfery FGBU CAO i ehmpiricheskoj modeli IRI nad territoriej RF] Modern problems of remote sensing of the Earth from space [Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa] 11(1):255-263.(In Russian)
- [20] Mallat S. 2008. A wavelet tour of signal processing, third edition: The sparse way. USA: Academic Press. 832 p.
- [21] Chui C. K. 1992. An introduction in wavelets. New York: Academic Press. 264 p.
- [22] Mandrikova O. V., Yu. A. Polozov, V. V. Bogdanov and V. V. Geppener. 2013. Analysis and interpretation of geophysical parameters on the basis of multicomponent models [Analiz i interpretaciya geofizicheskih parametrov na osnove mnogokomponentnyh modelej] Vladivostok: Dal'nauka. 192 p. (In Russian)
- [23] Mandrikova O., N. Fetisova and Yu. Polozov. 2017 Method for the analysis of ionospheric parameter and the detection of ionospheric anomalies in the tasks of online data processing *The III International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2017)* Samara: New technology. 2401–2410.
- [24] Geppener V. V. and O. V. Mandrikova. 2003. Combining parametric and nonparametric approaches to constructing models of non-stationary time series having a complex structure in order to improve the quality of their processing [Sovmeshchenie parametricheskogo i neparametricheskogo podhodov k postroeniyu modelej nestacionarnyh vremennyh ryadov, imeyushchih slozhnuyu strukturu, s cel'yu povysheniya kachestva ih obrabotki] Izvestiya SPbGEHTU "LEHTI" [News of SPbGETU "LETI"]. 2:14–17. (In Russian)
- [25] Levin B. R. 1975. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki [Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering.] M.: Sov.radio. 392 p. (In Russian)
- [26] Aurora. Available at: http://aurorasa.ikir.ru:8580 (accessed July 30, 2018).
- [27] Blagoveshchensky D. V. and A. S. Kalishin. 2009. Increase in the critical frequency of the ionospheric F region prior to the substorm expansion phase Geomagnetism and Aeronomy. 11(2):200– 209.

[28] Abdu M.A. 1997. Major phenomena of the equatorial ionospherethermosphere system under disturbed conditions // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 59(13):1505–1519. doi: http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00152-6

Received September 12, 2018