

Алгоритм выделения интенсивных аномальных изменений во временном ходе параметров ионосферы

Н.В. Фетисова¹

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН), 684034, Россия, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, д. 7

Аннотация

В работе представлена модифицированная многокомпонентная модель временного ряда параметров ионосферы. Модель описывает регулярные вариации и аномальные изменения разномасштабной структуры, характеризующие возникновение ионосферных неоднородностей. Идентификация компонент модели основана на совместном применении вейвлет-преобразования и моделей авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего. На основе предложенной модели разработан алгоритм анализа ионосферных параметров, позволяющий в оперативном режиме выделять интенсивные ионосферные аномалии, характеризующие возникновение сильных ионосферных бурь. Представлены результаты апробации алгоритма, выполненные на примере обработки и анализа часовых и 15-минутных данных критической частоты ионосферы (f_oF_2) в периоды магнитных бурь, произошедших в 2015–2017 гг. Выполненные оценки показали эффективность алгоритма и возможность его применения в задачах прогноза космической погоды.

Ключевые слова: авторегрессионные модели, вейвлет-преобразование, параметры ионосферы, ионосферные неоднородности.

Цитирование: Фетисова, Н.В. Алгоритм выделения интенсивных аномальных изменений во временном ходе параметров ионосферы / Н.В. Фетисова // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 1064–1071. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1064-1071.

Введение

Работа направлена на создание математических моделей и алгоритмов анализа природных временных рядов сложной структуры. В статье рассматривается задача, связанная с анализом параметров ионосферы и выделением аномальных изменений, характеризующих возникновение ионосферных неоднородностей (ионосферных бурь). Реакция ионосферы на изменения в околоземном космическом пространстве (солнечные вспышки, корональные выбросы, геомагнитные бури и суббури) проявляется в виде резкого повышения (понижения) электронной концентрации, которое приводит к возникновению ионосферных бурь [1–4]. В периоды ионосферных бурь в ионосфере возникают аномальные процессы, приводящие как к значительным изменениям временного хода данных, так и к внезапным локальным изменениям различной формы и длительности. Ионосферные бури могут включать «положительную» и «отрицательную» фазы, имеющие сложное пространственно-временное распределение, и их характеристики зависят от географического положения (полярная и авроральная зоны, среднеширотные и экваториальные области), начала геомагнитной бури, местного времени и др. [1–4]. Возмущения вызывают нарушения в распространении радиоволн в КВ-диапазоне (например, рассеивание радиоволн на ионосферных неоднородностях), а также в работе современных наземных и космических технических средств [1, 3, 5], поэтому их своевременное обнаружение имеет важное прикладное значение. Мониторинг состояния ионосферы основан на анализе регистрируемых параметров среды (критическая частота (f_oF_2), полное электронное содержание (ПЭС) и др.). Анализ данных f_oF_2 и обна-

ружение аномальных изменений является предметом данного исследования. Данные критической частоты F2-слоя ионосферы (f_oF_2) регистрируются методом вертикального зондирования с помощью цифрового ионозонда и после первичной обработки представляются в виде временных рядов. Регистрацию данных f_oF_2 выполняет ИКИР ДВО РАН, п-ов Камчатка. Регистрируемые временные ряды f_oF_2 имеют сложную нестационарную структуру, включающую регулярные вариации, определяемые солнечной активностью и локальными факторами, а также аномальные изменения разномасштабной структуры, характеризующие возникновение ионосферных неоднородностей [6–9].

Учитывая сложную структуру регистрируемых данных f_oF_2 , применение традиционных методов, основанных на медианном сглаживании, позволяет изучать наиболее устойчивые характеристики ионосферного процесса, но приводит к потере информации о динамике ионосферных неоднородностей [7–9]. Точность и эффективность современных моделей (эмпирические [10, 11], физические [12–14] и нейросетевые [3, 15, 16]) во многом зависят 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 [12–15, 17]. Также достоверность этих методов существенно снижается в возмущенные периоды [1, 3, 12–15, 17].

В статье представлены результаты, продолжающие исследование в рамках направления работ [6–9, 18]. В данной работе описана модифицированная многокомпонентная модель временного ряда параметров ионосферы (ММКМ). Предлагаемая модель включает регулярные разномасштабные компоненты, описывающие как длительные вариации параметров ионосферы, так и короткопериодные колебательные процессы. Возмущённые компоненты модели описывают внезапные аномальные изменения разномасштабной структуры, характеризующие возникновение ионосферных неоднородностей. Идентификация модели основана на комплексном подходе, объединяющем разные схемы вейвлет-преобразования и авторегрессионные модели. Ввиду наличия численно устойчивых быстрых алгоритмов преобразования данных и большого разнообразия базисных функций с компактными носителями вейвлет-преобразование позволяет выполнять детальный анализ сложных структур данных [19–21], в том числе в области геофизики [22–26]. На основе модели разработан алгоритм анализа ионосферных параметров, позволяющий в оперативном режиме выделять интенсивные ионосферные аномалии, характеризующие возникновение сильных ионосферных бурь. С использованием алгоритма выполнен анализ часовых и 15-минутных данных критической частоты ионосферы $foF2$. Анализировались периоды магнитных бурь за 2015–2017 гг., использовались данные $foF2$ станций регистрации «Паратунка», «Москва», «Норфолк» (Австралия) и «Вакканай» (Япония). В анализируемые периоды выделены длительные интенсивные аномальные изменения во временном ходе $foF2$, что подтверждает эффективность предлагаемого алгоритма.

Описание алгоритма

В работах [8, 18] показано, что временной ряд параметров ионосферы $f(t)$ может быть представлен в виде модифицированной многокомпонентной модели (ММКМ):

$$f(t) = A^{PEГ}(t) + \sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) + e(t) = \sum_{\mu=1, \overline{T}} \alpha^{\mu}(t) + \left(\sum_{\eta > \eta_1} \beta_{\text{ср.м}}^{\eta}(t) + \sum_{\eta \leq \eta_1} \beta_{\text{м.м}}^{\eta}(t) \right) + e(t), \tag{1}$$

где

$$A^{PEГ}(t) = \sum_{\mu=1, \overline{T}} \alpha^{\mu}(t)$$

($\mu = \overline{1, T}$ – номер компоненты) – составляющая, описывающая регулярные вариации параметров ионосферы, включает компоненты $\alpha^{\mu}(t)$, определяемые солнечной активностью и локальными факторами;

$$\sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = \sum_{\eta > \eta_1} \beta_{\text{ср.м}}^{\eta}(t) + \sum_{\eta \leq \eta_1} \beta_{\text{м.м}}^{\eta}(t) -$$

возмущённая составляющая, описывающая внезапные короткопериодные аномальные изменения (идентификация данной составляющей подробно представлена в работах [7, 8]), где компонента

$$\sum_{\eta > \eta_1} \beta_{\text{ср.м}}^{\eta}(t)$$

описывает умеренные локальные аномалии, а компонента

$$\sum_{\eta \leq \eta_1} \beta_{\text{м.м}}^{\eta}(t)$$

описывает локальные аномалии малой интенсивности (предполагается, что компоненты

$$\sum_{\eta > \eta_1} \beta_{\text{ср.м}}^{\eta}(t) \text{ и } \sum_{\eta \leq \eta_1} \beta_{\text{м.м}}^{\eta}(t)$$

аддитивны); $e(t)$ – случайная составляющая, включающая помехи искусственного происхождения (запуски ракет, промышленные взрывы и др.), а также аппаратные сбои.

Используя алгоритм выделения регулярных компонент $\alpha^{\mu}(t)$, основанный на быстрых вейвлет-разложениях (КМА) и представленный в работах [7, 9], регулярная составляющая $A^{PEГ}(t)$ (см. (1)) может быть представлена в виде [7, 8]:

$$A^{PEГ}(t) = f_{-m^{per}}(t) + \sum_{j^{per}} g_{j^{per}}(t), \tag{2}$$

где

$$f_{-m^{per}}(t) = \sum_k c_{-m^{per}, k} \phi_{-m^{per}, k}(t) -$$

сглаженная компонента, описывающая длительные изменения временного ряда масштаба m^{per} (определяет компоненту $\alpha^1(t)$),

$$c_{-m^{per}, k} = \langle f, \phi_{-m^{per}, k} \rangle -$$

коэффициенты разложения,

$$\phi_{-m^{per}, k}(t) = 2^{-m^{per}/2} \phi(2^{-m^{per}} t - k) -$$

скейлинг-функция,

$$g_{j^{per}}(t) = \sum_k d_{j^{per}, k} \Psi_{j^{per}, k}(t) -$$

детализирующая компонента масштаба $j^{per} = \overline{-1, -m^{per}}$ описывает короткопериодные колебательные изменения (определяет компоненту $\alpha^{\mu}(t)$, где $\mu = \overline{2, T}$),

$$d_{j^{per}, k} = \langle f, \Psi_{j^{per}, k} \rangle -$$

коэффициенты разложения характеризуют амплитуду колебания (величину отклонения от тренда (характерного уровня)) в момент времени $t = k$,

$$\Psi_{j^{per}, k}(t) = 2^{j^{per}/2} \Psi(2^{j^{per}} t - k) -$$

вейвлет.

Используя методы авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) [27, 28], регулярная составляющая $A^{PEГ}(t)$ (см. соотн. (2)) может быть представлена в параметрическом виде [6–9]:

$$A^{PEГ}(t) = \sum_{\mu=1, \overline{T}} \sum_{k=1, N^{\mu}} s_{j^{per}, k}^{\mu} b_{j^{per}, k}^{\mu}(t), \tag{3}$$

где

$$s_{j^{per},k}^{\mu} = \sum_{l=1}^{p_{j^{per}}} \gamma_{j^{per},l}^{\mu} \omega_{j^{per},k-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{per}}} \theta_{j^{per},n}^{\mu} a_{j^{per},k-n}^{\mu} -$$

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

Сильные ионосферные аномалии приводят к существенным изменениям временного хода данных ионосферы (напр. [1, 17]). Поэтому естественно предположить, что в периоды возникновения сильных ионосферных возмущений произойдет изменение регулярного хода ионосферных данных и возрастут остаточные ошибки регулярной составляющей $A^{PER}(t)$ (см. соотн. (3)). Тогда операция их выделения может быть основана на проверке условия:

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

где

$$a_{j^{per},k+q}^{\mu} = s_{j^{per},k+q}^{\mu, \text{факт}} - s_{j^{per},k+q}^{\mu, \text{модель}}, \quad q \geq 1 -$$

шаг упреждения данных,

$$s_{j^{per},k}^{\mu, \text{модель}} = \sum_{l=1}^{p_{j^{per}}} \gamma_{j^{per},l}^{\mu} \omega_{j^{per},k+q-l}^{\mu} - \sum_{n=1}^{h_{j^{per}}} \theta_{j^{per},n}^{\mu} a_{j^{per},k+q-n}^{\mu}, \quad Q_{\mu} -$$

длина упреждения данных на основе модели μ -й компоненты, $H_{\mu,j^{per}}$ – пороговое значение μ -й компоненты, определяющее наличие аномальных изменений в μ -й компоненте.

Следуя результатам работы [27], пороговое значение $H_{\mu,j^{per}}$ (см. соотн. (4)) может быть определено на основе оценки дисперсии ошибок модели:

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

где $\Psi_{j^{per},q}^{\mu}$ – весовые коэффициенты модели μ -й компоненты, $\sigma_{a_{j^{per}}^{\mu}}^2$ – дисперсия остаточных ошибок модели μ -й компоненты.

Либо с учётом вероятностных пределов:

$$H_{\mu,j^{per}}(Q_{\mu}) = u_{\xi/2} \left\{ 1 + \sum_{q=1}^{Q_{\mu}-1} \left(\Psi_{j^{per},q}^{\mu} \right)^2 \right\}^{1/2} \sigma_{a_{j^{per}}^{\mu}}, \quad (6)$$

где $u_{\xi/2}$ – квантиль уровня $(1 - \xi/2)$ стандартного нормального распределения.

Поскольку амплитуда ошибки $|a_{j^{per},k+q}^{\mu}|$ характеризуется на масштабе j^{per} величину отклонения фактического значения функции от её характерного значения (см. соотн. (4)), интенсивность аномалии на масштабе j^{per} в период $t = k + 1, k + L_{\mu}$ может быть оценена как

$$Y_{j^{per},k+1,k+L_{\mu}}^{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L_{\mu}} \sum_{l=1}^{L_{\mu}} \left(a_{j^{per},k+l}^{\mu} \right)^2}}{H_{\mu,j^{per}}}, \quad (7)$$

где L_{μ} – длина скользящего временного окна.

Таким образом, процедура выделения интенсивных аномальных изменений во временном ряде параметров ионосферы может быть основана на применении алгоритма:

1. Загружаем в память данные, на основе КМА выполняем разложение до уровня $m = m^{per}$ и получаем их представление в виде:

$$f(t) = f_{-m^{per}}(t) + \sum_{j^{per}} g_{j^{per}}(t).$$

2. На основе предварительно оцененных моделей компонент

$$f_{-m^{per}}(t) = \sum_{k=1, N_{-m^{per}}^{\mu}} s_{-m^{per},k}^1 b_{-m^{per},k}^1(t) \text{ и}$$

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

выполняем моделирование.

3. Вычисляем остаточные ошибки моделей:

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

4. Периоды времени $t = k + 1, \dots, k + Q_{\mu}$, для которых

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

принимает за аномальные.

5. Оцениваем интенсивность выделенных аномалий

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

Результаты экспериментов

Результаты обработки ионосферных данных представлены в табл. 1 (использовались часовые данные $foF2$ станций «Паратунка» ($53,0^{\circ}$ СШ и $158,7^{\circ}$ ВД), «Вакканай» (Япония, $45,16^{\circ}$ СШ и $141,75^{\circ}$ ВД) и Норфолк (Австралия, $-35,6^{\circ}$ СШ и 160° ВД)), которые показывают эффективность предлагаемого алгоритма. В периоды умеренных и сильных магнитных бурь на всех анализируемых станциях наблюдались длительные интенсивные ионосферные аномалии, о чём свидетельствует возрастание остаточных ошибок ММКМ (см. соотн. (4)): превышение составляло от 1,8 СКО до 5,6 СКО. Длительность выделенных аномалий зависела от силы бури и составляла: для умеренных магнитных бурь (Кр: 3–5) – от 27 до 39 ч, для сильных магнитных бурь (Кр: 6–8) – от 36 до 68 ч.

Табл. 1. Результаты обработки ионосферных данных ($foF2$) в периоды магнитных бурь 2015–2017 гг.

Дата события / время начала (UT) / характер события: ПН – постепенное начало, РН – резкое начало / сила бури	Станция	Наличие (отсутствии): превышение СКО (70% доверительный интервал) / длительность
21.01.15/ 14:10/ ПН/Кр 4	Паратунка	2,1 СКО / 27 ч
17.02.15/ 4:45/ ПН/ Кр 4	Паратунка	5,6 СКО / 29 ч
	Вакканай	3,3 СКО / 34 ч
21.06.15/ 16:55/ РН/ Кр 4	Паратунка	3,8 СКО / 27 ч
09.02.16/ 9:00/ РН/ Кр3	Паратунка	1,8 СКО / 39 ч
19.12.15/ 16:18/ РН/ Кр 6	Паратунка	5,6 СКО / 42 ч
	Норфолк	2,6 СКО / 36 ч
24.11.16/ 00:00/ РН/ Кр5	Паратунка	3,9 СКО / 33 ч
17.03.15/ 4:45/ РН/ Кр 8	Паратунка	5,6 СКО / 65 ч
	Вакканай	3 СКО / 37 ч
20.09.15/ 06:05/ РН/ Кр 7	Паратунка	3,5 СКО / 68 ч
07.09.17/ 23:00/ РН/ Кр 8	Паратунка	3,2 СКО / 66 ч

На рис. 1 и 2 в качестве примера представлены результаты апробации предложенного алгоритма, полученные для 15-минутных данных критической частоты ионосферы ($foF2$) станций «Паратунка» ($53,0^\circ$ СШ и $158,7^\circ$ ВД) и «Москва» ($55,5^\circ$ СШ и $37,3^\circ$ ВД).

В первый анализируемый период (06.09–12.09.2017 г., рис. 1) вследствие прихода ускоренного

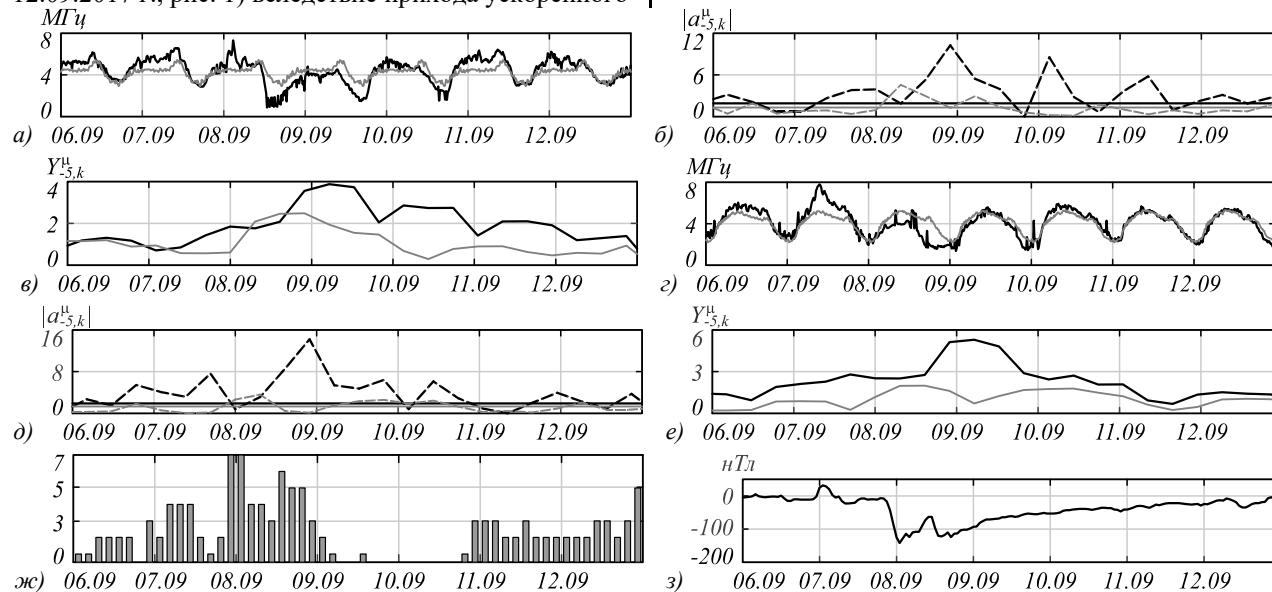


Рис. 1. Результаты моделирования ионосферных данных $foF2$ ст. «Паратунка» (а-в) и ст. «Москва» (г-е): а), г) $foF2$ (черным), медианные значения (серым); б), д) ошибки моделей компонент $-f_5(t)$ (черным), $g_5(t)$ (серым) и их СКО; в), е) интенсивность выделенных аномалий $-f_5(t)$ (черным), $g_5(t)$ (серым); ж) К-индекс геомагнитной активности ст. «Паратунка»; з) Dst-индекс

На рис. 2 представлены результаты моделирования временного ряда $foF2$ за период 06.11–11.11.2017 г. В анализируемый период из-за прихода в начале суток 7 ноября неоднородного ускоренного потока (CIR) от обширной корональной дыры (по данным <http://ipg.geospace.ru/>) наблюдается повышение геомагнитной активности (К-индекс > 3). Оценка остаточных ошибок модели (см. соотн. (4)) показывает наличие длительных (46 часов (Москва) и более 3 суток (Паратунка)) и интенсивных (рис. 2 в, е) аномальных изменений во временном ходе $foF2$ для анализируемых станций: для компоненты $f_5(t)$ – 3,8 СКО (Па-

ратунка) и 5 СКО (Москва), для компоненты $g_5(t)$ – 2 СКО (Паратунка) и 3,5 СКО (Москва). Сопоставление с медианным методом (см. рис. 2 а, г), аналогично рассмотренному выше событию, подтверждает эффективность разработанной модели.

Результаты обработки данных (см. рис. 1) показывают схожий характер поведения ионосферы на анализируемых станциях в период события. Наблюдается существенное возрастание остаточных ошибок модели (рис. 1 б, д), что говорит о наличии длительных (более 4 суток) и интенсивных (превышение от 2 СКО до 7,5 СКО) аномальных изменений во временном ходе параметров ионосферы (рис. 1 в, е). Наиболее существенное возрастание ошибок наблюдалось в восстановительную фазу магнитной бури 08.09.2017 и составило: для компоненты $f_5(t)$ – 5,4 СКО (Паратунка) и 7,5 СКО (Москва), для компоненты $g_5(t)$ – 3,5 СКО (Паратунка) и 2,8 СКО (Москва). Полученные результаты согласуются с традиционным медианным методом – наблюдаются существенные отклонения значений $foF2$ от 27-дневной медианы. Но, в отличие от медианного метода, предлагаемая модель позволяет четко выделить аномальный период в ионосфере и оценить его параметры (временную длительность и интенсивность).

Результаты моделирования ионосферных данных $foF2$ ст. «Паратунка» (а-в) и ст. «Москва» (г-е): а), г) $foF2$ (черным), медианные значения (серым); б), д) ошибки моделей компонент $-f_5(t)$ (черным), $g_5(t)$ (серым) и их СКО; в), е) интенсивность выделенных аномалий $-f_5(t)$ (черным), $g_5(t)$ (серым); ж) К-индекс геомагнитной активности ст. «Паратунка»; з) Dst-индекс

Заключение

Разработанная модель и построенный на ее основе вычислительный алгоритм позволили выполнить анализ временного хода параметров ионосферы ($foF2$) в периоды повышенной геомагнитной активности. Анализ результатов показал, что в периоды магнит-

ных бурь регулярный ход f_oF2 существенно меняется, что приводит к возникновению длительных аномалий во временном ряде f_oF2 . Выполненные статистические оценки (выполнен анализ 10 магнитных

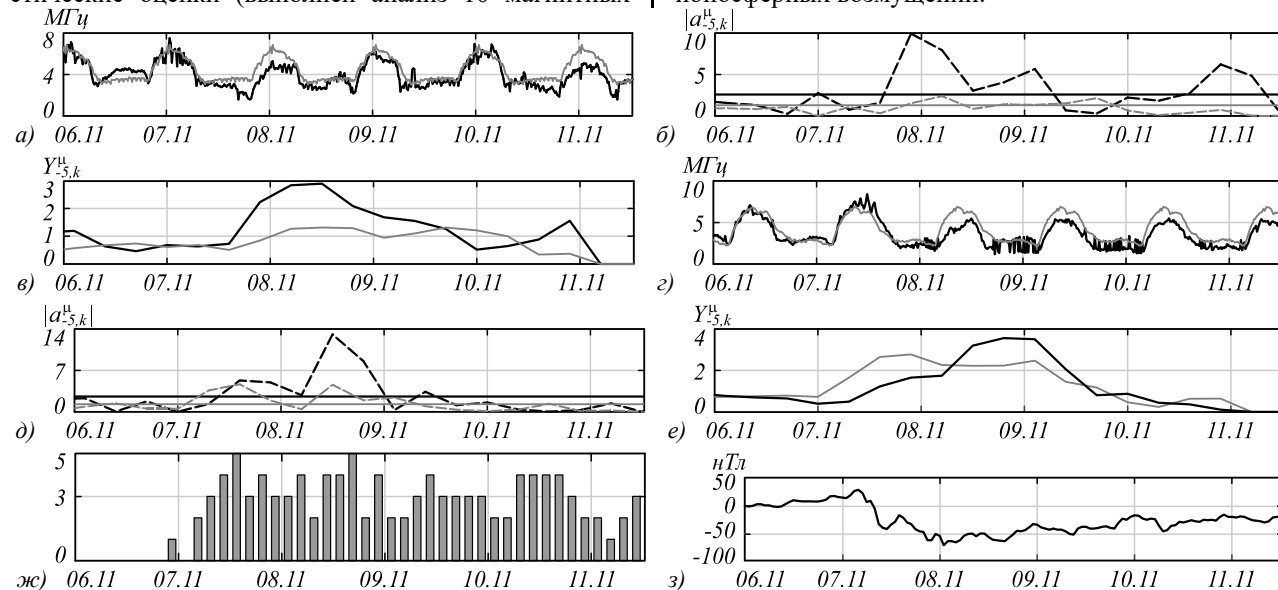


Рис. 2. Результаты моделирования ионосферных данных f_oF2 ст. «Паратунка» (а-в) и ст. «Москва» (г-е): а, г) f_oF2 (черным), медианные значения (серым); б), д) ошибки моделей компонент $-f_5(t)$ (черным), $g_5(t)$ (серым) и их СКО; в), е) интенсивность выделенных аномалий $-f_5(t)$ (черным), $g_5(t)$ (серым); ж) К-индекс геомагнитной активности ст. «Паратунка»; з) Dst-индекс

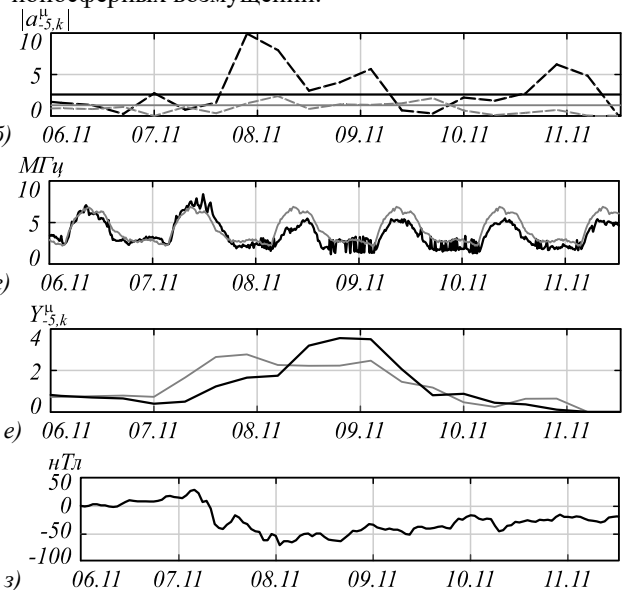
Благодарности

Автор выражает благодарность институтам, выполняющим регистрацию ионосферных и геомагнитных данных, которые использовались в работе, а также центру коллективного пользования «Северо-восточный гелиогеофизический центр».

Литература

1. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. – Иркутск: ГУ НУ ВВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
2. **Danilov, A.D.** Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances / A.D. Danilov // *Advances in Space Research*. – 2013. – Vol. 52, Issue 3. – P. 343-366. – DOI: 10.1016/j.asr.2013.04.019.
3. **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.
4. **Danilov, A.D.** F2-region response to geomagnetic disturbances / A.D. Danilov // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2001. – Vol. 63. – DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00175-9.
5. Космическая среда вокруг нас / Н.И. Будько, А.Н. Зайцев, А.Т. Карпачев, А.Н. Козлов, Б.П. Филиппов; под ред. А.Н. Зайцева. – Троицк: ТРОВАНТ, 2006. – 232 с.
6. **Mandrikova, O.V.** 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. Kliionskiy, V.V. Geppener, M.Y. Ilyash // *Annals of Geophysics*. – 2015. – Vol. 58, Issue 5. – A0550. – DOI: 10.4401/ag-6729.

бурь, произошедших в 2015–2017 гг.) подтвердили эффективность предлагаемого в работе алгоритма для задач анализа ионосферных данных и выделения ионосферных возмущений.



7. **Mandrikova, O.V.** 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. Solovlev, M.S. Kupriyanov // *Earth, Planets and Space*. – 2015. – Vol. 67, Issue 1. – P. 131-146. – DOI: 10.1186/s40623-015-0301-4.
8. **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.
9. **Мандрикова, О.В.** Моделирование и анализ параметров ионосферы на основе совмещения вейвлет-преобразования и авторегрессионных моделей / О.В. Мандрикова, Н.В. Глушкова, И.В. Живетьев // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2014. – Т. 54, № 5. – С. 638-645. – DOI: 10.7868/S0016794014050101.
10. **Шубин, В.Н.** Глобальная спутниковая модель высоты максимума слоя F2 / В.Н. Шубин, А.Т. Карпачев, В.А. Телегин, К.Г. Цыбуля // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2015. – Т. 5, № 5. – С. 623-637. – DOI: 10.7868/S0016794015050156.
11. **Bilitza, D.** International reference ionosphere 2007: Improvement and new parameters / D. Bilitza, B.W. Reinisch // *Advances in Space Research*. – 2008. – Vol. 42. – P. 599-609.
12. **Ботова, М.Г.** Вариации ионосферы: сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений / М.Г. Ботова, Ю.В. Романовская, А.А. Намгаладзе // *Вестник МГТУ*. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 385-393.
13. **Соломенцев, Д.В.** Трехмерная ассимиляционная модель ионосферы для европейского региона /

- Д.В. Соломенцев, Б.В. Хаттатов, А.А. Титов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 1. – С. 78-90.
14. **Титов, А.А.** 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.
 15. **Wang, R.** 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 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2013. – Vol. 92. – P. 7-17.
 16. **Watthanasangmechai, K.** TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand / K. Watthanasangmechai, P. Supnithi, S. Lerkvaranyu, T. Tsugawa, T. Nagatsuma, T. Maruyama // Earth, Planets and Space. – 2012. – Vol. 64, Issue 6. – P. 473-483.
 17. **Первалова, Н.П.** Оценка характеристик наземной сети приемников GPS/ГЛОНАСС, предназначенной для мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения / Н.П. Первалова // Солнечно-земная физика. – 2011. – Т. 11. – С. 124-133.
 18. **Мандрикова, О.В.** Обобщенная многокомпонентная модель временного ряда параметров ионосферы / О.В. Мандрикова, В.В. Геппенер, Н.В. Фетисова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 10. – С. 31-41.
 19. **Малла, С.** Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла; пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
 20. **Добеши, И.** Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши; пер. с англ. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
 21. **Чуи, К.** Введение в вейвлеты / К. Чуи; пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 412 с.
 22. **Hamoudi, M.** Wavelet analysis of ionospheric disturbances. EGU General Assembly 2009 / M. Hamoudi, N. Zaourar, R. Mebarki, L. Briquieu, M. Parrot // Geophysical Research Abstracts. – 2009. – Vol. 11: EGU2009-8523.
 23. **Мандрикова, О.В.** Автоматический способ оценки состояния геомагнитного поля / О.В. Мандрикова, Е.А. Жижкина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 420-428 – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-420-428.
 24. **Воробьев, А.В.** Геоинформационная система для амплитудно-частотного анализа данных наблюдений геомагнитных вариаций и космической погоды / А.В. Воробьев, Г.П. Воробьева // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 963-972. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-963-972.
 25. **Mandrikova, O.V.** Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data / O.V. Mandrikova, I.S. Solovov, T.L. Zalyaev // Earth Planet Space. – 2014. – Vol. 66, Issue 1. – DOI: 10.1186/s40623-014-0148-0.
 26. **Kato, H.** Development of automatic scaling software of ionospheric parameters / H. Kato, Y. Takiguchi, D. Fukayama, Y. Shimizu, T. Maruyama, M. Ishii // Journal of the National Institute of Information and Communication Technology. – 2009. – Vol. 56. – P. 465-474.
 27. **Бокс, Дж.** Анализ временных рядов прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 604 с.
 28. **Привальский, В.Е.** Модели временных рядов / В.Е. Привальский, В.А. Панченко, Е.Ю. Асарина. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 772 с.

Сведения об авторе

Фетисова Надежда Владимировна, 1987 года рождения, в 2009 году окончила Камчатский государственный технический университет, факультет информационных технологий, работает научным сотрудником в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, математическое моделирование, моделирование и анализ геофизических данных. E-mail: nv.glushkova@ya.ru.

ГРПТИ: 27.35.33

Поступила в редакцию 11 июня 2019 г. Окончательный вариант – 7 октября 2019 г.

An algorithm for detecting intense anomalous changes in the time dependence of ionospheric parameters

N.V. Fetisova¹

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

Abstract

The paper presents a modified multicomponent model of ionospheric parameter time series. The model describes regular variations and anomalous changes of a multi-scale structure that characterize the occurrence of ionospheric irregularities. Identification of the model components is based on a combined application of the wavelet transform and autoregressive-integrated moving average models. An algorithm for analyzing ionospheric parameters has been developed on the basis of the proposed model. The algorithm allows the intensive ionospheric anomalies characterizing the occurrence of strong ionospheric storms to be detected on-line. Results of the evaluation of the algorithm performance are presented. The evaluation is performed by the example of processing and analyzing hourly and 15-minute data on the ionospheric critical frequency (*foF2*) during magnetic storms in 2015–2017. The performed estimations showed the efficiency of the algorithm and the possibility of its application for space weather forecasting.

Keywords: autoregressive models, wavelet-transform, ionospheric parameters, ionospheric irregularities.

Citation: Fetisova NV. An algorithm for detecting intense anomalous changes in the time dependence of ionospheric parameters. *Computer Optics* 2019; 43(6): 1064-1071. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1064-1071.

Acknowledgements: The author is grateful to the organizations that recorded the ionospheric and geomagnetic data utilized in the paper and to the Common Use Center “North-Eastern Helio-geophysical Center”.

References

- [1] Afraimovich EL, Perevalova NP. GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere [In Russian]. Irkutsk: “GU NU RVH VSNC SO RAMN” Publisher; 2006.
- [2] Danilov AD. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances. *Advances in Space Research* 2013; 52(3): 343-366. DOI: 10.1016/j.asr.2013.04.019.
- [3] Nakamura M, Maruyama T, Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology* 2009; 56: 391-406.
- [4] Danilov AD. F2-region response to geomagnetic disturbances. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2001; 63. DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00175-9.
- [5] Bud'ko NI, Zaitsev AN, Karpachev AT, Kozlov AN, Filippov BP. Space around us [In Russian]. Troitsk: “TRO-VANT” Publisher; 2006.
- [6] Mandrikova OV, Fetisova (Glushkova) NV, Al-Kasasbeh RT, Klionskiy DM, Geppener VV, Ilyash MY. Ionospheric parameter modeling and anomaly discovery by combining the wavelet transform with autoregressive models. *Annals of Geophysics* 2015; 58 (5): A0550. DOI: 10.4401/ag-6729.
- [7] Mandrikova OV, Fetisova NV, Polozov YA, Solovev IS, Kupriyanov MS. Method for modeling of the components of ionospheric parameter time variations and detection of anomalies in the ionosphere coupling of the high and mid latitude ionosphere and its relation to geospace dynamics. *Earth, Planets and Space* 2015; 67(1): 131-146. DOI: 10.1186/s40623-015-0301-4.
- [8] Mandrikova O, Polozov Yu, Fetisova N, Zalyaev T. Analysis of the dynamics of ionospheric parameters during periods of increased solar activity and magnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2018; 181: 116-126. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.10.019.
- [9] Mandrikova OV, Glushkova NV, Zhivet'ev IV. Modeling and analysis of ionospheric parameters by a combination of wavelet transform and autoregressive models. *Geomagnetism and Aeronomy* 2014; 54(5): 593-600. DOI: 10.1134/S0016793214050107.
- [10] Shubin VN, Karpachev AT, Telegin VA, Tchybulya KG. Global model SMF2 of the F2-layer maximum height. *Geomagnetism and Aeronomy* 2015; 55(5): 609-622. DOI: 10.1134/S001679321505014X.
- [11] Bilitza D, Reinisch BW. International reference ionosphere 2007: Improvement and new parameters. *Advances in Space Research* 2008; 42: 599-609.
- [12] Botova MG, Romanovskaya AA, Namgaladze AA. Ionosphere variations: Comparison of model calculations and observation data [In Russian]. *Vestnik MSTU* 2014; 17(2): 385-393.
- [13] Solomentsev DV, Titov AA, Khattatov BV. Three-dimensional assimilation model of the ionosphere for the European region. *Geomagnetism and Aeronomy* 2013; 53(1): 73-84. DOI: 10.1134/S0016793212060114.
- [14] Titov AA, Solomentsev DV, Khattatov VU, Khattatov BV, Denysova VI. Comparison of critical frequency foF2 obtained from ionosonde and CAO and IRI models over the Russian Federation [In Russian]. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 2014; 11(1): 255-263.
- [15] 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; 92: 7-17.
- [16] Watthanasangmechai K, Supnithi P, Lerkvaranyu S, Tsugawa T, Nagatsuma T, Maruyama T. TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand. *Earth, Planets and Space* 2012; 64(6): 473-483.
- [17] Perevalova NP. Estimated parameters of ground-based network of GPS/GLONASS Receivers designed to perform monitoring of ionospheric disturbances of natural and technogenic origin [In Russian]. *Solar-Terrestrial Physics* 2011; 11: 124-133.
- [18] Mandrikova OV, Geppener VV, Fetisova NV. Generalized multicomponent model of ionospheric parameter time series [In Russian]. *Izvestia SPbETU LETI* 2018; 10: 31-41.
- [19] Mallat S. A wavelet tour of signal processing. London: Academic Press; 1999.
- [20] Daubechies I. Ten lectures on Wavelets. Pennsylvania: SIAM; 1992.
- [21] Chui C. An introduction to wavelets. USA: Academic Press; 1992.
- [22] Hamoudi M, Zaourar N, Mebarki R, Briquieu L, Parrot M. Wavelet analysis of ionospheric disturbances. *EGU General Assembly 2009*. *Geophysical Research Abstracts* 2009; 11(EGU2009-8523).
- [23] Mandrikova OV, Zhizhikina EA. An automatic method for estimating the geomagnetic field. *Computer Optics* 2015; 39(3): 420-428. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-420-428.
- [24] Vorobev AV, Vorobeva GR. Geoinformation system for amplitude-frequency analysis of geomagnetic variations and space weather observation data. *Computer Optics* 2017; 41(6): 963-972. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-963-972.
- [25] Mandrikova OV, Solovev IS, Zalyaev TL. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data. *Earth, Planet and Space* 2014; 66(1): DOI: 10.1186/s40623-014-0148-0.
- [26] Kato H, Takiguchi Y, Fukayama D, Shimizu Y, Maruyama T, Ishii M. Development of automatic scaling software of ionospheric parameters. *Journal of the National Institute of Information and Communication Technology* 2009; 56: 465-474.
- [27] Box G, Jenkins G. Time series analysis: Forecasting and control. San Francisco: Holden Day; 1970.
- [28] Privalsky VE, Panchenko VA, Asarina EYu. Time series models [In Russian]. Sankt-Petersburg: “Gidrometeoizdat” Publisher; 1992.

Author's information

Nadezhda Vladimirovna Fetisova (b. 1987) graduated from Kamchatka State Technical University, Information Technology in 2009. She works as a researcher at the Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation of the Far Eastern Branch of Russian Academy of Science. Her research interests are pattern recognition, digital signal processing, modeling and analysis of geophysical data. E-mail: nv.glushkova@ya.ru .

Received June 11, 2019. The final version – October 7, 2019.
