

Метод анализа ионосферных параметров и выделения ионосферных аномалий в задачах оперативной обработки данных

О.В. Мандрикова¹, Н.В. Фетисова¹, Ю.А. Полозов¹

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

Аннотация. В работе представлен метод анализа ионосферных данных, основанный на применении вейвлет-преобразования и пороговых функций. Метод позволяет в оперативном режиме выполнять детальный анализ параметров ионосферы и выделять аномалии, возникающие в периоды ионосферных возмущений. Метод адаптирован для 15-и минутных данных вертикального зондирования ионосферы (критическая частота ионосферного слоя F2, использовались данные станции «Паратунка», Камчатский край). Выполненные оценки показали высокую чувствительность метода, и возможность его реализации в режиме реального времени (по мере поступления данных регистрации). Исследования выполнены при поддержке Гранта РФФИ №14-11-00194.

1. Введение

Работа направлена на создание методов анализа параметров ионосферы и выделения аномальных изменений, возникающих в периоды ионосферных возмущений. Возмущения (ионосферные неоднородности) вызывают серьезные нарушения в работе современных наземных и космических технических средств [[1], [2], [3]], что определяет прикладную значимость исследования. 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], [2], [3], [4]]. Нерегулярные изменения параметров ионосферы наблюдаются в периоды солнечных вспышечных событий и (или) магнитных возмущений, приводящих к образованию ионосферных неоднородностей. Неоднородности формируются в ионосфере вследствие резкого изменения плотности электронов (ионосферная буря) по сравнению с некоторым характерным (спокойным) уровнем[[2], [3], [5]]. Ионосферная буря может состоять из положительной и отрицательной фаз, имеющих сложное пространственно-временное распределение [[3], [5]]. Хотя механизмы этих эффектов известны (напр. [[3]]), точное прогнозирование ионосферных бурь в настоящее время не реализовано и связано со сложностью выполнения устойчивых наблюдений в верхних слоях атмосферы. Неоднородности, возникающие в период ионосферной бури, как правило, формируются в экваториальной и авроральной зонах, а их интенсивность увеличивается с ростом солнечной

активности [[1], [2], [3], [4], [6], [7]]. Они находят отражение в регистрируемых параметрах ионосферы в виде локальных особенностей различной формы и длительности [[8], [9], [10]].

Задачи анализа ионосферных параметров и изучения состояния ионосферы, решаются большим количеством авторов [[1], [3], [4],[6], [7], [10], [11], [12],[13],[14],[15],[16]]. Среди основных подходов можно выделить традиционный метод скользящей медианы [[1], [15], [16]], физические модели [[12],[17],[18]], эмпирические модели ионосферы [[13], [14]], нейросетевые модели [[3], [19], [20]]. Применение традиционных методов, основанных на медианном сглаживании, позволяет изучать наиболее устойчивые характеристики ионосферного процесса, но приводит к потере информации о динамике ионосферных возмущений [[9], [20]]. Точность и эффективность существующих моделей (эмпирические [[14], [13]], физические [[12], [17], [18]] и нейросетевые [[3], [19], [20]]) во многом зависит от наличия качественных исторических данных геофизических параметров, определяющих состояние околоземного космического пространства. Поэтому в настоящее время интенсивно развиваются технологии наблюдения за околоземным космическим пространством и методы анализа данных [21-23]. Для применения моделей в режиме реального времени (или близком к нему) необходима оперативная информация о комплексе геофизических параметров, что не всегда реализуемо [[3], [12], [17], [19]]. Также достоверность данных методов существенно снижается в возмущенные периоды.

Предлагаемая многокомпонентная модель параметров ионосферы (МКМ) основана на применении вейвлет-преобразования и авторегрессионных моделей. МКМ включает регулярную составляющую, описывающую характерные изменения параметров, протекающие в условия спокойной ионосферы, и возмущенную составляющую, описывающую аномальные изменения в возмущенные периоды [[8], [9], [10]]. Идентификация регулярной составляющей основана на совмещении кратномасштабных вейвлет-разложений (КМА) и моделей авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) и подробно описана в работах [[8], [9]]. Поскольку возмущенные компоненты МКМ имеют различную форму («всплески», «пики» т.п.), а длительность и моменты их возникновения носят случайный характер, применение параметрического подхода для их описания является неэффективным. Для их идентификации в данной работе предлагается использовать непрерывное вейвлет преобразование (НВП). НВП называют «математическим микроскопом», он является эффективным методом изучения сложных структур данных и позволяет выделить и оценить параметры локальных особенностей данных [[8], [9], [10], [20], [24], [25]5]. На основе использования НВП и адаптивных пороговых функций в статье предложен метод выделения возмущенных компонент МКМ. Реализованный на основе метода алгоритм позволяет в оперативном режиме выполнять детальный анализ параметров ионосферы и выделять аномалии, возникающие в периоды ионосферных возмущений. Алгоритм апробирован для 15-ти минутных данных вертикального зондирования ионосферы (критическая частота ионосферного слоя F2, использовались данные станции «Паратунка», Камчатский край). Оценки показали высокую чувствительность алгоритма, и возможность его реализации в режиме реального времени (по мере поступления данных регистрации).

2. Описание метода

Поскольку временной ряд параметров ионосферы включает регулярную составляющую, описывающую характерный (фонный) временной ход параметров, и разномасштабные локальные особенности, возникающие в периоды ионосферных возмущений, то естественно его представить в следующем виде:

$$f(t) = \begin{cases} \sum_{\mu=1, T} \alpha^{\mu}(t) + e_1(t) \\ \sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t) + e_2(t) \end{cases}, \quad (1)$$

где компоненты $\alpha^{\mu}(t)$ ($\mu = \overline{1, T}$ – номер компоненты) описывают регулярные суточные изменения параметров ионосферы, зависящие от сезона и уровня солнечной активности;

компоненты $\sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t)$ описывают разномасштабные локальные особенности, возникающие в периоды ионосферных возмущений; $e_1(t)$ и $e_2(t)$ – случайные составляющие, включающие космогенные помехи, помехи искусственного происхождения (запуски ракет, промышленные взрывы и др.), а также аппаратные сбои и др.

На основе применения КМА временной ряд параметров ионосферы может быть представлен в виде:

$$f(t) = f_{-m^{pez}}(t) + \sum_{j^{pez}} g_{-j^{pez}}(t) + \sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t) + e(t) = A^{PEG} + \sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t) + e(t) \quad (2)$$

где $f_{-m^{pez}}(t) = \sum_k c_{-m^{pez},k} \phi_{-m^{pez},k}(t)$, $g_{-j^{pez}}(t) = \sum_k d_{-j,k} \Psi_{-j,k}(t)$, $j = \overline{1, -m^{pez}}$ – компоненты, описывающие регулярные вариации параметров ионосферы, $c_{-m^{pez},k} = \langle f, \phi_{-m^{pez},k} \rangle$, $d_{-j,k} = \langle f, \Psi_{-j,k} \rangle$ – вейвлет-коэффициенты, ϕ – скейлинг-функция, Ψ – базисный вейвлет, j – уровень вейвлет-разложения; $\sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t)$ – аномальная составляющая модели, возникающая в периоды ионосферных возмущений (в случае регулярных изменений данных, предполагается, что $\sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t) = 0$), $e(t)$ – ошибки.

В работах [[8], [9]] на основе совместного применения КМА и моделей АРПСС получено следующее представление регулярной составляющей временного ряда параметров ионосферы в виде:

$$A^{PEG}(t) = \sum_{\mu=1, T} \sum_{k=1, N^{\mu}_{j^{pez}}} s^{\mu}_{j^{pez},k} b^{\mu}_{j^{pez},k}(t) \quad (3)$$

где $s^{\mu}_{j^{pez},k} = \sum_{l=1}^{p^{\mu}_{j^{pez}}} \gamma^{\mu}_{j^{pez},l} \omega^{\mu}_{j^{pez},k-l} - \sum_{n=1}^{h^{\mu}_{j^{pez}}} \theta^{\mu}_{j^{pez},n} a^{\mu}_{j^{pez},k-n}$ – оценочное значение регулярной μ -ой компоненты; $p^{\mu}_{j^{pez}}, \gamma^{\mu}_{j^{pez},l}$ – порядок и параметры авторегрессии μ -ой компоненты; $h^{\mu}_{j^{pez}}, \theta^{\mu}_{j^{pez},k}$ – порядок и параметры скользящего среднего μ -ой компоненты; $\omega^{\mu}_{j^{pez},k} = \nabla^{v^{\mu}} \beta^{\mu}_{j^{pez},k}$, v^{μ} – порядок разности μ -ой компоненты, $\beta^1_{j^{pez},k} = c_{j^{pez},k}$, $\beta^{\mu}_{j^{pez},k} = d_{j^{pez},k}$, $\mu = \overline{2, T}$, T – количество моделируемых компонент, $a^{\mu}_{j^{pez},k}$ – остаточные ошибки модели μ -ой компоненты, $N^{\mu}_{j^{pez}}$ – длина μ -ой компоненты, $b^1_{j^{pez},k} = \phi_{j^{pez},k}$ – масштабирующая функция, $b^{\mu}_{j^{pez},k} = \Psi_{j^{pez},k}$, $\mu = \overline{2, T}$ – вейвлет-базис μ -ой компоненты.

Полученная многокомпонентная конструкция (3) описывает регулярные вариации временного ряда параметров ионосферы, характерные для условий спокойной ионосферы.

В соответствии с принятой моделью (соотн. (2)) компонента, описывающая возмущения имеет вид:

$$I(t) = \sum_{\eta} \beta^{\eta}_{\text{возм}}(t), \quad (4)$$

Учитывая, что структура функции $I(t)$ подвержена изменению в случайные моменты времени, следуя работе [[26]], наиболее эффективным методом идентификации является построение нелинейных аппроксимирующих схем. В этом случае подходящим пространством описания $I(t)$ является несепарабельное гильбертово пространство $L^2(R)$. Тогда справедливо следующее соотношение:

$$I(t) = \sum_{j,n} d_{j,n} \Psi_{j,n}(t),$$

где $\{\Psi_{j,n}(t)\}_{j,n \in Z}$ – ортогональный вейвлет-базис пространства $L^2(R)$, коэффициенты $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$. Или, в соответствии с принятыми обозначениями (4) получаем:

$$I(t) = \sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = \sum_{\eta} \sum_n d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t)$$

где $\beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = \sum_n d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t)$, коэффициенты $d_{\eta,n} = \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle$.

С целью построения адаптивных аппроксимаций, следуя работе [[24]], приближение функции I будем выполнять M векторами, зависящими от ее структуры, в этом случае получаем:

$$I(t) = \sum_{(\eta,n) \in P_M} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{\eta,n \notin P_M} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n} = I_M(t) + e(t),$$

где $I_M(t) = \sum_{(\eta,n) \in P_M} \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle \Psi_{\eta,n}(t)$ – проекция $I(t)$ на M векторов, индексы которых содержатся в некотором множестве P_M ; компонента $e(t) = \sum_{\eta,n \notin P_M} \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle \Psi_{\eta,n}$ – следствие влияния шумового фактора (предполагается, что данная компонентанекоррелированная и аддитивная).

Процедура выделения компонент $I_M(t)$ может быть основана на применении пороговых функций [24]

$$\sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = I_M(t) = \begin{cases} \sum_{\eta,n} d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t), & \text{если } |d_{\eta,n}| \geq T_{\eta} \\ 0, & \text{если } |d_{\eta,n}| < T_{\eta} \end{cases} \quad (5)$$

С учетом изменчивости ионосферного процесса в работе введены адаптивные пороги T_{η}^{ad} и коэффициенты $\{d_{\eta,n}\}_{(\eta,n) \in P_M}$ в соотношении (5) приняты равными

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^+, & \text{если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \geq T_{\eta} \\ d_{\eta,n}^-, & \text{если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \leq -T_{\eta} \end{cases},$$

где $T_{\eta}^{ad} = U * St_{\eta}$, величина $St_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{\Phi - 1} \sum_{n=1}^{\Phi} (d_{\eta,n} - \overline{d_{\eta,n}})^2}$, $\overline{d_{\eta,n}}$ и $d_{\eta,n}^{med}$ – среднее значение и медиана соответственно, которые с учетом суточного хода ионосферных данных вычисляются отдельно для каждого часа в скользящем временном окне длины Φ .

Поскольку амплитуда вейвлет-преобразования $|d_{\eta,n}|$ характеризует амплитуду возникшей аномальной особенности (т.е. величину отклонения функции от ее характерного уровня), ее логично определить в качестве меры ионосферной возмущенности. Оценка интенсивности аномалии в момент времени $t = n$ определялась по формуле

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

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

В соответствии с описанным выше, получаем следующий **алгоритм выделения аномальных периодов в ионосфере и оценки их параметров**:

1. Будем считать, что в момент времени $n = n_0$ в ионосфере возникла аномалия масштаба η_0 , если

$$|d_{\eta_0, n_0}| > T_{\eta_0}^{ad}.$$

2. Интенсивность возмущения I_{η_0, n_0} в момент времени n_0 на масштабе η_0 определим как

$$I_{\eta_0, n_0} = d_{\eta_0, n_0}.$$

3. Если $\forall n_i \in (t_1, t_2)$, $t_2 > t_1$: $d_{\eta_0, n_i} > T_{\eta_0}^{ad}$ то в период времени (t_1, t_2) наблюдалось ионосферное возмущение масштаба η_0 , длительность которого определим как

$$l_{\eta_0} = t_2 - t_1.$$

Оценка эффективности алгоритма. Для оценки эффективности алгоритма и возможности его реализации в режиме реального времени, в работе выполнены эксперименты по оценке влияния краевого эффекта, возникающего на краях временного ряда в процессе выполнения непрерывного вейвлет-преобразования (таблицы 1, 2). Оценки выполнялись отдельно для периодов спокойной и возмущенной ионосферы для различных моментов времени регистрации данных foF2 – k (разрыв ряда выполнялся каждые два часа, начиная с 00:00 UT). В точках разрыва k временной ряд дополнялся медианными значениями, рассчитанными для каждого часа на основе предыдущих значений (длина временного интервала для расчета медианных значений составляла 2 недели, 3 недели, 4 недели). Оценка влияния краевого эффекта выполнялась в зависимости от точек разрыва – k и длины временного интервала (таблица 1, 2).

Таблица 1. Оценка влияния краевого эффекта для периодов возмущенной ионосферы (величина временного интервала – 2 недели).

Даты, 2016 г	Точки разрыва временного ряда (UT)											
	00:00	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00
анализируемая магнитная буря 13.10.2016 г.												
11.10	166.40	169.16	176.05	198.75	218.45	223.04	232.47	241.78	250.44	259.78	267.48	270.37
12.10	264.56	254.41	255.39	272.27	294.37	320.05	345.78	374.25	401.94	420.12	435.82	458.59
13.10	433.71	412.83	385.65	381.18	380.35	385.51	393.48	406.05	419.54	430.00	435.16	429.55
анализируемая магнитная буря 25.11.2016 г.												
23.11	309.95	327.38	342.04	358.60	368.99	368.00	351.03	309.80	287.77	253.11	195.61	192.02
24.11	198.25	211.69	213.41	228.30	233.61	233.10	239.21	240.42	237.89	235.97	217.97	199.64
25.11	176.78	158.81	157.67	170.99	182.03	188.22	192.57	192.70	190.97	195.36	177.47	148.86

Таблица 2. Оценка влияния краевого эффекта для периодов спокойной ионосферы.

Анализируемый период, 2016 г	Точки разрыва временного ряда (UT)											
	00:00	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00
величина временного интервала для моделирования временного хода - 2 недели												
01.01-20.01	104.9	103.9	128.4	141.9	157.2	150.2	145.7	149.1	155.7	159.8	163.4	165.3
	1	4	9	1	2	2	9	6	8	6	7	6
09.07-02.08	144.1	135.9	141.7	152.3	154.9	158.9	163.3	169.2	175.2	177.6	169.3	167.1
	3	8	5	8	5	1	3	4	2	6	7	4
21.03-12.04	98.19	93.44	90.03	91.53	93.35	92.57	90.59	90.60	90.31	89.38	87.30	88.08
	118.2	139.4	156.9	169.0	159.9	125.7	103.8	100.5	104.0	107.2	110.1	109.7
05.09-26.09	8	1	5	4	1	8	0	9	5	0	2	2
19.02-10.03	44.19	34.26	41.41	43.71	42.49	44.67	48.63	51.61	54.23	57.97	59.08	49.20
15.06-05.07	78.29	73.58	67.87	68.17	77.32	70.66	51.31	26.18	26.59	35.82	32.21	23.72

величина временного интервала для моделирования временного хода - 3 недели												
01.01-20.01	86.24	92.02	118.9	132.3	146.9	136.5	129.2	129.4	135.8	139.8	143.8	146.1
	136.8	126.8	129.3	138.2	140.7	145.3	148.9	154.1	159.8	163.3	160.0	159.0
09.07-02.08	0	0	8	9	6	5	6	7	8	1	5	0
21.03-12.04	97.22	88.12	77.60	75.41	78.61	76.33	72.85	73.11	73.77	74.84	74.32	78.54
	124.3	144.2	163.3	178.0	173.2	136.2	104.3			103.0	107.8	109.0
05.09-26.09	8	6	3	0	2	6	0	94.98	98.53	1	8	4
19.02-10.03	40.82	42.67	50.53	48.76	48.77	46.43	47.55	49.35	50.95	50.64	45.51	37.62
15.06-05.07	67.9	70.45	75.84	82.41	95.16	99.60	86.70	53.66	48.00	55.46	42.39	33.67

величина временного интервала для моделирования временного хода - 4 недели												
01.01-20.01	80.12	84.97	109.2	119.9	130.0	115.2	104.1		103.4	106.5	111.2	115.0
	127.5	114.2	113.2	120.1	120.7	124.4	129.0	135.8	142.6	147.3	145.7	145.5
09.07-02.08	4	0	5	9	0	2	0	4	8	3	2	9
	104.2											
21.03-12.04	9	89.43	76.42	76.50	83.14	73.25	63.90	64.63	67.53	72.20	74.55	80.98
	127.8	145.5	163.3	179.6	179.9	142.5	101.4				102.6	105.4
05.09-26.09	5	9	7	2	7	7	8	88.59	91.55	97.16	2	3
19.02-10.03	44.17	44.84	50.44	50.77	50.95	49.14	51.97	54.36	56.86	58.27	54.74	46.10
		100.9	109.3	116.9	133.4	144.8	130.3					
15.06-05.07	93.68	2	2	1	0	6	5	73.33	59.54	59.04	44.61	52.03

Анализ полученных результатов показывает, что в возмущенные периоды (таблица 1) погрешность, связанная с краевым эффектом, превышает погрешность для спокойных периодов (таблица 2), что, очевидно, связано с возникновением аномальных периодов в ионосфере. Данные результаты подтверждают эффективность алгоритма, и возможность его использования для выделения аномалий в ионосфере в режиме, близком к реальному времени (по мере поступления данных регистрации).

3. Выделение аномалий в ионосфере

На рисунках 1,2 показаны результаты обработки ионосферных данных в период магнитной бури 17 февраля 2015г. Анализ космической погоды [<http://ipg.geospace.ru/>] показывает, что влияние скоростного потока солнечного ветра от коронарной дыры в вечернее время UT 16 февраля привело к снижению Dst индекса до значения -25 нТл. Примерно в 6:00 UT 17 февраля скорость потока солнечного ветра возросла до 380 км/с и продолжала расти до вечера UT 17 февраля.

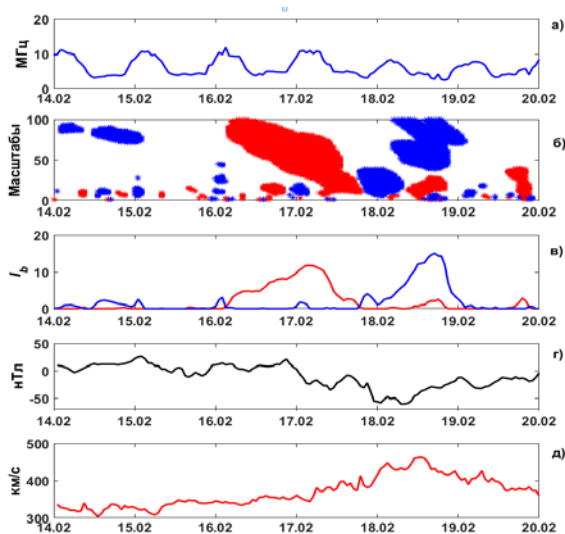


Рисунок 1. Результаты обработки ионосферных данных в период 14-19 февраля 2015 г. а) – данные foF2, ст. Паратунка; б) – выделенные аномалии; в) – интенсивность аномалий; г) – DST-индекс; д) – скорость солнечного ветра.

В этот период Dst-индекс продолжал снижаться до -50 нТл. Результаты обработки ионосферных параметров показывают возникновение крупномасштабной положительной аномалии (положительная ионосферная буря), возникшей накануне бури (рисунок 1 б,в, аномалия показана красным цветом). В конце суток 18 февраля электронная концентрация ионосферы существенно понизилась и возникла отрицательная аномалия (отрицательная ионосферная буря, рисунок 1 б,в, аномалия показана синим цветом). На рисунке 2 в-ж показаны результаты обработки данных в режиме оперативного анализа, которые показывают высокую чувствительность алгоритма и возможность его использования в режиме реального времени (по мере поступления данных в систему).

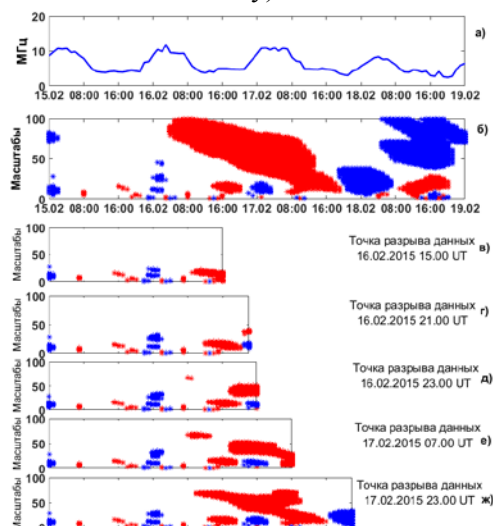


Рисунок 2. Результаты обработки ионосферных данных в период 15-18 февраля 2015 г. а) – данные foF2, ст. Паратунка; б) – выделенные аномалии; в) – ж) – выделение аномалий в период 00.00 15 февраля – точка разрыва.

4. Выводы

Результаты экспериментов показали эффективность предложенного в работе метода моделирования и анализа параметров ионосферы. Реализованный на основе метода алгоритм позволяет в оперативном режиме выполнять анализ параметров ионосферы и выделять аномальные изменения, связанные с возникновением ионосферных бурь.

5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №14-11-00194. Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим регистрацию ионосферных данных, которые использовались в работе.

6. Литература

- [1] Афраймович, Э.Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П.Перевалова. – Иркутск: ГУ НУ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
- [2] Будько, Н. Космическая среда вокруг нас / А.Н. Зайцев, А.Карпачев, А.Козлов, Б. Филиппов. – Троицк: ТРОВАНТ, 2006.– 232 с.
- [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] Благовещенский, Д.В. Механизм возрастания критической частоты ионосферы до начала суббури / Д.В. Благовещенский, А.С. Калишин // Геомагнетизм и аэрономия.– 2009.– Т. 49, № 3.– С. 213-223.

- [5] Данилов, А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (Обзор) / А.Д. Данилов // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – № 5. – С. 1-33.
- [6] Danilov, A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances / A.D. Danilov // *Advances in Space Research*. – 2013. – Vol. 52(3). – P. 343-366.
- [7] Mansilla, G.A. Ionospheric effects of an intense geomagnetic storm / G.A. Mansilla // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 2007. – Vol. 51(4). – P. 563-574.
- [8] 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. Klienskiy, V.V. Geppener, M.Y. Ilyash // *Annals of Geophysics*. – 2015. – Vol. 58. DOI:10.4401/ag-6729.
- [9] 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. Solovev, M.S. Kupriyanov // *Earth, Planets and Space*. – 2015. – Vol. 67(1). – P. 131-146. DOI: 10.1186/s40623-015-0301-4.
- [10] Mandrikova, O.V. Ionospheric parameter analysis and discovery of anomaly during ionospheric storms / O.V. Mandrikova, N.V. Fetisova, Yu.A. Polozov // *Proceedings of the 11th International School and Conference “Problems of Geocosmos”* (Oct. 03-07, 2016, St. Petersburg, Russia). – 2017. – P. 262-270.
- [11] Перевалова, Н.П. Исследование ионосферных возмущений методом трансionoсферного GPS-зондирования / Н.П. Перевалова // Автореферат диссертации доктора физико-математических наук. – Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, 2014 г.
- [12] 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.
- [13] 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. DOI: 10.7868/S0016794015050156.
- [14] Bilitza, D. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters / D. Bilitza, B.W. Reinisch // *Advances in space research*. – 2008. – Vol. 42. – P. 599-609.
- [15] Kakinami, Y. 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 // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 31(13). – P. 3571-3578.
- [16] Mikhailov, A. A method for foF2 monitoring over Spain using the El Arenosillo digisonde current observations / A. Mikhailov, B. Morena, G. Miro, D. Marin // *Annals of Geophysics*. – 1999. – Vol. 42(4). DOI:10.4401/ag-3748.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Мандрикова, О.В. Моделирование сигнала критической частоты на основе нейронных сетей с целью поиска аномального поведения / О.В. Мандрикова, В.В. Богданов, Ю.А. Полозов // *Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2006): сб. докл.* – Санкт-Петербург: Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. – 2006. – Т. 2. – С. 158-160.

- [21] Anshakov, G.P. Hyperspectral and multispectral resurs-p data fusion for increase of their informational content / G.P. Anshakov, A.V. Raschupkin, Y.N. Zhuravel // *Computer Optics*. – 2015. – Vol. 39(1). – P. 77-82.
- [22] Denisova, A.Y. Estimation of parameters of a linear spectral mixture for hyperspectral images with atmospheric distortions / A.Y. Denisova, Y.N. Juravel, V.V. Myasnikov // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(3). – P. 380-387. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-380-387.
- [23] Denisova, A.Yu. Anomaly detection for hyperspectral imaginary / A.Yu. Denisova, V.V. Myasnikov // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(2). – P. 287-296.
- [24] Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – Москва: Мир, 2005. – 672 с.
- [25] Чуи, К. Введение в вейвлеты / К. Чуи. – Москва: Мир, 2001. – 412 с.
- [26] Мандрикова, О.В. Анализ и интерпретация геофизических параметров на основе многокомпонентных моделей / О.В. Мандрикова, Ю.А. Полозов, В.В. Богданов, В.В. Геппенер. – Владивосток: Издательство «Дальнаука», 2013. – 192 с.

Method for the analysis of ionospheric parameter and the detection of ionospheric anomalies in the tasks of online data processing

O.V. Mandrikova¹, N.V. Fetisova¹, Yu.A. Polozov¹

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

Abstract. The present paper considers a method of the ionospheric data analysis based on the application of wavelet-transform and threshold functions. The method allows us to perform detailed analysis of ionospheric parameters and to detect anomalies, occurring during ionospheric disturbances, in the operational mode. The method is adapted for 15-minute data of vertical sounding of the ionosphere (the critical frequency of the ionospheric layer F2, the data of the station "Paratunka", Kamchatkiy krai). The estimates showed high sensitivity of the method, and the possibility of its implementation in real time (as registration data are received). The research was supported by the RSF Grant No. 14-11-00194.

Keywords: ionospheric data, wavelets, anomalies, real time.