

УДК 519

О. В. Мандрикова, Ю. А. Полозов, Т. Л. Заляев  
*Институт космических исследований и распространения  
радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии*

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

## **Анализ динамики космических лучей и параметров ионосферы в периоды повышенной солнечной активности и магнитных бурь (по данным наземных станций)**

*Применены новые методы анализа данных, основанные на нейронных сетях и вейвлет-преобразовании. Методы позволили выделить в космических лучах аномальные повышения интенсивности (предповышения), возникающие за 8...20 ч до начала сильных магнитных бурь (проанализированы события за 2010–2015 гг.). В периоды выделенных предповышений обнаружено существенное возрастание электронной концентрации в ионосфере, характеризующее возникновение положительных ионосферных бурь. Выделенные ионосферные аномалии наблюдались накануне сильных магнитных бурь на разных станциях с возможной задержкой по времени до суток. В периоды основных фаз магнитных бурь наблюдался эффект форбуш-понижения и электронная концентрация в ионосфере существенно понижалась. Полученные результаты представляют интерес в задачах космической погоды и могут служить дополнительным фактором предсказания сильных магнитных бурь. Исследование поддержано грантом Российского научного фонда, проект № 14-11-00194.*

### **Вейвлеты, нейронные сети, космические лучи, ионосфера, аномалии, магнитные бури**

**Введение и постановка задачи.** Работа направлена на создание методов анализа геофизических данных сложной структуры. Задачи анализа геофизических данных решаются большим количеством научных групп и исследователей в разных странах мира. Актуальность этих исследований определяется широким спектром проблем теории обработки прямых экспериментальных данных в различных областях. Исследования аворов статьи были направлены на изучение нестационарных динамических процессов в магнитосферно-ионосферной системе и связаны с мониторингом и прогнозом состояния околоземного пространства. Аномальные процессы и явления на Солнце являются причиной серьезных нарушений и сбоев в работе современных технических средств, а также влияют на самочувствие людей. Это определяет прикладную значимость исследований. В настоящее время выполняется непрерывный мониторинг явлений на Солнце и в околоземном космическом

пространстве, существует широкая сеть наземных станций регистрации данных, формируются базы данных. Но, несмотря на наличие значительного экспериментального материала и стремительное развитие методов обработки и анализа данных, в т. ч. с использованием современных математических и информационно-коммуникационных средств и технологий, проблема успешного прогноза космической погоды пока далека от решения. В статье выполнен совместный анализ данных космических лучей (КЛ) и ионосферных параметров. Наблюдения КЛ используются при проведении ряда фундаментальных и прикладных исследований, связанных с мониторингом и прогнозом космической погоды [1], [2]. Данные КЛ имеют сложную структуру, в их динамике находит отражение 11-летний цикл и 27-дневный солнечный период вращения [3], также присутствует суточный ход, обусловленный асимметрией формы магнитосферы [4]. Наиболее существенные изменения в КЛ вызывают выбросы коронарной

массы, за которыми следуют изменения в параметрах межпланетного магнитного поля и солнечного ветра [1], [5]. Они приводят к возникновению в КЛ спорадических вариаций (форбуш-понижений и сильных наземных возмущений интенсивности КЛ), являющихся предметом данного исследования.

Сложная структура данных КЛ и неполные априорные знания о процессах в околоземном пространстве затрудняют процесс построения эффективных методов их анализа. Используемые традиционные спектральные и усредняющие методы [6]–[12] позволяют выделить устойчивые характеристики динамики КЛ, но малоэффективны для изучения тонких спорадических изменений [6], [9], [11]. Современные глобальные методы [9], [13]–[19] позволяют более точно определять динамические особенности в КЛ, но они требуют трудоемких расчетов и их автоматизация весьма затруднена. В работе анализ КЛ был основан на совместном применении нейронных сетей (НС) и вейвлет-преобразования [5], [11], [12], [20]–[23]. Впервые способ совместного применения данных математических аппаратов для изучения сложных временных рядов был предложен в [24], [25]. Применение методов позволило выделить в динамике КЛ аномальные повышения интенсивности (предповышения), возникающие за 8...20 ч до начала сильных магнитных бурь. Впервые подобные аномалии в КЛ обнаружены и описаны в [21], [22], [26], [27]. Их своевременное обнаружение представляют интерес в задачах космической погоды [19], [26], [27]

Анализ ионосферных параметров в работе выполнялся на основе непрерывного вейвлет-преобразования. Используемые вычислительные решения подробно описаны в [28], [29]. Они позволяют детально анализировать регистрируемые ионосферные параметры и выделять аномальные изменения, возникающие в периоды ионосферных возмущений. Известно, что наиболее сильные ионосферные возмущения происходят во время солнечных событий и магнитных бурь, изучение которых имеет важное научное и прикладное значение [28]–[32].

Выполненный в работе совместный анализ параметров ионосферы и данных КЛ показал, что в периоды аномального повышения интенсивности КЛ, наблюдаемого накануне сильных магнитных бурь, возрастала электронная концентрация в ионосфере и возникали положительные ионосферные бури. В периоды основных фаз магнит-

ных бурь в большинстве анализируемых случаев наблюдался эффект форбуш-понижения и электронная концентрация в ионосфере существенно понижалась. Полученные результаты, по мнению авторов, свидетельствуют о солнечной природе выделенных аномальных изменений в ионосфере и подтверждают их прикладную значимость.

**Используемые в анализе данные.** В работе были проанализированы параметры ионосферы и данные КЛ в периоды сильных и умеренных магнитных бурь, произошедших в 2010–2015 гг. В обработке использовались данные:

– критической частоты ионосферного слоя F2 станций «Паратунка» (Россия, координаты станции 53.0° с. ш. и 158.7° в. д.), «Якутск» (Россия, координаты станции 62.0° с. ш. и 129.6° в. д.), «Томск» (Россия, координаты станции 56.5° с. ш., 84.9° в. д.), «Гакона» (США, координаты станции 54.0° с. ш. и 215.0° в. д.), «Кокубунджи» (Япония, координаты станции 35.7° с. ш. и 135.9° в. д.), «Вакканай» (Япония, координаты станции 45.16° с. ш. и 141.75° в. д.), Норфолк (Австралия, координаты станции – 35.6° с. ш., 160° в. д.). Для получения данных использовались ресурсы <http://spidr.ionosonde.net/spidr> и <http://wdc.nict.go.jp>. В анализе использовались данные станций, близких по долготе и/или широте. При выборе станций также учитывалось наличие пропусков в данных;

– нейтронных мониторов станций Кингстон (Австралия, 42.53° ю. ш. 147.2° в. д.), Апатиты (Россия, 67.34° с. ш. 33.23° в. д.) и Мыс Шмидта (Россия, 68.5° с. ш. 179.3° з. д.). Для получения данных использовался ресурс [www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu). В анализе использовались данные станций, существенно разнесенных по широте. При выборе станций также учитывалось наличие пропусков в данных.

В обработке использовались данные, содержащие не более 8% пропусков. Пропуски в ионосферных данных заполнялись медианными значениями, которые рассчитывались с учетом суточного хода в скользящем временном окне, равном 10 сут. Пропуски в данных КЛ, не превышающие по длительности 12 мин, заполнялись на основе сплайн-интерполяции, более длительные по времени пропуски в данных КЛ заполнялись на основе ZET-алгоритма [33].

**Методы анализа данных. Моделирование временного хода данных КЛ и выделение спорадических вариаций.** Моделирование временного хода данных КЛ основано на следующих операциях:

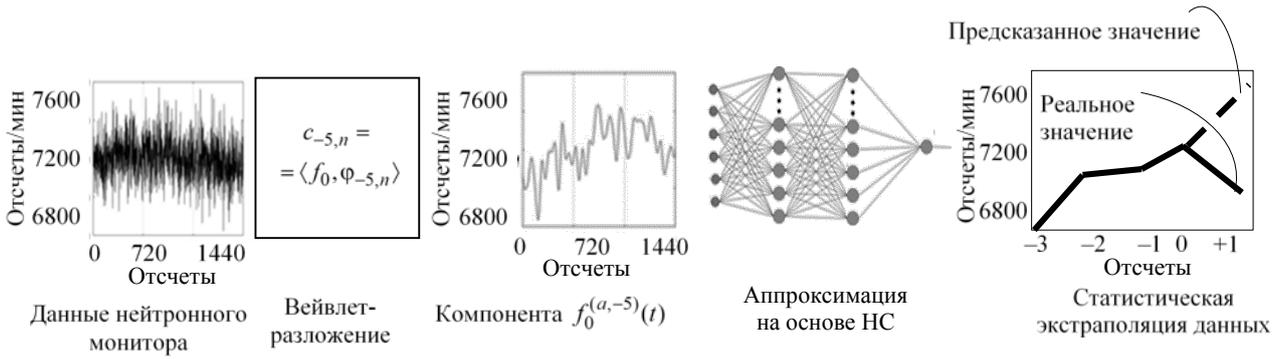


Рис. 1

Выполнялось кратномасштабное вейвлет-преобразование данных до уровня  $m = 5$  [34], [35]:

$$f_0(t) = f^a[2^{-5}t] + \sum_{j=-1}^5 f^d[2^j t], \quad (1)$$

где

$$f^a[2^{-5}t] \in V_{-5}, \quad V_{-5} = \text{clos}_{L^2(R)} \left[ 2^{-\frac{5}{2}} \varphi(2^{-5}t - n) \right],$$

$$n \in Z, \quad f^a[2^{-5}t] = \sum_n c_{-5,n} \varphi_{-5,n}(t),$$

$$c_{-5,n} = \langle f_0, \varphi_{-5,n} \rangle; \quad f^d[2^j t] \in W_j,$$

$$W_j = \text{clos}_{L^2(R)} \left[ 2^{\frac{j}{2}} \Psi(2^j t - n) \right],$$

$$f^d[2^j t] = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t), \quad d_{j,n} = \langle f_0, \Psi_{j,n} \rangle,$$

$\varphi$  – масштабирующая функция;  $\Psi$  – вейвлет;  $j$  – масштаб.

С целью восстановления исходного разрешения данных для компоненты  $f^a[2^{-5}t]$  применялась операция обратного вейвлет-преобразования:

$$f_0^{a,-5}(t) = \sum_n c_{0,n}^{-5} \varphi_{0,n}(t), \quad (2)$$

верхний индекс  $-5$  указывает на разрешение компоненты до выполнения операции обратного вейвлет-преобразования;  $\varphi_{0,n} = \varphi(2^0 t - n) = \varphi(t - n)$ ,  $\varphi$  – масштабирующая функция.

Затем выполнялась аппроксимация компоненты  $f_0^{a,-5}$  на основе многослойных нейронных сетей прямого распространения [36]:

$$c_{0,n}^{(-5)} = \sum_{i=1}^{\gamma_2} \alpha_i \Phi_{\text{sygm}} \times$$

$$\times \left[ \sum_{j=1}^{\gamma_1} \omega_{ij} \Phi_{\text{sygm}} \left( \sum_{k=1}^{\gamma_0=6} \omega_{jk} c_{0,n-k}^{(-5)} + \beta_k \right) + \beta_j \right] + \beta_i, \quad (3)$$

$\omega_{jk}, \omega_{ij}, \alpha_i$  – весовые коэффициенты НС;  $\beta_k, \beta_j,$

$\beta_i$  – пороговые коэффициенты НС;  $\Phi_{\text{sygm}}(z) =$

$$= \frac{1}{1 + e^{-\alpha z}}.$$

Схема преобразования данных КЛ на основе выполнения операций (1)–(3) представлена на рис. 1.

Архитектура построенной НС приведена на рис. 2. Оценки адекватности выполняемых операций (1)–(3) приведены в [37], где показано, что выполнение операции (3) позволяет воспроизводить характерный временной ход данных КЛ. Тогда, очевидно, в периоды аномальных изменений временного хода КЛ и возникновения спорадических вариаций абсолютные значения ошибок НС существенно возрастут. Поэтому операция выделения спорадических вариаций в данных КЛ может быть основана, например, на проверке следующего условия:

$$|e(t)| > T_s,$$

где  $T_s$  – пороговое значение, определяющее возникновение в данных аномальных изменений. В данной работе использовался порог  $T_s = 2.5 \sigma_{\text{calm}}$ , где  $\sigma_{\text{calm}}$  – среднеквадратическая ошибка НС на периодах, используемых при обучении НС.

*Замечание.* Отметим, что на основе операции (3) могут быть выделены спорадические вариации КЛ, периоды колебаний которых примерно от 60 мин и более (амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтров для  $m = 1, \dots, 5$  показаны на рис. 3: 1 – первого уровня разложения; 2 – второго уровня разложения; 3 – третьего уровня

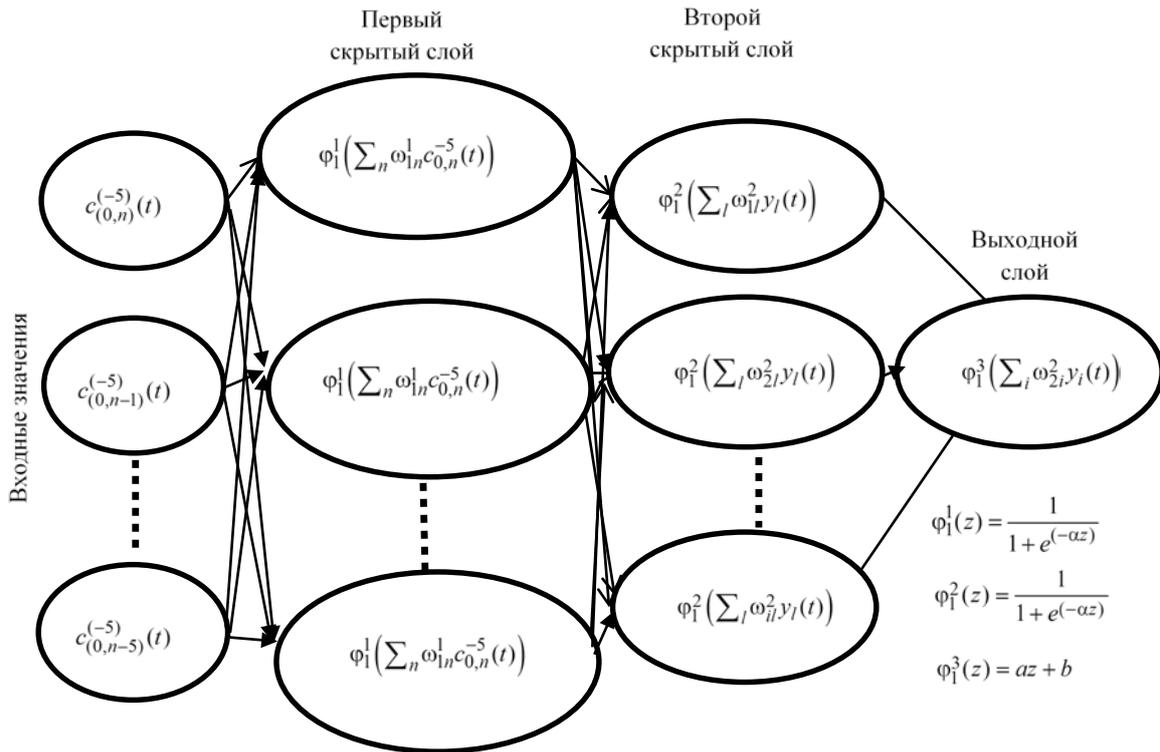


Рис. 2

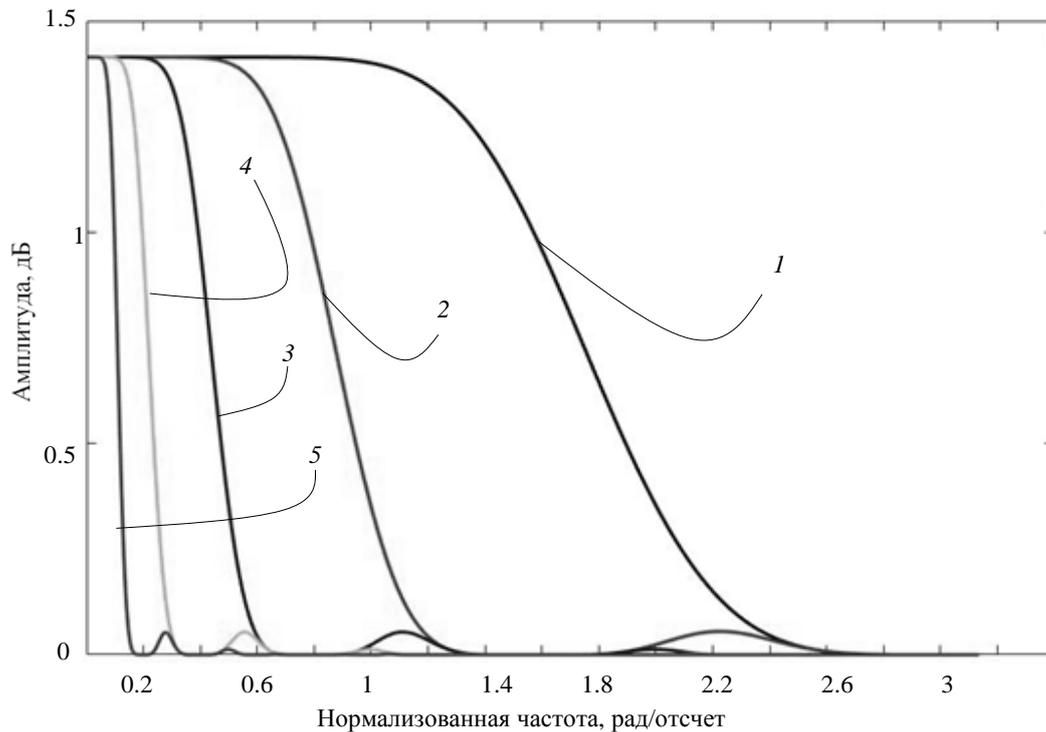


Рис. 3

разложения; 4 – четвертого уровня разложения; 5 – первого пятого уровня разложения). Данные anomальные изменения в КЛ могут возникать в периоды длительных форбуш-эффектов [13], [27].

**Выделение кратковременных спорадических вариаций КЛ.** Кратковременные спорадические

вариации в данных КЛ наблюдаются в периоды anomальных повышений и понижений интенсивности КЛ [14], [26], [27]. Они могут возникать накануне сильных магнитных бурь и использоваться в качестве их предикторов [9], [14], [26], [27]. Поэтому выделение данных anomальных

ных особенностей в динамике КЛ представляет научный и практический интерес.

В работе для выделения кратковременных спорадических вариаций КЛ применялись следующие операции.

Выполнялось непрерывное вейвлет-преобразование данных [34]:

$$W_{\Psi} f_{b,s} := |s|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{s}\right) dt, \quad (4)$$

где  $f \in L^2(R)$ ,  $s, b \in R$ ,  $s \neq 0$ ;  $\Psi$  – вейвлет; параметр  $s$  характеризует масштаб;  $b$  – время.

Применялась пороговая функция:

$$P_{T_s^l}^{CR}(W_{\Psi} f_{b,s}) = \begin{cases} W_{\Psi} f_{b,s}, & \text{если } (W_{\Psi} f_{b,s} - W_{\Psi} f_{b,s}^{\text{med},l}) \geq T_s^l; \\ 0, & \text{если } |W_{\Psi} f_{b,s} - W_{\Psi} f_{b,s}^{\text{med},l}| < T_s^l; \\ -W_{\Psi} f_{b,s}, & \text{если } (W_{\Psi} f_{b,s} - W_{\Psi} f_{b,s}^{\text{med},l}) < -T_s^l, \end{cases} \quad (5)$$

где  $W_{\Psi} f_{b,s}^{\text{med},l}$  – медианное значение вейвлет-коэффициента  $W_{\Psi} f_{b,s}$ , рассчитанное в скользящем временном окне длины  $l$ ;  $T_s^l = U \cdot \sigma_s^l$  – порог, где  $\sigma_s^l = \sqrt{\left(\frac{1}{l-1} \sum_{k=1}^l (W_{\Psi} f_{b,s} - \overline{W_{\Psi} f_{b,s}})\right)^2}$  – стандартное отклонение, рассчитанное в сколь-

зящем временном окне длины  $l$ ;  $\overline{W_{\Psi} f_{b,s}}$  – среднее значение;  $U$  – пороговый коэффициент.

В работе использовалась длина скользящего временного окна  $l=1440$  отсчетов, что соответствует 1 сут (определена с учетом суточного хода КЛ). Выбор анализирующего вейвлета  $\Psi$  основывался на следующих критериях, предложенных в [25]: число нулевых моментов, гладкость вейвлета и размер носителя. С учетом данных критериев в работе был определен вейвлет Койфлет порядка 1 (coif1), который имеет наименее возможную длину носителя и обеспечивает детектирование особенности. Пороговый коэффициент  $U$  определялся путем оценки апостериорного риска [38]. В оценках использовались реальные и модельные данные. Сформированные модельные сигналы по структуре соответствуют реальным данным. Они содержат рекуррентную составляющую, разномасштабные аномальные особенности и белый шум. Схема формирования модельных сигналов представлена на рис. 4. Пример формирования модельного сигнала, содержащего локальную особенность, по форме соответствующую форбуш-понижению, показан на рис. 5:  $a$  – модельный сигнал, содержащий отрицательный треугольный импульс;  $b$  – данные нейтронного монитора за период с 1.04.2010 по 07.04.2010 гг., содержащие форбуш-понижение.

Результаты статистического моделирования для разных значений порогового коэффициента  $U$  приведены в табл. 1. В соответствии с выполненными оценками в работе использовался  $U = 2.5$ .

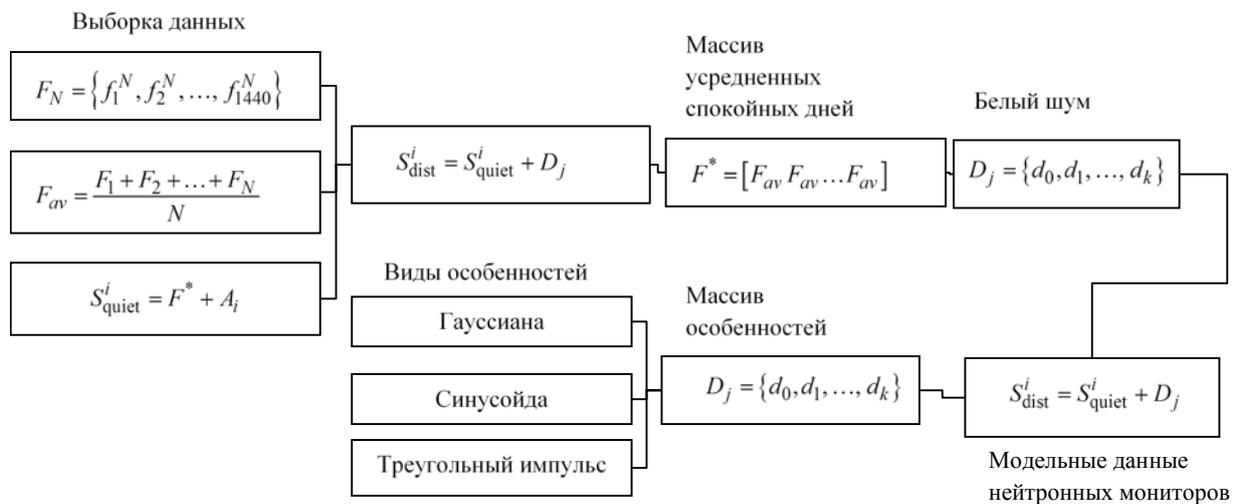


Рис. 4

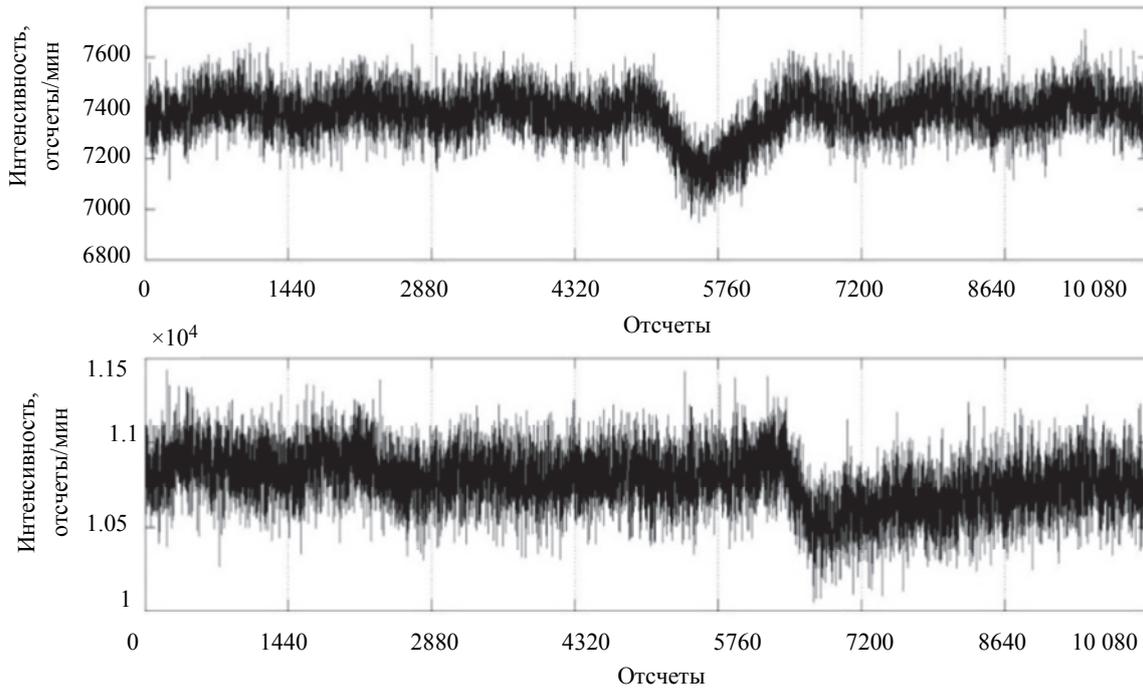


Рис. 5

Таблица 1

Пороговый коэффициент ( $U$ )	Выделенные аномалии, %		Ложные срабатывания, %
	Положительные	Отрицательные	
2,0	89	97	27
2.1	88	94	24
2.2	86	91	21
2.3	85	89	19
2.4	84	86	17
2.5	83	85	15

Применение операции (5) позволяет фиксировать моменты возникновения аномальных повышений и понижений интенсивности КЛ. Для оценки интенсивности выделенного аномального повышения/понижения в момент времени  $t = b$  использовалась величина

$$Y_b = \sum_s P_{(T'_s)}^{CR} (W_{\Psi} f_{b,s}),$$

которая в случае повышения будет положительной, а в случае понижения – отрицательной.

**Детальный анализ ионосферных параметров и выделение периодов ионосферных возмущений.** В периоды ионосферных бурь в регистрируемых ионосферных параметрах наблюдаются аномальные изменения, которые свидетельствуют о возникновении ионосферного возмущения. Отклонение текущего значения параметра от его характерного значения, очевидно, характеризует интенсивность возникшего ионосферного возмущения (интенсивность аномалии). Опера-

тивное выделение ионосферных возмущений имеет важное прикладное и научное значение [30], [39]–[42]. Обработка параметров ионосферы и выделение периодов ионосферных возмущений выполнялись на основе следующих операций.

Выполнялось непрерывное вейвлет-преобразование данных (4). Применялась пороговая функция:

$$P_{Q_s} (W_{\Psi} f_{b,s}) = \begin{cases} W_{\Psi} f_{b,s}, & \text{если } |W_{\Psi} f_{b,s} - W_{\Psi} f_{b,s}^{\text{med}}| \geq Q_s; \\ 0, & \text{если } |W_{\Psi} f_{b,s} - W_{\Psi} f_{b,s}^{\text{med}}| < Q_s, \end{cases} \quad (6)$$

где порог  $Q_s = M \cdot St_s$  определяет наличие ионосферной аномалии масштаба  $s$  в окрестности точки  $t = b$ , содержащейся в носителе вейвлета  $\Psi_{b,s}$ ;  $M$  –

пороговый коэффициент;  $St_s = \left[ \frac{1}{\Phi - 1} \sum_{k=1}^{\Phi} (W_{\Psi} f_{b,s} - \right.$

$-\overline{W_{\Psi} f_{b,s}})^2 \Big]^{1/2}$ ;  $\overline{W_{\Psi} f_{b,s}}$  и  $W_{\Psi} f_{b,s}^{\text{med}}$  – среднее

значение и медиана, соответственно, определяемые в скользящем временном окне длины  $\Phi$ .

В моменты возникновения ионосферных аномалий  $t = b$  выполнялась оценка их интенсивности (отдельно для положительных  $P_{Q_s}^+(W_{\Psi} f_{b,s})$  и отрицательных  $P_{Q_s}^-(W_{\Psi} f_{b,s})$  значений функции  $P_{Q_s}(W_{\Psi} f_{b,s})$ ):

$$I_b^{+-} = \sum_s \frac{P_{Q_s}^{+-}(W_{\Psi} f_{b,s})}{\|W_{\Psi} f_{b,s}\|_2}, \quad (7)$$

где норма  $\|W_{\Psi} f_{b,s}\| = \sqrt{\sum_{N_s} (P_{Q_s}(W_{\Psi} f_{b,s}))^2}$ ;  $N_s$  –

длина временного ряда на масштабе  $s$ .

В работе пороговый коэффициент  $M$  определялся на основе критерия наименьшей частоты ошибок (оценивался и минимизировался апостериорный риск). При оценке апостериорного риска для определения состояния ионосферы использовался индекс геомагнитной активности  $K$ . Для периодов с высоким (параметр  $f_{10.7} > 100$ ) и низким (параметр  $f_{10.7} \leq 100$ ) уровнями солнечной активности пороговый коэффициент  $M$  определялся отдельно. Например, для станции «Паратунка» (Россия,  $53.0^\circ$  с. ш. и  $158.7^\circ$  в. д.) определены следующие значения порогового коэффициента:  $2.5 \leq M \leq 3.5$  – для периодов высокой солнечной активности;  $1.5 \leq M \leq 2.5$  – для периодов низкой солнечной активности.

**Результаты экспериментального исследования.** На рис. 6 показаны результаты обработки данных в период умеренной магнитной бури, зарегистрированной на Земле 21 января 2015 г.;  $a$  – данные нейтронного монитора, Кингстон ( $42.5^\circ$  ю. ш.,  $147.2^\circ$  в. д.);  $b$  – компонента  $\|W_{\Psi} f_{b,s}\|_2 =$

$= \sqrt{\sum_{N_s} (P_{Q_s}(W_{\Psi} f_{b,s}))^2} f_0^{a,(-5)}$  и ее модель;  $v$  –

ошибка нейронной сети;  $z$  – выделенные положительные (серым) и отрицательные (черным) аномалии;  $d$  – интенсивность положительных и отрицательных аномалий;  $e$  – данные foF2, «Паратунка» ( $53.0^\circ$  с. ш.,  $158.7^\circ$  в. д.);  $ж$  – выделенные ионосферные аномалии, «Паратунка» ( $53.0^\circ$  с. ш.,  $158.7^\circ$  в. д.);  $з$  – интенсивность ионосферных

аномалий, «Паратунка» ( $53.0^\circ$  с. ш.,  $158.7^\circ$  в. д.);  $u$  – индекс Dst;  $k$  – скорость солнечного ветра; по оси  $OX$  указаны даты. По данным космической погоды [<http://ipg.geospace.ru/>] 21 января из-за ускоренного потока от корональной дыры скорость солнечного ветра увеличилась до 550 км/с, южная Vz-компонента межпланетного магнитного поля (ММП) опустилась до значения – 15 нТл. Результаты обработки данных КЛ (рис. 6,  $z$ ) показывают возникновение положительной аномалии за 20 ч до начала магнитной бури (положительная аномалия показана на рис. 6,  $z$  серым цветом). Далее, примерно за 5 ч до начала магнитной бури уровень КЛ понизился, о чем свидетельствует возникшая отрицательная аномалия в данных КЛ (отрицательная аномалия показана на рис. 6,  $z$  черным цветом). Ошибки НС в период понижения уровня КЛ возросли в 5 раз, и оставались большими на протяжении 2 сут (рис. 6,  $v$ ), что характеризует возникновение длительного фобуш-понижения. Результаты обработки ионосферных данных (рис. 6,  $ж$ ,  $з$ , применялись операции (6), (7) показывают в моменты начала магнитной бури возникновение в ионосферных параметрах положительной аномалии (рис. 6,  $ж$  – серым цветом), которая свидетельствует о возникшем ионосферном возмущении (аномальное повышение электронной концентрации). В период главной фазы бури электронная концентрация в ионосфере оставалась аномально повышенной, максимальных значений аномалия достигла в 05.00 UT 22 января. По результатам обработки событий в период 2010–2016 гг. [28]–[30], [43] подобное поведение ионосферы не является характерным в анализируемых районах, но может наблюдаться в периоды умеренных магнитных бурь.

На рис. 7 показаны результаты обработки данных в период сильной магнитной бури, зарегистрированной на станции «Паратунка» в 4.45 UT 17 февраля 2015 г.:  $a$  – данные нейтронного монитора, Кингстон ( $42.5^\circ$  ю. ш.,  $147.2^\circ$  в. д.);  $b$  – компонента  $f_0^{a,(-5)}$  и ее модель;  $v$  – ошибка нейронной сети;  $z$  – выделенные положительные (серым) и отрицательные (черным) аномалии;  $d$  – интенсивность положительных и отрицательных аномалий;  $e$  – данные foF2, «Паратунка» ( $53.0^\circ$  с. ш.,  $158.7^\circ$  в. д.);  $ж$  – выделенные ионосферные аномалии, «Паратунка» ( $53.0^\circ$  с. ш.,  $158.7^\circ$  в. д.);  $з$  – интенсивность ионосферных аномалий, «Паратунка» ( $53.0^\circ$  с. ш.,  $158.7^\circ$  в. д.);  $u$  – выделенные ионосферные аномалии, «Вакканай» ( $45.16^\circ$  с. ш.,  $141.75^\circ$  в. д.);  $k$  – интенсивность ионосферных аномалий, «Вакканай»

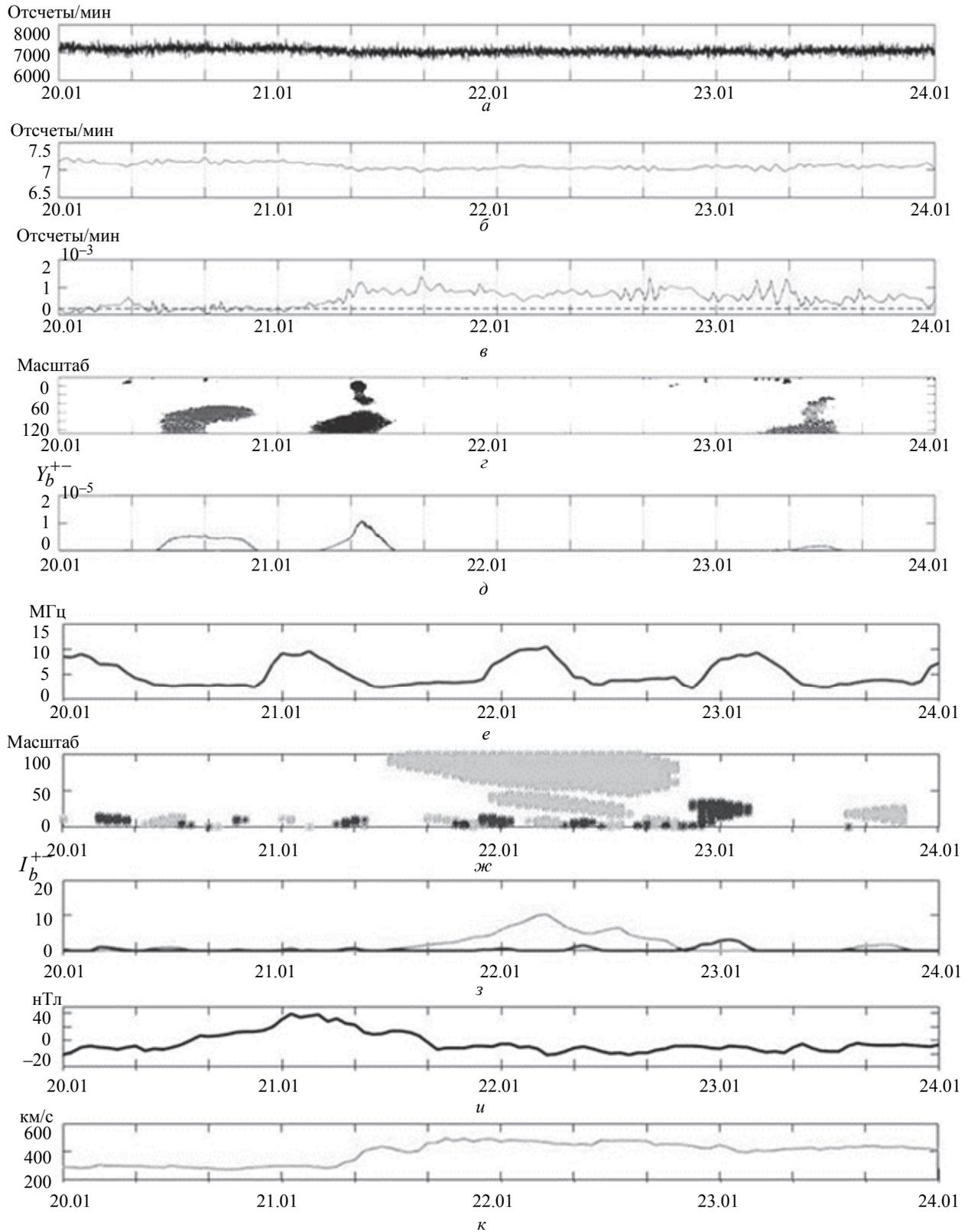


Рис. 6

(45.16° с. ш., 141.75° в. д.);  $l$  – индекс Dst;  $m$  – скорость солнечного ветра; по оси  $OX$  указаны даты. По данным космической погоды [<http://irg.geospace.ru/>] влияние скоростного потока сол-

нечного ветра от коронарной дыры в вечернее время UT 16 февраля привело к снижению индекса Dst до значения  $-25$  нТл. Примерно в 6:00 UT 17 февраля скорость солнечного ветра воз-

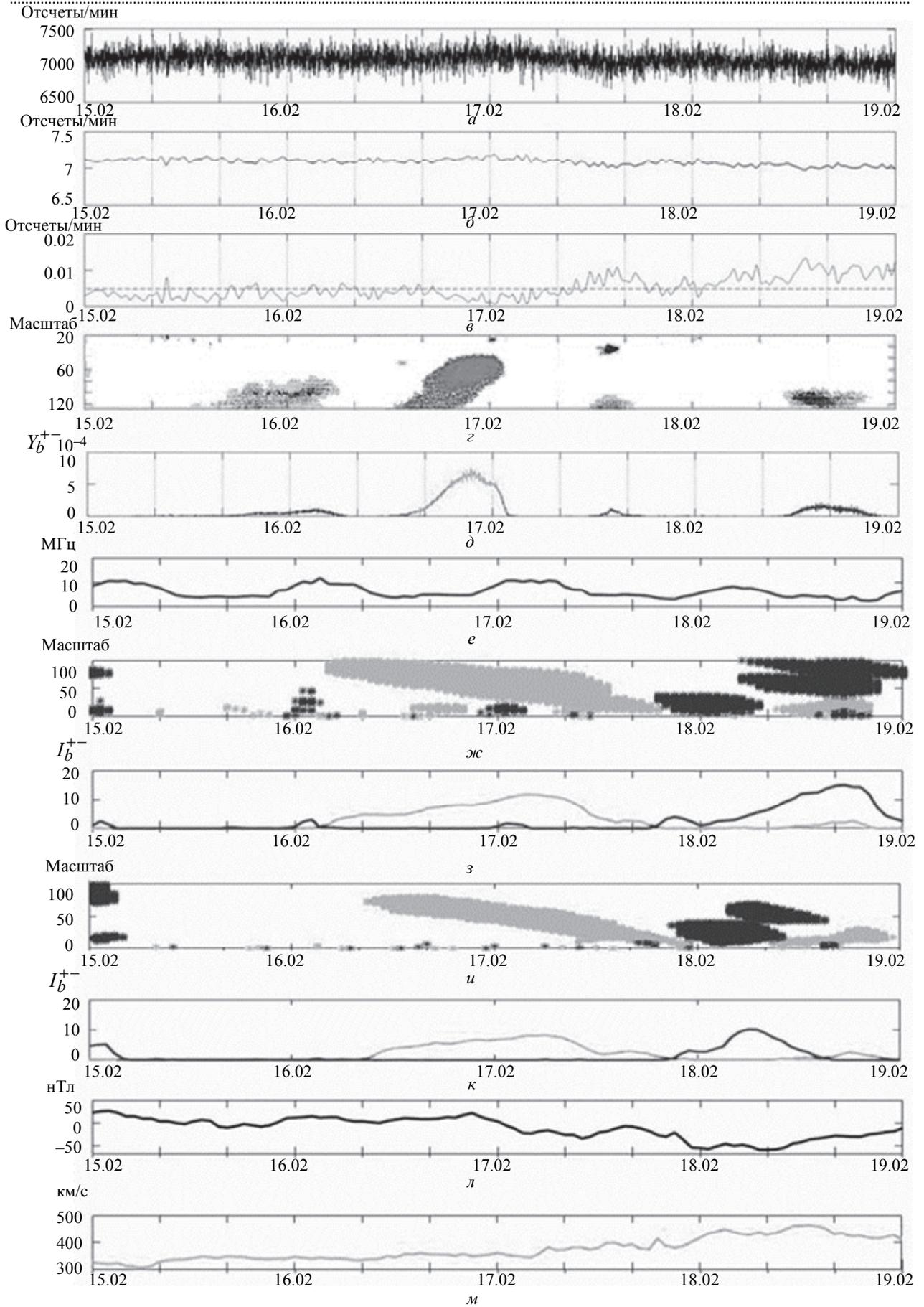


Рис. 7

росла до 380 км/с и продолжала расти до вечера UT 17 февраля. В этот период Dst-индекс продолжал снижаться до значения –50 нТл. Результаты анализа ионосферных параметров станции «Паратунка» показывают возникновение длительной положительной аномалии за 25 ч до начала магнитной бури (аномалия показана серым цветом на рис. 7, ж). Максимальных значений интенсивность ионосферной аномалии достигла в 04.00 UT 17 февраля 2015 г. (см. рис. 7, з). В конце суток 18 февраля электронная концентрация ионосферы существенно понизилась и возникла отрицательная ионосферная буря (на рис. 7, ж аномалия показана черным цветом). Результаты обработки ионосферных данных станции «Вакканай» демонстрируют аналогичных характер поведения ионосферы со смещением по времени в 3...5 ч (см. рис. 7, и, к), что свидетельствует о крупных пространственных масштабах наблюдаемых ионосферных аномалий. Результаты обработки событий 2010–2016 гг. (табл. 2) показали, что по данным анализируемых станций подобное поведение ионосферы является характерным в периоды повышенной солнечной активности и сильных магнитных бурь. Анализ данных КЛ (см. рис. 7, з, д) показывает, что в период повышения электронной концентрации в ионосфере наблю-

далось существенное возрастание интенсивности КЛ (возникло за 20 ч до начала магнитной бури). В моменты начала магнитной бури интенсивность КЛ понизилась (наблюдается возникновение отрицательной аномалии и возрастание ошибок НС, см. рис. 7, в), которая, вероятно, связана с возникшим форбуш-понижением малой амплитуды.

Сопоставляя результаты обработки данных КЛ и параметров ионосферы (табл. 2, где представлены результаты обработки данных КЛ (анализировались данные станций «Кингстон») и параметров ионосферы (анализировались данные станции «Паратунка») в периоды магнитных бурь 2010–2015 гг.), можно с большой вероятностью предвещать солнечную природу выделенных аномальных изменений. Это подтверждает предложенную в [40] гипотезу о том, что подобные аномальные эффекты в ионосфере связаны с неким каналом проникновения энергии из межпланетного пространства и магнитосферы и имеют важную научную и прикладную значимость.

На примере обработки данных станций нейтронных мониторов и ионосферных данных показана эффективность и высокая чувствительность предлагаемых методов анализа данных. Разработанные вычислительные решения апробированы на модельных данных, показана воз-

Таблица 2

Дата события / время начала (UT) / характер события: ПН – постепенное начало, РН – резкое начало / сила бури	Наличие (отсутствие) аномалии накануне бури: П – положительная, О – отрицательная / длительность / за сколько часов до начала бури выделена		Наличие (отсутствие) аномалии в период бури: П – положительная, О – отрицательная / длительность	
	Ионосфера	КЛ	Ионосфера	КЛ
5.04.2010 / 8.26 / РН / Кр 8	П / 17 ч / 16 ч	П / 20 ч / 25 ч	О / 29 ч	О / 8 ч
3.08.2010/18.40–18.50/ПН/Кр 7	П / 38 ч / 19 ч	П / 8ч / 8 ч	О / 10 ч	О / 12 ч
7.03.2012/05.28–05.45/ПН/Кр 6	П / 37 ч / 12 ч	П / 10 ч / 21 ч	О / 17 ч	О / 16 ч
17.03.2013 / 06.05 / РН / Кр 7	П / 31 ч / 27 ч	П / 3 ч / 4 ч	О / 22 ч	О / 10 ч
2.10.2013 / 01.52 / РН / Кр 8	П / 38 ч / 27 ч	П / 5 ч / 6 ч	О / 20 ч	О / 12 ч
8.12.2013/1.00–2.20/ПН / Кр 6	О / 28 ч / 14 ч	П / 5ч / 7 ч	П / 14 ч	О / 16 ч
14.12.2013/15.00–16.00/ПН/Кр 4	–	П/20ч/ 27 ч	П / 21 ч	О / 18 ч
19.02.2014 / 03.50 / ПН / Кр 6	П / 23 ч / 10 ч	П / 20 ч / 20 ч	О / 14 ч	О / 8 ч
11.09.2014/23.30/ПН / Кр 6	–	П 17 ч / 17 ч	О / 31 ч	О / 19 ч
21.01.2015 /14:10 / ПН / Кр 4	–	П, О / 8 ч (П), 6 ч (О) / 24 ч	П / 30 ч	–
17.02.2015 / 4:45 / ПН / Кр 4	П / 39 ч / 25 ч	П / 8 ч / 14 ч	О / 32 ч	–
17.03.2015 / 4:45 / РН / Кр 8	П / 39 ч / 37 ч		О / 25 ч	
21.06.2015 / 16:55 и 22.06.2015 19:00 / РН/Кр 4 и Кр 8	П / 27 ч / 12 ч	П/14ч/ 24 ч	О / 12 ч	О / 8 ч
20.09.2015 / 06:05 / РН / Кр 7	О / 24 ч / 37 ч	П / 21 ч (Apty), 8 ч (Kingston) / 44 ч (Apty), 30 ч (Kingston)	П / 12 ч	О (Kingston) / 10 ч
19.12.2015/16:18/ РН / Кр 6	П / 33 ч / 12 ч	П/8 ч/2 ч	О/24 ч	О/4 ч

возрастания интенсивности КЛ за несколько часов до начала сильных магнитных бурь. Данные эффекты могут использоваться в качестве предвестников магнитных бурь (являться дополнительным фактором) в задачах прогноза космической погоды и имеют важное прикладное значение. В момент прихода ударной волны в данных космических лучей зафиксированы понижения интенсивности, характерные для форбуш-понижений. Анализ ионосферных параметров показал в периоды возрастания интенсивности космических лучей аномальные повышения электронной концентрации ионосферы. Результаты [40]–[42], [44] свидетельствуют о неоднократных наблюдениях данного эффекта в ионосфере, но вопросы, связанные с его природой и механизмами, остаются пока открытыми. Основываясь на результа-

тах совместного анализа данных КЛ и параметров ионосферы, можно предвещать солнечную природу выделенных аномальных изменений. Это подтверждает предложенную в [40] гипотезу о том, что подобные аномальные эффекты в ионосфере связаны с неким каналом проникновения энергии из межпланетного пространства и магнитосферы, и имеют важную научную и прикладную значимость.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00194). Авторы благодарят институты, поддерживающие станции регистрации данных, которые были использованы в исследовании, а также выражают признательность сотрудникам Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, разработавшим интерактивную среду и программное обеспечение баз данных, обеспечивающих оперативное получение информации о параметрах состояния космического пространства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленый Л. М. Плазменная гелиогеофизика: в 2 т. / общ. ред. Л. М. Зеленого. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. 560 с.
2. Топтыгин И. Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 1983. 301 с.
3. Большие снижения геомагнитных порогов космических лучей в период сильных возмущений магнитосферы / М. И. Тясто, О. А. Данилова, В. М. Дворников, В. Е. Сдобнов // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. № 73 (3). С. 385–388.
4. Kóta J., Somogyi A. Some problems of investigating periodicities of cosmic rays // Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae. 1969. Vol. 27. P. 523–548.
5. New insights on cosmic ray modulation through a joint use of nonstationary data-processing methods / A. Vecchio, M. Laurenza, M. Storini, V. Carbone // Advances in Astronomy. 2012. DOI:10.1155/2012/834247.
6. Alania M. V., Szabelski J., Wawrzynczak A. Modeling and experimental study of the Forbush effects of galactic cosmic rays // Proc. 28<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Tokyo: Universal Academy Press, 2003. Vol. 5. P. 3585–3491.
7. Lockwood J. A. Forbush decreases in the cosmic radiation // Space Sci. Revs. 1971. Vol. 12. P. 658–715.
8. Nymmik R. A. Regularities in solar high-energy particle fluxes: experimental data and probabilistic model // Geomagnet-izm and Aeronomia. 2009. Vol. 49, № 8. P. 1–3.
9. Крымский Г. Ф., Григорьев В. Г., Стародубцев С. А. Новый метод оценки абсолютного потока и энергетического спектра солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 7. С. 483–485.
10. SWS Australian Antarctic Division. URL: <http://www.sws.bom.gov.au/Geophysical/1/4> (дата обращения: 01.02.2018).
11. Козлов В. И., Марков В. В. Вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. Т. 47, № 1. С. 56–65.
12. Козлов В. И., Козлов В. В. Новый индекс солнечной активности – индекс мерцаний космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия. 2008. Т. 48, № 4. С. 1–9.
13. Belov A. V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symp. 2009. Vol. 257. P. 439–450.
14. Search for Predictors of Forbush Decreases / A. V. Belov, L. I. Dorman, E. A. Eroshenko, N. Iucci, G. Villaresi, V. G. Yanke // Proc. 24<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. Rome, 1995. Vol. 4. P. 888–891.
15. Response and yield functions of neutron monitor, Galactic cosmic-ray spectrum and its solar modulation, derived from all the available world-wide surveys / K. Nagashima, S. Sakakiba-ra, K. Murakami, I. Morishita // Nuovo Cimento C. 1989. Vol. 12, № 2. P. 173–209.
16. Dorman L. I. Cosmic ray variation and space research. М.: AN USSR, 1963. 1027 p.
17. Григорьев В. Г., Стародубцев С. А. Метод глобальной съемки в режиме реального времени и прогноз космической погоды // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. С. 703–707.
18. Дворников В. М., Сдобнов В. Е., Сергеев А. В. Метод спектрографической глобальной съемки для изучения вариаций интенсивности космических лучей межпланетного и магнитосферного происхождения // Вариации космических лучей и исследования космоса. М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 232–237.

19. Cosmic ray anisotropy before and during the passage of major solar wind disturbances / A. V. Belov, J. W. Bieber, E. A. Eroshenko, P. Evenson, R. Pyle, V. G. Yanke // *Adv. Space Res.* 2003. Vol. 31, № 4. P. 919–924.
20. Paschalis P., Sarlanis C., Mavromichalaki H. Artificial neural network approach of cosmic ray primary data processing // *Sol. Phys.* 2003. № 182 (1). P. 303–318.
21. Мандрикова О. В., Зяляев Т. Л. Моделирование вариаций космических лучей на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей переменной структуры // *Цифровая обработка сигналов.* 2015. № 1. С. 11–16.
22. Мандрикова О. В., Зяляев Т. Л. Моделирование вариаций космических лучей и выделение аномалий на основе совмещения вейвлет-преобразования с нейронными сетями // *Машинное обучение и анализ данных.* 2014. Т. 1, № 9. С. 1154–1167.
23. Mandrikova O. V., Solovev I. S., Zalyaev T. L. Methods of analysis of geomagnetic field variations and cosmic ray data // *Earth Planet Space.* 2014. № 66. P. 148.
24. Мандрикова О. В. Многокомпонентная модель сигнала со сложной структурой // *Пробл. эволюции открытых систем.* 2008. Т. 2, вып. 10. С. 161–172.
25. Мандрикова О. В., Полозов Ю. А. Критерии выбора вейвлет-функции в задачах аппроксимации природных временных рядов сложной структуры // *Информационные технологии.* 2012. № 1. С. 31–36.
26. Precursor of geomagnetic storm observed by muon detector network / K. Munakata, J. W. Bieber, S. Yasue, C. Kato, M. Koyama, S. Akahane, K. Fujimoto, Z. Fujii, J. E. Humble, M. L. Duldig // *J. Geophys. Res.* 2000. № 105. P. 27457–27468.
27. Ruffolo D. Transport and acceleration of energetic charged particles near an oblique shock // *Astrophys. J.* 1999. № 515. P. 787–800.
28. Methods of analysis of geophysical data during increased solar activity / O. V. Mandrikova, Yu. A. Polozov, I. S. Solovev, N. V. Fetisova (Glushkova), T. L. Zalyaev, M. S. Kupriyanov, A. V. Dmitriev // *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications).* 2016. Т. 26, № 2. P. 406–418.
29. 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, Yu. A. Polozov, I. S. Solovev, M. S. Kupriyanov // *Earth, Planets and Space.* 2015. Vol. 67, № 1. P. 131–146.
30. Magnetic and ionospheric observations in the Far Eastern region of Russia during the magnetic storm of 5 April 2010 / D. G. Baishev, A. V. Moiseyev, R. N. Boroyev, S. E. Kobyakova, A. E. Stepanov, O. V. Mandrikova, I. S. Solovev, S. Yu. Khomutov, Yu. A. Polozov, A. Yoshikawa, K. Yumoto // *Sun and Geosphere.* 2015. Vol. 10, № 2. P. 133–140.
31. Ionospheric parameter modelling and anomaly discovery by combining the wavelet transform with autoregressive models / O. V. Mandrikova, N. V. Fetisova (Glushkova), R. T. Al-Kasasbeh, D. M. Klionskiy, V. V. Geppener, M. Y. Ilyash // *Annals of Geophysics.* 2015. Vol. 58. DOI:10.4401/ag-6729.
32. Nakamura M., Maruyama T., Shidama Y. Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan // *J. of the National Institute of Information and Communications Technology.* 2009. Vol. 56. P. 391–406.
33. Абраменкова И. В., Круглов В. В. Методы восстановления пропусков в массивах данных // *Программные продукты и системы.* 2005. № 2. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/metody-vosstanovleniya-propuskov-v-massivah-dannyh> (дата обращения: 26.12.2017).
34. Chui C. K. An introduction in wavelets. New York: Academic Press, 1992. P. 264.
35. Daubechies I. Ten Lectures on wavelets // *CBMS-NSF lecture notes nr. Philadelphia: SIAM, 1992. 61 p.*
36. Haykin S. Neural networks: a comprehensive foundation. 2nd edn. New York: Prentice Hall, 1999. 842 p.
37. Мандрикова О. В., Зяляев Т. Л. Моделирование и анализ вариаций космических лучей в период гелиосферных возмущений // *Сб. тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. по мягким вычислениям и измерениям.* СПб., 2017. Т. 1. С. 239–242.
38. Левин Б. П. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
39. Афраимович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
40. Danilov A. D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // *Advances in Space Research.* 2013. Vol. 52, № 3. P. 343–366.
41. Buresova D., Laštovička J. Pre-storm enhancements of foF2 above Europe // *Adv. Space Res.* 2007. Vol. 39. P. 1298–1303.
42. Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms / L. Liu, W. Wan, M.-L. Zhang, B. Zhao // *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26. P. 893–903.
43. Mandrikova O. V., Polozov Yu. A., Geppener V. V. Method of ionospheric data analysis based on a combination of wavelet transform and neural networks // *Procedia Engineering. Elsevier,* 2017. Vol. 201. P. 756–766.
44. Mandrikova O. V., Fetisova N. V., Polozov Yu. A. Ionospheric parameter analysis and discovery of anomaly during ionospheric storms // *Proc. of the 11<sup>th</sup> Intl School and Conf. «Problems of Geocosmos» St. Petersburg,* 2017. P. 262–269.

O. V. Mandrikova, Yu. A. Polozov, T. L. Zalyaev  
*Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation*

V. V. Geppener  
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

## ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF COSMIC RAYS AND IONOSPHERIC PARAMETERS DURING PERIODS OF INCREASED SOLAR ACTIVITY AND MAGNETIC STORMS (ACCORDING TO GROUND-BASED OBSERVATION STATIONS)

*We applied new methods of data analysis, based on neural networks and wavelet transform. The methods made it possible to allocate abnormal enhancements in cosmic rays level (pre-increases). They can occur 8–20 hours before the onset of strong magnetic storms (we analyzed the events for the period 2010–2015). During the periods of the allocated preconditions in cosmic rays, an anomalous increase in the electron concentration was observed in the ionosphere, which is typical for positive ionospheric storms. The isolated ionospheric anomalies were observed on the eve of strong magnetic storms at different stations with a possible time delay up to a day. During the periods of the main phases of strong magnetic storms, the Forbush decrease effect was observed and the electron concentration in the ionosphere decreased significantly. The obtained results are of interest in space weather problems and can serve as an additional factor in strong magnetic storms prediction. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation, Project № 14-11-00194.*

**Cosmic rays, ionosphere, anomalies, geomagnetic storms, wavelets, neural networks**

---

УДК 681.518.3

А. Р. Шафиев, В. В. Яновский  
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Мобильные средства оценки физиологического состояния субъекта в экстремальных условиях

*Приведено краткое описание экспериментальной подсистемы дистанционного беспроводного измерения физиологического состояния людей (субъектов) в режиме реального времени на основе пульсоксиметрических модулей. Подсистема разработана для контроля за физиологическим состоянием персонала на опасных участках производства при выполнении особо ответственных работ. Необходимость разработки подсистемы оценки физиологического состояния субъектов в экстремальных условиях обусловлена отсутствием доступа к аналогичным устройствам иностранного производства, а также необходимостью интеграции в единую систему оценки физиологического состояния персонала. Носимые устройства измерения физиологического состояния, являющиеся основной частью подсистемы, автономны и монтируются в спецодежду. Данные физиологического состояния персонала в реальном времени собираются по протоколу BluetoothLE через установленные в зоне работ BLE-коммутаторы. После проведения работ средствами подсистемы возможно чтение с устройств накопленных архивов физиологических параметров.*

**Системы мониторинга, оценка экстремальных физиологических состояний, пульсоксиметрический модуль, частота сердечных сокращений, частота дыхания, кислородная сатурация, реальное время**

На опасных производствах, при проведении особо ответственных работ необходим постоянный мониторинг физиологического состояния

персонала. Наиболее частая причина возникновения ошибок в профессиональной деятельности – критическое снижение уровня бодрствования.