



Институт космических исследований и распространения
радиоволн ДВО РАН

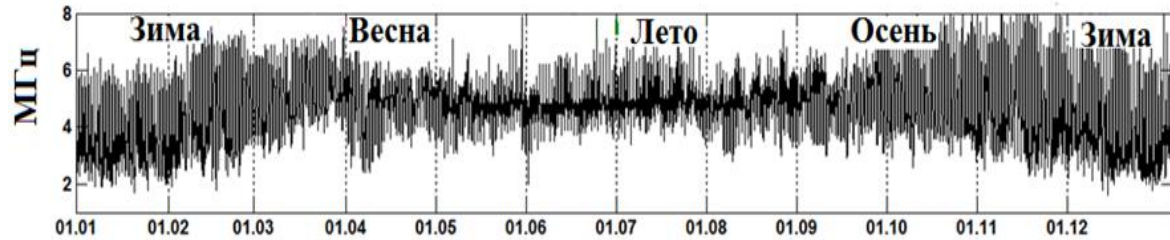
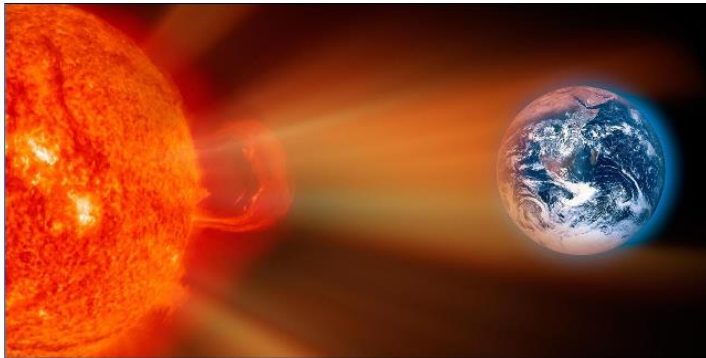
Метод моделирования параметров ионосферы и обнаружения ионосферных возмущений

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

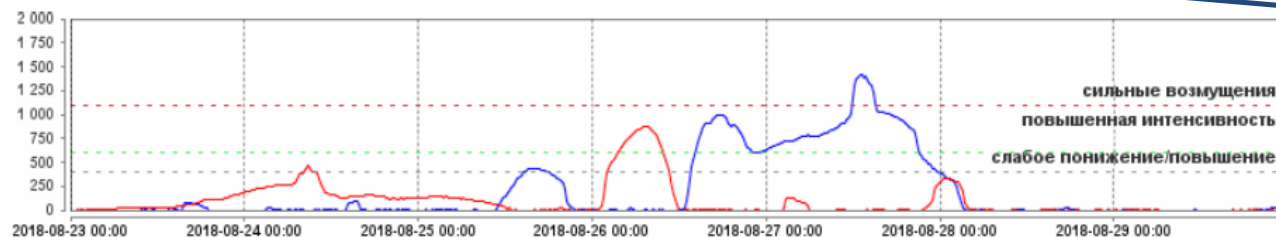
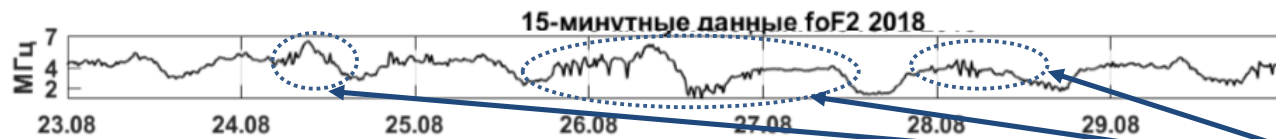
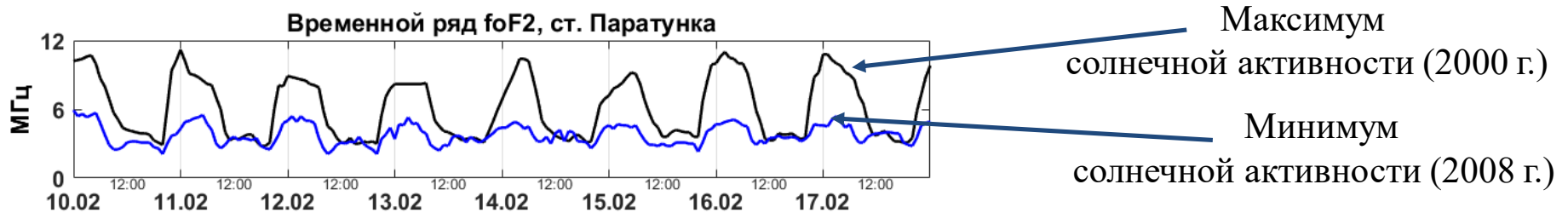
2019 г.

Структура временного ряда параметров ионосферы

Сезонные изменения временного ряда критической частоты ионосферы foF2 («Паратунка», 2011 г.)



Влияние солнечной активности на временной ряд foF2



Аномальные изменения (ионосферные возмущения)

Обобщенная многокомпонентная модель временного ряда параметров ионосферы

$$f(t) = A^{\text{PEГ}}(t) + U(t) + e(t) = \sum_{\mu=\overline{1,T}} \sum_j G_j^\mu \alpha_j^\mu(t) + \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{BOЗM}}(t) + e(t) \quad (1)$$

Регулярная компонента

$$A^{\text{PEГ}}(t) = \sum_{\mu=\overline{1,T}} \sum_j G_j^\mu \alpha_j^\mu(t)$$

1. Быстрые вейвлет-разложения

Выделение регулярных разномасштабных составляющих $\alpha_j^\mu(t)$, описывающих изменения в спокойной ионосфере

$$f(t) = \sum_{j=-1}^{-m} g_j(t) + f_{-m}(t)$$

2. Класс моделей АРПСС

Оценка параметров G_j^μ регулярных составляющих

$$A^{\text{PEГ}}(t) = \sum_{\mu=\overline{1,T}} \sum_{k=1, N_{j\text{пер}}^\mu} S_{j\text{пер},k}^\mu b_{j\text{пер},k}^\mu(t)$$

Аномальная компонента

$$U(t) = \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{BOЗM}}(t)$$

1. Нелинейные аппроксимирующие вейвлет-разложения

Детальный анализ данных

$$U(t) = \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{BOЗM}}(t) = \sum_{i=1,3} \sum_{\eta,n} P_{i,\eta}(d_{\eta,n}) \Psi_{\eta,n}(t)$$

2. Адаптивные пороговые функции

Обнаружение короткопериодных аномальных изменений разной интенсивности и длительности

Регулярная компонента модели

Быстрые вейвлет-разложения

$$f(t) = \sum_{j=-1}^{-m} g_j(t) + f_{-m}(t)$$

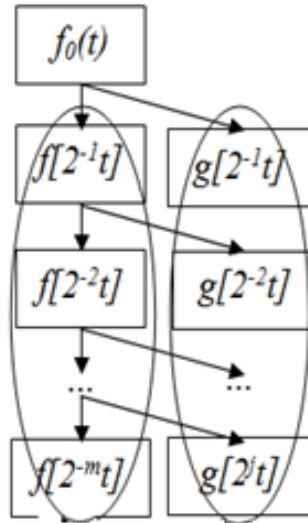
$$f_{-m}(t) = \sum_k c_{-m,k} \phi_{-m,k}(t),$$

$$g_j(t) = \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k}(t),$$

$$c_{-m,k} = \langle f, \phi_{-m,k} \rangle, \quad d_{j,k} = \langle f, \Psi_{j,k} \rangle$$

$\phi_{-m,k}$ - масштабирующая функция

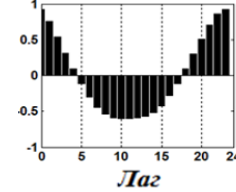
$\Psi_{j,k}(t)$ - вейвлет-функция



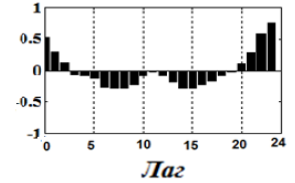
Модели АРПСС

$$\phi(B) \nabla^d z_t = \theta(B) a_t$$

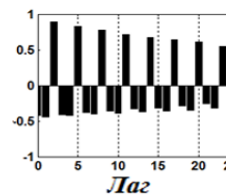
АКФ исходного ряда foF2



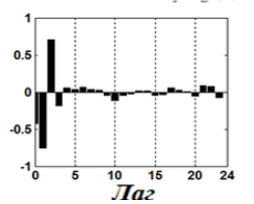
АКФ первой разности foF2



АКФ регулярной компоненты f_{-3}(t)



ЧАКФ регулярной компоненты f_{-3}(t)



$$A^{\text{PERG}}(t) = f_{-m\text{per}}(t) + \sum_{j\text{per}} g_{j\text{per}}(t) = \sum_{\mu=1, T} \sum_{k=1, N_{j\text{per}}^{\mu}} s_{j\text{per},k}^{\mu} b_{j\text{per},k}^{\mu}(t) \quad (2)$$

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

$p_{j\text{per}}^{\mu}, \gamma_{j\text{per},l}^{\mu}$ - порядок и параметры авторегрессии модели μ - компоненты

$h_{j\text{per}}^{\mu}, \theta_{j\text{per},k}^{\mu}$ - порядок и параметры скользящего среднего μ - компоненты

$a_{j\text{per},k}^{\mu}$ - остаточные ошибки модели μ - компоненты $b_{-m\text{per},k}^1$ - масштабирующая функция $b_{-m\text{per},k}^{\mu}$ - вейвлет функция

Аномальная компонента модели

Построение нелинейной аппроксимирующей вейвлет-схемы:

$$U(t) = \sum_{i,\eta} \beta_{i,\eta}^{\text{ВОЗМ}}(t) = \sum_{\eta,n} P_{1,\eta}(d_{\eta,n})\Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{\eta,n} P_{2,\eta}(d_{\eta,n})\Psi_{\eta,n}(t) + \sum_{\eta,n} P_{3,\eta}(d_{\eta,n})\Psi_{\eta,n}(t) \quad (3)$$

$d_{\eta,n} = \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle$ - вейвлет-коэффициенты на масштабе η , $\{\Psi_{\eta,n}\}_{\eta,n \in \mathbb{Z}}$ - вейвлет - базис

$$P_{1,\eta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{1,\eta} \text{ или } |x| > T_{2,\eta} \\ x, & \text{если } T_{1,\eta} < |x| \leq T_{2,\eta} \end{cases} \quad \begin{array}{l} T_{1,\eta} - \text{порог, определяющий} \\ \text{аномалии малой} \\ \text{интенсивности (класс 1)} \end{array}$$

$$P_{2,\eta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{2,\eta} \text{ или } |x| > T_{3,\eta} \\ x, & \text{если } T_{2,\eta} < |x| \leq T_{3,\eta} \end{cases} \quad \begin{array}{l} T_{2,\eta} - \text{порог, определяющий} \\ \text{аномалии умеренной} \\ \text{интенсивности (класс 2)} \end{array}$$

$$P_{3,\eta}(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{3,\eta} \\ x, & \text{если } |x| > T_{3,\eta} \end{cases} \quad \begin{array}{l} T_{3,\eta} - \text{порог, определяющий} \\ \text{аномалии высокой} \\ \text{интенсивности (класс 3)} \end{array}$$

Применение адаптивных порогов: $P_{i,\eta}^{\text{ад}}, i = \overline{1,3}$

$$P_{i,\eta}^{\text{ад}} = V_i * St_{\eta},$$

V_i - пороговый коэффициент,

$$St_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{\Phi-1} \sum_{n=1}^{\Phi} (d_{\eta,n} - \overline{d_{\eta,n}})^2}, \quad \Phi - \text{длина скользящего временного окна}$$

Аномальная компонента модели

Применение адаптивных порогов: $P_{i,\eta}^{ad}, i = \overline{1,3}$

*Аномалии малой
интенсивности (класс 1)*

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^{1+}, & \text{если } P_{1,\eta}^{ad} < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \leq P_{2,\eta}^{ad} \\ 0, & \text{если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| < P_{1,\eta}^{ad} \text{ или } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| > P_{2,\eta}^{ad} \\ d_{\eta,n}^{1-}, & \text{если } -P_{2,\eta}^{ad} \leq (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) < -P_{1,\eta}^{ad} \end{cases}$$

*Аномалии умеренной
интенсивности (класс 2)*

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^{2+}, & \text{если } P_{2,\eta}^{ad} < (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \leq P_{3,\eta}^{ad} \\ 0, & \text{если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| < P_{2,\eta}^{ad} \text{ или } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| > P_{3,\eta}^{ad} \\ d_{\eta,n}^{2-}, & \text{если } -P_{3,\eta}^{ad} \leq (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) < -P_{2,\eta}^{ad} \end{cases}$$

*Аномалии высокой
интенсивности (класс 3)*

$$d_{\eta,n} = \begin{cases} d_{\eta,n}^{3+}, & \text{если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) \geq P_{3,\eta}^{ad} \\ 0, & \text{если } |d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}| < P_{3,\eta}^{ad} \\ d_{\eta,n}^{3-}, & \text{если } (d_{\eta,n} - d_{\eta,n}^{med}) < -P_{3,\eta}^{ad} \end{cases}$$



Оценка интенсивности аномалий:

Интенсивность для каждого класса i :

$$J^{i+(-)}(n) = \sum_{\eta} |d_{\eta,n}^{i+(-)}|$$

Общая интенсивность:

$$J^{+(-)}(n) = \sum_{\eta} |d_{\eta,n}^{+(-)}|$$

Обнаружение длительных и интенсивных аномальных изменений

1 Обнаружение интенсивных аномалий в ионосфере

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

$$a_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu} = S_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu,\text{факт}} - S_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu,\text{модель}} - \text{ошибки модели } A^{\text{ПЕР}}(t)$$

Q_{μ} – длина упреждения данных,

$H_{\mu,j^{\text{пер}}}$ – пороговое значение.

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

2 Оценка порога:

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

$u_{\xi/2}$ -квантиль уровня стандартного нормального распределения

$\Psi_{j^{\text{пер}},q}^{\mu}$ - весовые коэффициенты модели μ компоненты

3 Оценка интенсивности аномалии:

$$Y_{j^{\text{пер}},k+1,k+L_{\mu}}^{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L_{\mu}} \sum_{l=1}^{L_{\mu}} |a_{j^{\text{пер}},k+l}^{\mu}|^2}}{H_{\mu,j^{\text{пер}}}} \quad (6)$$

L_{μ} – длина скользящего временного окна

Метод обнаружения длительных и интенсивных аномалий

1. Выполняем моделирование компонент

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

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

2. Вычисляем остаточные ошибки моделей:

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

3. Принимаем за аномальные моменты времени $t=k$, для которых

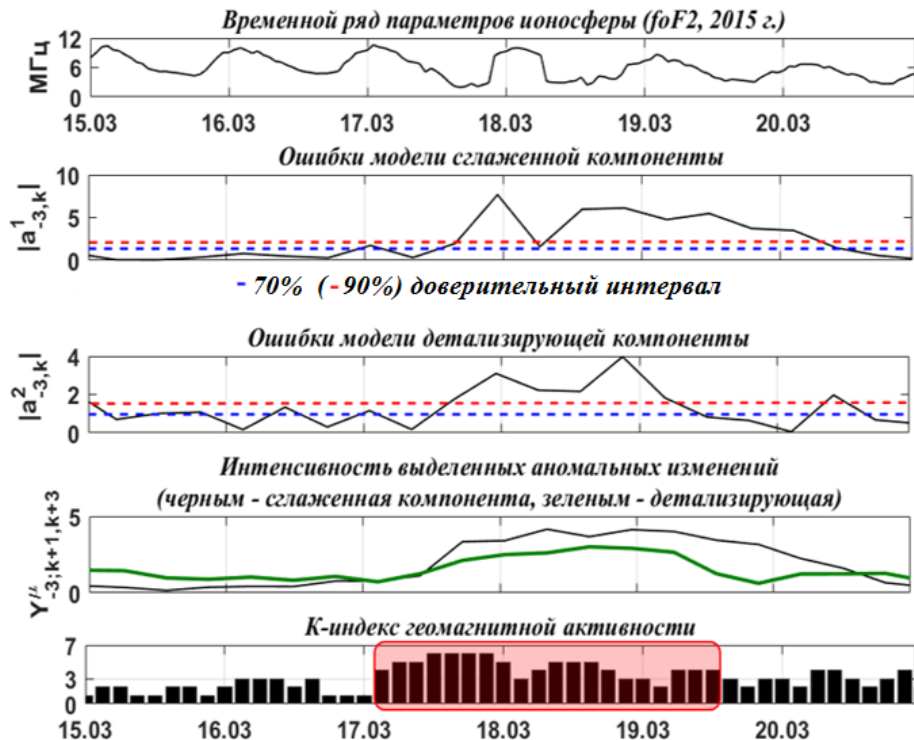
$$\varepsilon_{j\text{пер}}^{\mu} = \sum_{q=1}^{Q_{\mu}} |a_{j\text{пер},k+q}^{\mu}| > H_{\mu, j\text{пер}},$$

4. Интенсивность для аномального периода $t = \overline{k+1, k+L_{\mu}}$

$$Y_{j\text{пер},k+1,k+L_{\mu}}^{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L_{\mu}} \sum_{l=1}^{L_{\mu}} |a_{j\text{пер},k+l}^{\mu}|^2}}{H_{\mu, j\text{пер}}}$$

Применение метода

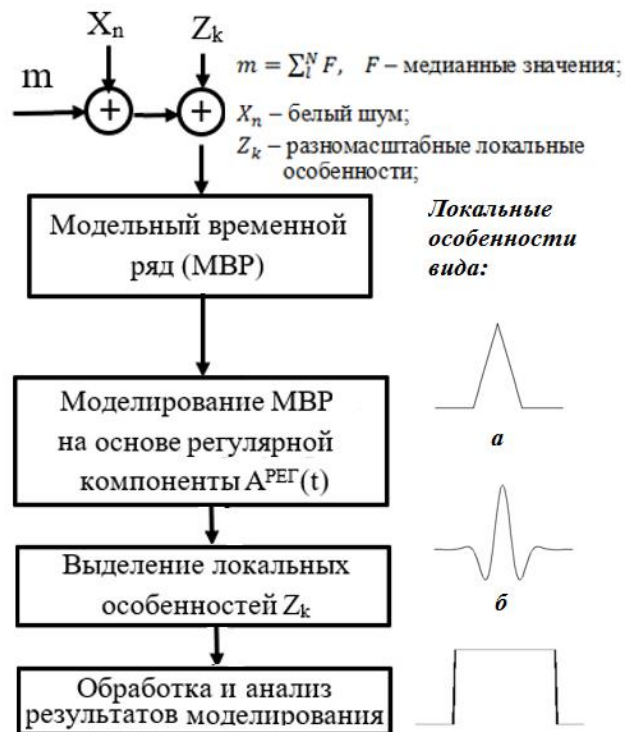
Анализ ионосферных данных (ст. «Паратунка», Камчатка) в период магнитной бури 17 марта 2015 г.



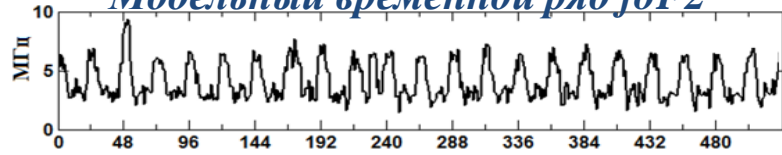
- порог $H_{\mu,-3}$ (доверительная вероятность 70%)
- порог $H_{\mu,-3}$ (доверительная вероятность 90%)

Оценка эффективности алгоритма (статистическое моделирование)

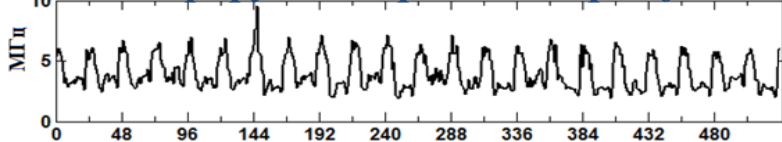
Схема построения модельных временных рядов



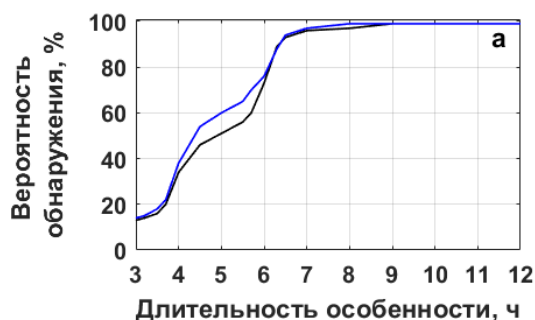
Модельный временной ряд foF2



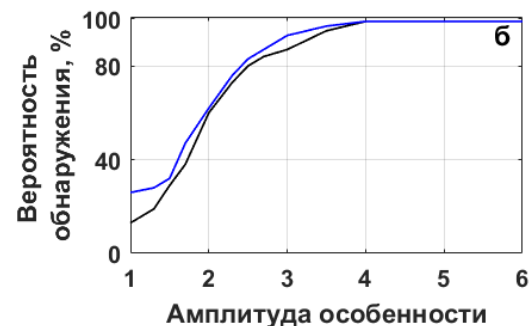
Регистрируемый временной ряд foF2



Зима, черным – низкая солнечная активность (СА), синим- высокая СА

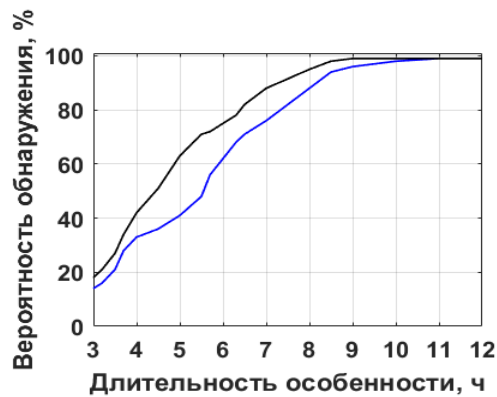


Амплитуда шума 1;
Амплитуда особенности 1,5

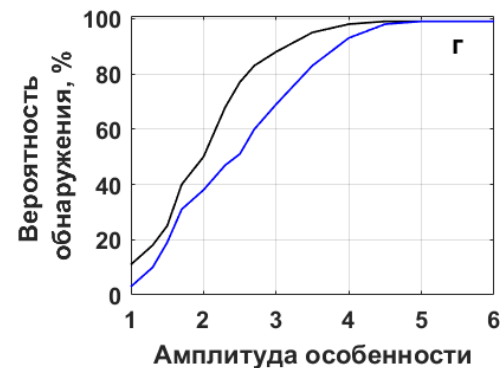


Длительность особенности 7 ч

Лето, черным – низкая солнечная активность (СА), синим- высокая СА



Амплитуда шума 1;
Амплитуда особенности 1,5



Амплитуда шума 1,5;
Длительность особенности 7 ч

Алгоритм обнаружения аномальных изменений разной интенсивности

- В момент времени $n = n_0$ возникла короткопериодная аномалия малой (умеренной, высокой) интенсивности масштаба η_0 , если

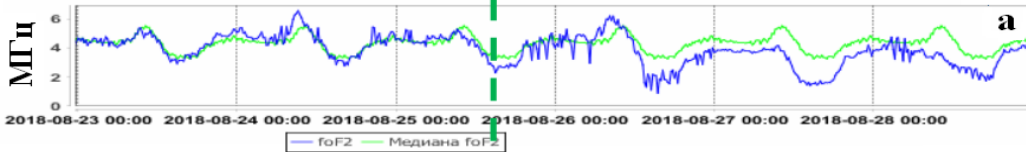
$$|d_{\eta_0, n_0}| > P_{i, \eta_0}^{\text{ад}}, i = 1 (i = 2, 3).$$
- Интенсивность аномалии в момент времени n_0 на масштабе η_0 : $J_{\eta_0, n_0}^{+(-)} = |d_{\eta_0, n_0}^{+(-)}|$
- Если $\forall n_s \in (t_1, t_2), t_2 > t_1: d_{\eta_0, n_s} > P_{i, \eta_0}^{\text{ад}}, i = 1 (i = 2, 3)$, то в период времени (t_1, t_2) наблюдалась аномалия малой (умеренной, высокой) интенсивности масштаба η_0 , длительность которой определим как $l_{\eta_0} = t_2 - t_1$.

Применение алгоритма. Анализ ионосферных данных ст. «Паратунка»

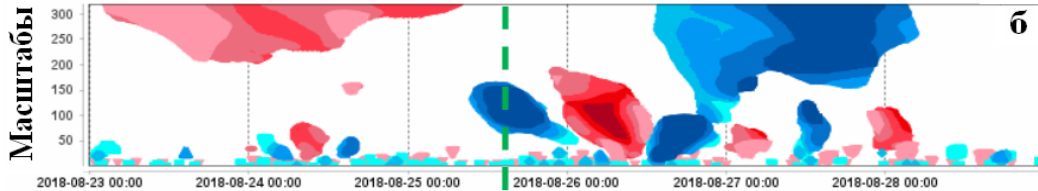
Начало магнитной

бурни

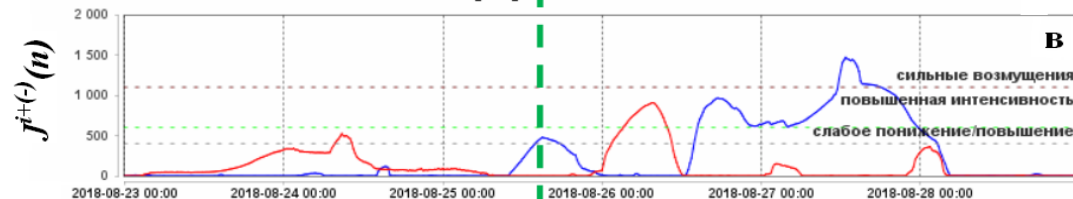
Ионосферные данные foF2



Аномалии в ионосфере



Интенсивность ионосферных аномалий



Аномалии малой интенсивности
(класс 1)

$$400 < J^{+(-)}(n) < 600$$

Аномалии умеренной
интенсивности (класс 2)

$$600 < J^{+(-)}(n) \leq 1100$$

Аномалии высокой интенсивности
(класс 3)

$$J^{+(-)}(n) > 1100$$

Оценка эффективности метода в оперативном режиме

1. В точках k выполняется разрыв временного ряда $f_N = \{f_n\}_{n=\overline{0,N}}$, ряд дополняется медианными значениями:

$$f_{k+h} = \{f_k\}_{k=\overline{k+1,k+h}} = (f_1^{med}, f_2^{med}, \dots, f_h^{med})$$

f_h^{med} – медианные значения, $h = M \times \frac{\Omega}{2}$,

M – наибольший масштаб разложения,

Ω -размер носителя вейвлет-базиса Ψ

2. Выполняется НВП исходного ряда f_N и

дополненного ряда f_{k+h} :

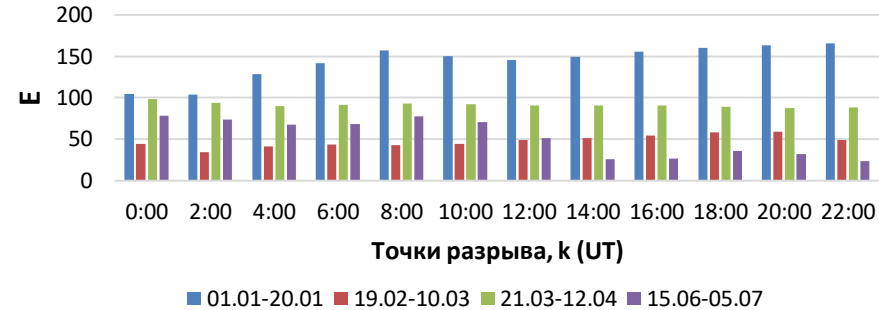
$$f_N = \sum_{\eta,n} d_{\eta,n}^N \Psi_{\eta,n}(t) \quad d_{\eta,n}^N = \langle f_N, \Psi_{\eta,n} \rangle$$

$$f_{k+h} = \sum_{\eta,n} d_{\eta,n}^{k+h} \Psi_{\eta,n}(t) \quad d_{\eta,n}^{k+h} = \langle f_{k+h}, \Psi_{\eta,n} \rangle$$

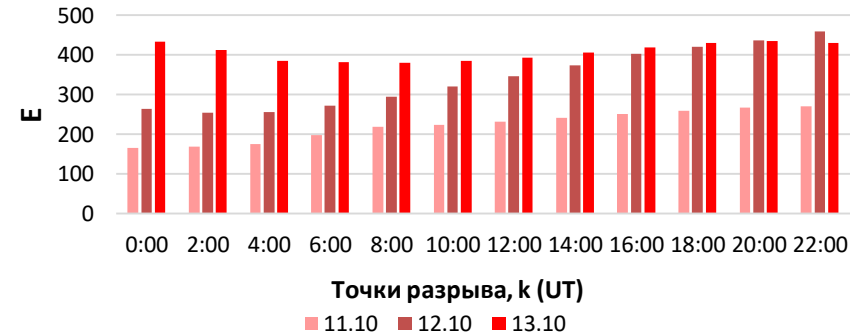
3. Оценивается погрешность:

$$E = \sum_{\eta} \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{n=1}^k \left((d_{\eta,n}^N - d_{\eta,n}^{k+h}) - \overline{(d_{\eta,n}^N - d_{\eta,n}^{k+h})} \right)^2}$$

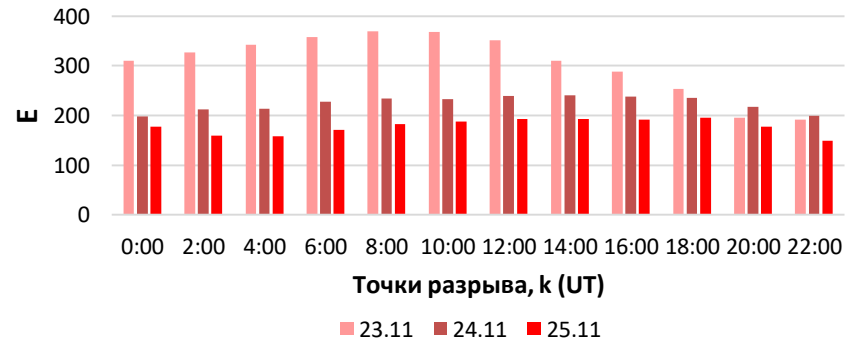
Периоды спокойной ионосферы (2016 г., Паратунка)



Магнитная буря 13.10.2016 г.

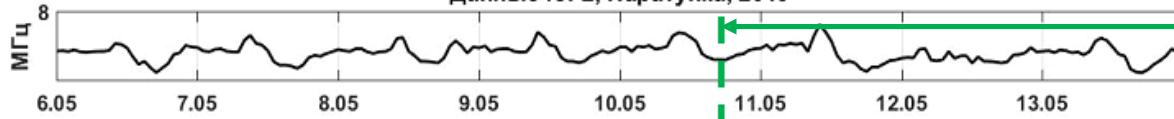


Магнитная буря 24.11.2016 г.



Результаты анализа ионосферных данных ст. «Паратунка», май 2019 г.

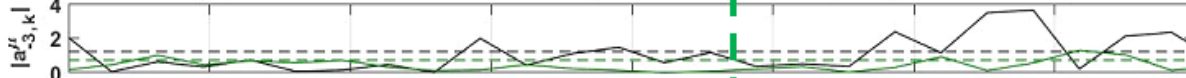
Данные foF2, Паратунка, 2019



Начало магнитной бури

Ошибки ОКМ

(черным - сглаженная компонента, зеленым - детализирующая компонента)

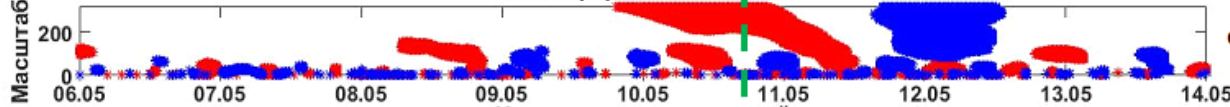


Точка разрыва временного ряда foF2
8.05 в 21.00 UT

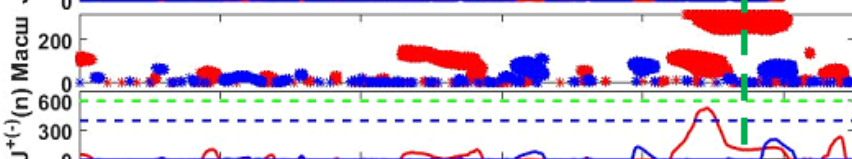
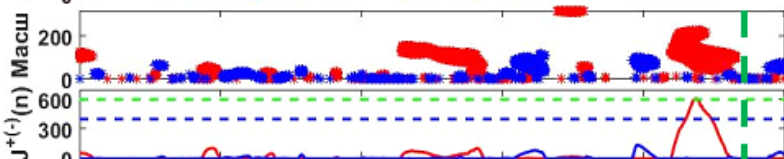
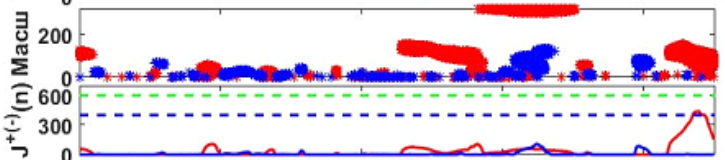
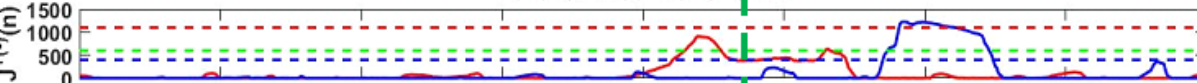
Точка разрыва временного ряда foF2
9.05 в 00.00 UT

Точка разрыва временного ряда foF2
9.05 в 12.00 UT

Ионосферные аномалии



Интенсивность аномалий



Точка разрыва временного ряда foF2
10.05 в 12.00 UT

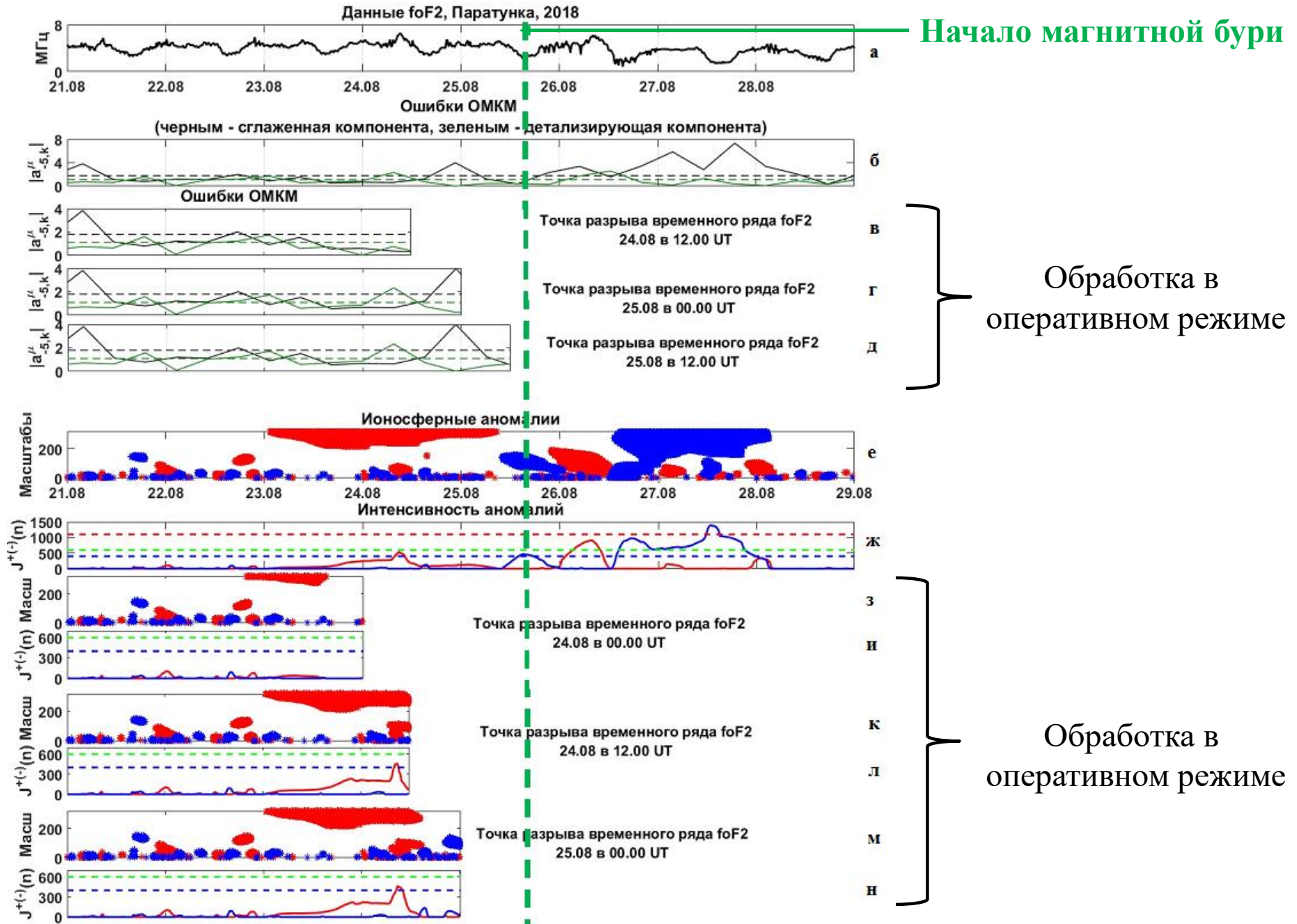
Точка разрыва временного ряда foF2
11.05 в 00.00 UT

Точка разрыва временного ряда foF2
11.05 в 12.00 UT

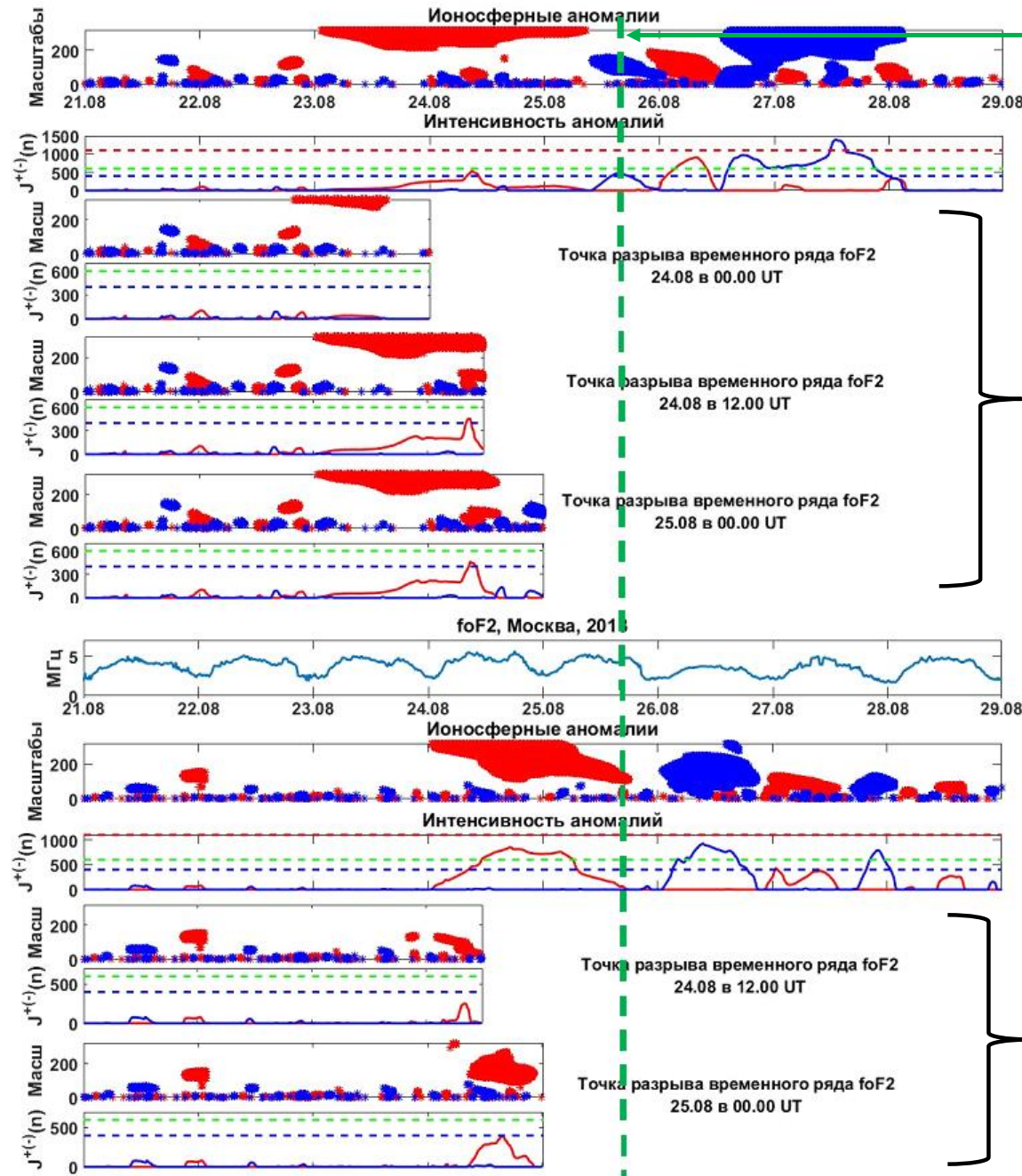
Обработка в оперативном режиме

Обработка в оперативном режиме

Результаты анализа ионосферных данных ст. «Паратунка», август 2018 г.



Результаты анализа данных ст. «Паратунка» и ст. «Москва», август 2018 г.



Обработка в оперативном режиме

Обработка в оперативном режиме

Выводы

Предложен автоматизированный метод анализа параметров ионосферы и обнаружения ионосферных аномалий, основанный на обобщенной многокомпонентной модели временного ряда параметров ионосферы.

Экспериментально подтверждена возможность возникновения короткопериодных аномалий слабой и умеренной интенсивности, предшествующих сильным магнитным бурям и показана эффективность метода для их обнаружения. Показана возможность применения метода на разных среднеширотных станциях регистрации данных, без дополнительной настройки алгоритмов.

Подтверждена эффективность метода в режиме оперативного анализа данных.

Основные преимущества метода:

1. Возможность полной автоматизации.
2. Эффективность для обнаружения аномалий малой интенсивности.
3. Возможность обнаружения ионосферных аномалий с заданной доверительной вероятностью.

Метод реализован программно и используется в ИКИР ДВО РАН в оперативном режиме для анализа ионосферных данных и оценки состояния ионосферы в Камчатском крае (<http://Isaoperanalysis.ikir.ru/Isaoperanalysis.html>).

Исследование выполнено в рамках ГЗ по теме «Динамика физических процессов в активных зонах ближнего космоса и геосфер» № гос. регистрации АААА-А17-117080110043-4.

Авторы выражают благодарность институтам, выполняющим регистрацию ионосферных и геомагнитных данных, которые использовались в работе.



Институт космических исследований и распространения
радиоволн ДВО РАН

Спасибо за внимание

Авторы:

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