



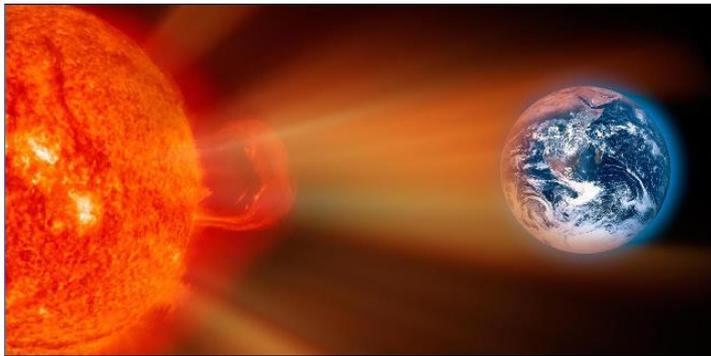
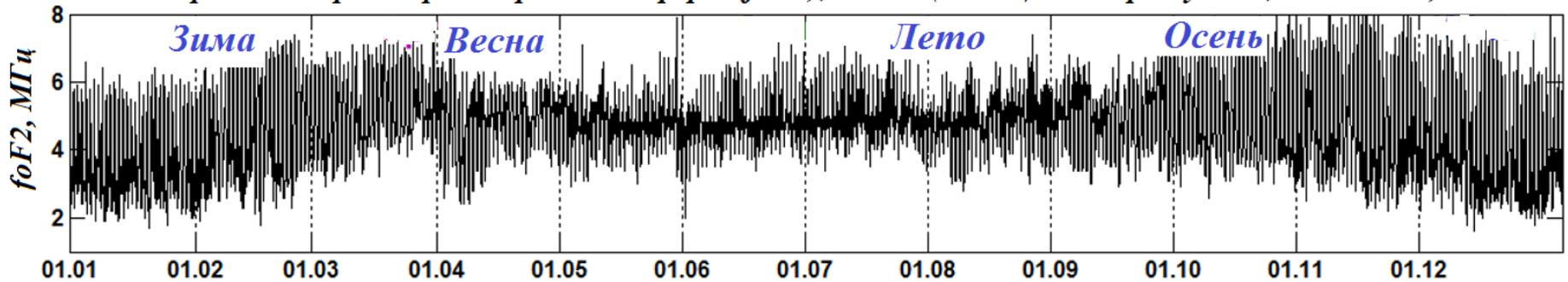
Институт космофизических исследований и распространения
радиоволн
(Дальневосточное отделение Российской академии наук)

Моделирование и анализ природных временных рядов на основе обобщенной многокомпонентной модели

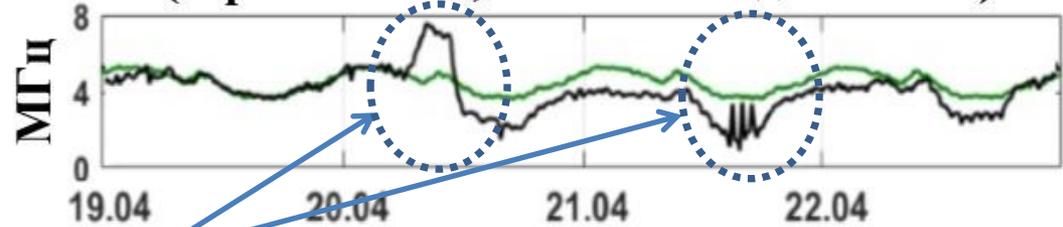
О. В. Мандрикова, Н. В. Фетисова, Ю. А. Полозов

Структура временного ряда параметров ионосферы

Временной ряд параметров ионосферы (f_oF2), 2011 г (станция "Паратунка", Камчатка)



Временной ряд параметров ионосферы (f_oF2)
(черным - f_oF2 , зеленым - медиана f_oF2)



Аномалии

(ионосферные возмущения)

*Обобщенная
многокомпонентная
модель параметров
ионосферы*

$$f(t) = \begin{array}{l} \text{Рекуррентная} \\ \text{составляющая} \end{array} R(t) + \begin{array}{l} \text{Возмущенная} \\ \text{составляющая} \end{array} U(t) + \begin{array}{l} \text{Шум} \end{array} e(t)$$

Обобщенная многокомпонентная модель параметров ионосферы (ОМКМ)

$$f(t) = R(t) + U(t) + e(t) = \sum_{\mu=1, \overline{T}} \alpha^{\mu}(t) + \sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) + e(t)$$

Рекуррентная составляющая

Временной ряд параметров ионосферы

Возмущенная составляющая

Кратномасштабный вейвлет-анализ

Выделение регулярных компонент, описывающих изменения в спокойной ионосфере

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

Модели АРПСС

Оценка параметров регулярных компонент

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

Нелинейные аппроксимирующие вейвлет-схемы

Детальный анализ данных

$$U(t) = \sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = A_{\text{крат}}(t) + A_{\text{длит}}(t)$$

Адаптивные пороговые функции

Выделение аномальных изменений, которые могут возникать накануне и в периоды магнитных бурь

1. Идентификация рекуррентной составляющей модели

$$f(t) = R(t) + U(t) + e(t) = \sum_{\mu=1, \overline{T}} \alpha^\mu(t) + \sum_{\eta} \beta_{\text{ВОЗМ}}^\eta(t) + e(t)$$

Алгоритм выделения регулярных компонент

1. Выполняем КМА до уровней разложения $m = \overline{1, M}$:

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

$$f_{-m}(t) = \sum_k c_{-m,k} \phi_{-m,k}(t), \quad g_j(t) = \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k}(t),$$

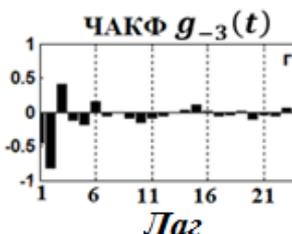
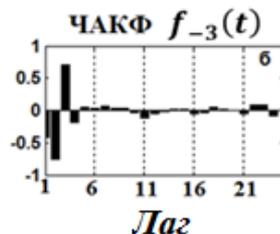
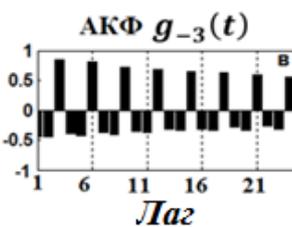
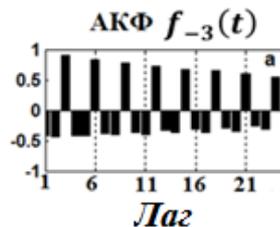
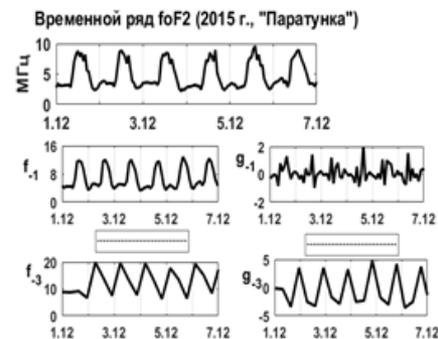
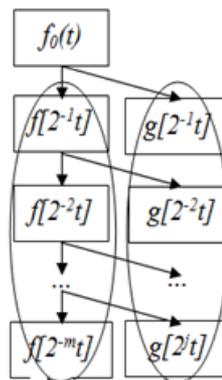
$$c_{-m,k} = \langle f, \phi_{-m,k} \rangle \quad d_{j,k} = \langle f, \Psi_{j,k} \rangle$$

$\phi_{-m,k}$ -масштабирующая функция
 $\Psi_{j,k}(t)$ вейвлет-базис

2. Определяем стационарные компоненты $f_{-m}^{\text{рег}}(t)$ и $g_{j}^{\text{рег}}(t)$, ($j = \overline{-1, -m}^{\text{рег}}$) (анализ АКФ и ЧАКФ). Для выделенных стационарных компонент идентифицируем модели из класса АРСС

3. Получаем следующее представление рекуррентной составляющей модели (1)

$$R(t) = f_{-m}^{\text{рег}}(t) + \sum_{j^{\text{рег}}} g_j^{\text{рег}}(t) \quad (2)$$



Идентификация рекуррентной составляющей модели

$$R(t) = f_{-m^{\text{per}}}(t) + \sum_{j^{\text{per}}} g_{j^{\text{per}}}(t) = \sum_{\mu=1, T} \sum_{k=1, N_{j^{\text{per}}}^{\mu}} S_{j^{\text{per}}, k}^{\mu} b_{j^{\text{per}}, k}^{\mu}(t) \quad (3)$$

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

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

$$\omega_{j^{\text{per}}, k}^{\mu} = \nabla^{v^{\mu}} \delta_{j^{\text{per}}, k}^{\mu}$$

$\delta_{j^{\text{per}}, k}^{\mu}$ – вейвлет –

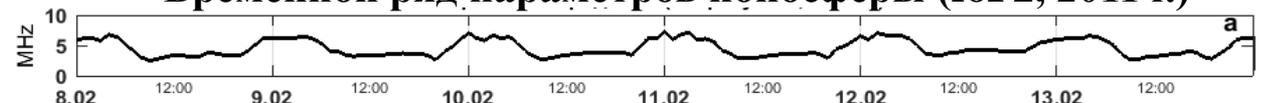
коэффициенты разложения

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

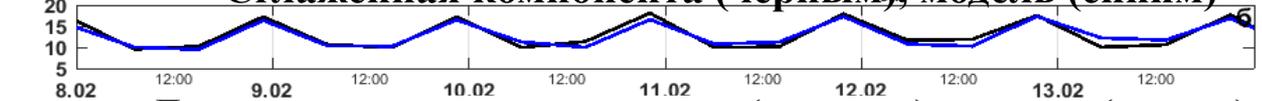
$a_{j^{\text{per}}, k}^{\mu}$ – остаточные ошибки модели μ – компоненты

$b_{j^{\text{per}}, k}^{\mu}$ – вейвлет – базис μ – компоненты

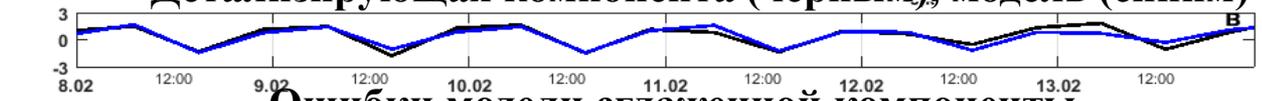
Моделирование параметров ионосферы в спокойный период Временной ряд параметров ионосферы (foF2, 2011 г.)



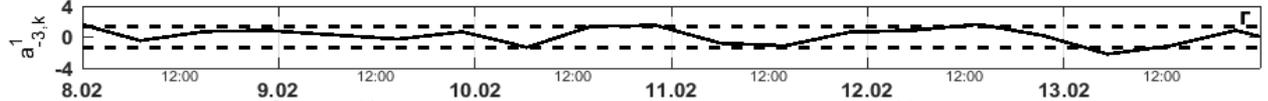
Сглаженная компонента (черным), модель (синим)



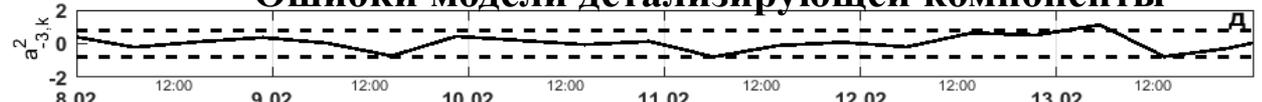
Детализирующая компонента (черным), модель (синим)



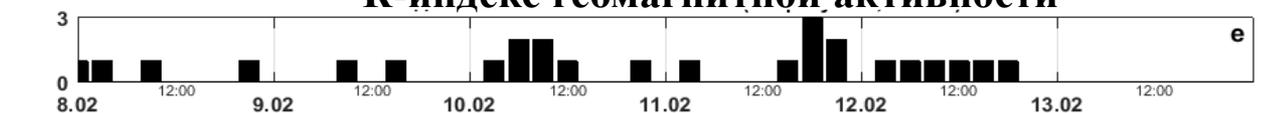
Ошибки модели сглаженной компоненты



Ошибки модели детализирующей компоненты



K-индекс геомагнитной активности



Оценка параметров модели рекуррентной составляющей по данным станции «Паратунка»

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

Лето (минимум СА, 15-мин данные)

Модель сглаженной компоненты:

$$s_{-5,k}^1 = -0.83 \cdot \omega_{-5,k-1}^1 - 0.84 \cdot \omega_{-5,k-2}^1 + a_{-5,k}^1(t)$$

детализирующей компоненты:

$$s_{-5,k}^2 = -0.86 \cdot \omega_{-5,k-1}^2 - 0.79 \cdot \omega_{-5,k-2}^2 + a_{-5,k}^2(t)$$

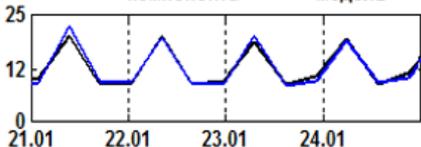
Оценка параметров модели выполнялась в спокойных условиях в зависимости от:

- сезона;
- уровня солнечной активности.



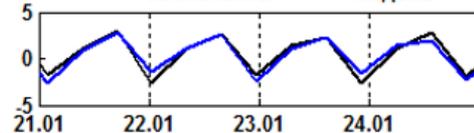
компонента

модель



компонента

модель



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

Лето (максимум СА, часовые данные)

Модель сглаженной компоненты:

$$s_{-3,k}^1 = -0.50 \cdot \omega_{-3,k-1}^1 - 0.58 \cdot \omega_{-3,k-2}^1 + a_{-3,k}^1(t)$$

детализирующей компоненты:

$$s_{-3,k}^2 = -0.88 \cdot \omega_{-3,k-1}^2 - 0.80 \cdot \omega_{-3,k-2}^2 + a_{-3,k}^2(t)$$

2. Идентификация возмущенной составляющей модели

$$f(t) = R(t) + U(t) + e(t) = \sum_{\mu=1, T} \alpha^\mu(t) + A_{\text{крат}}(t) + A_{\text{длит}}(t) + e(t)$$

В период **регулярных изменений** параметров предполагается $U(t) = 0$

В периоды длительных **аномальных изменений** возрастут ошибки модели $R(t)$

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

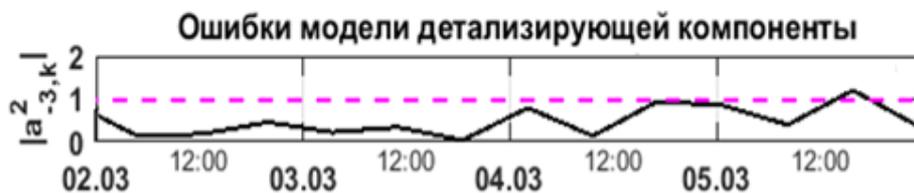
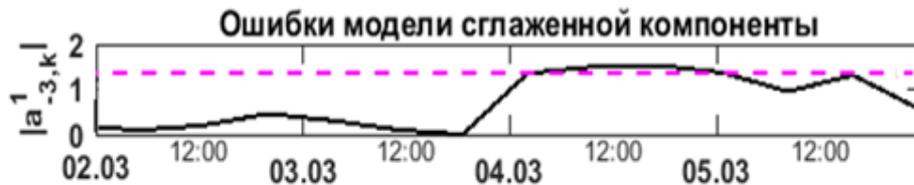
$$a_{j^{\text{пер}}, k+q}^\mu = S_{j^{\text{пер}}, k+q}^{\mu, \text{факт}} - S_{j^{\text{пер}}, k+q}^{\mu, \text{модель}} \quad \text{- ошибки модели } R(t)$$

Q_μ – длина упреждения данных,

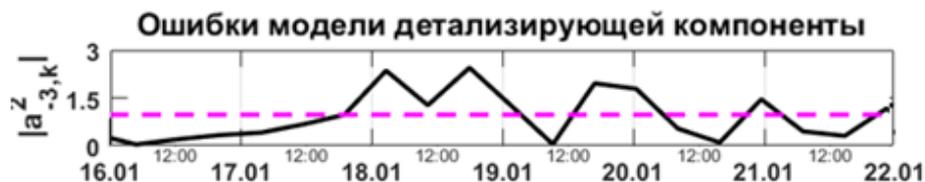
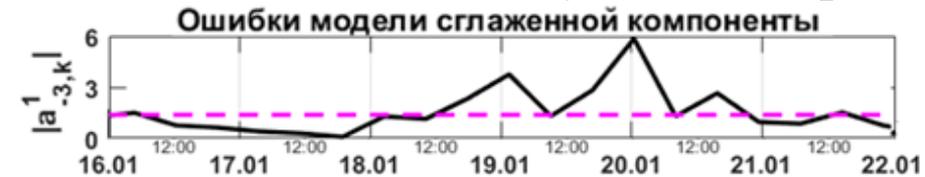
$H_{\mu, j^{\text{пер}}}$ – пороговое значение.

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

Ошибки модели в спокойный период



Ошибки модели в возмущенный период



Алгоритм выделения длительных аномальных изменений

$$A_{\text{длит}}(t)$$

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:

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

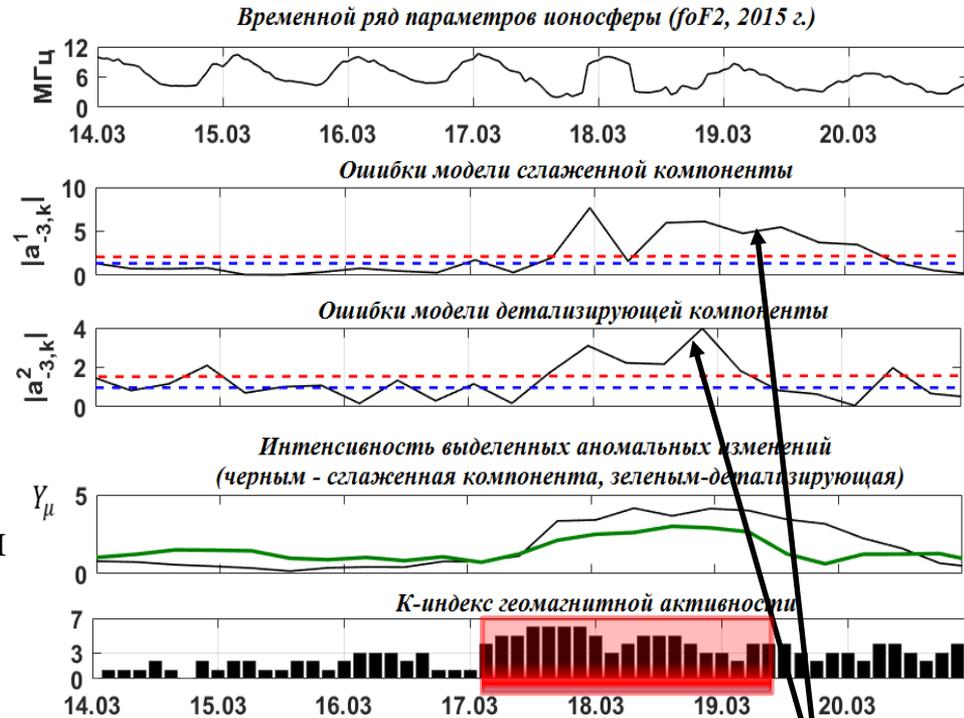
3. Принимаем за аномальные периоды времени $[k+1, k+q]$ для которых

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

4. Оцениваем интенсивность

$$Y_{j^{\text{пер}}; k+1, k+Q_{\mu}}^{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{Q_{\mu}} \sum_{q=1}^{Q_{\mu}} (a_{j^{\text{пер}},k+q}^{\mu})^2}}{H_{\mu, j^{\text{пер}}}} \quad (5)$$

Моделирование параметров ионосферы в период магнитной бури 17 марта 2015 г.



**Выделенные
аномальные
изменения**

Идентификация возмущенной составляющей модели

$$U(t) = \sum_{\eta} \beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = A_{\text{крат}}(t) + A_{\text{длит}}(t) + e(t)$$

Представление функции $U(t) \in L^2(R)$ в виде вейвлет-ряда:

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

$$\beta_{\text{возм}}^{\eta}(t) = \sum_n d_{\eta,n} \Psi_{\eta,n}(t), \quad d_{\eta,n} = \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle, \Psi_{\eta,n} - \text{вейвлет - базис}$$



Построение нелинейной аппроксимирующей вейвлет-схемы:

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

$$U_M(t) = \sum_{(\eta,n) \in P_M} \langle f, \Psi_{\eta,n} \rangle \Psi_{\eta,n}(t) - \text{проекция } U(t) \text{ на } M \text{ векторов,}$$

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

$$T_{\eta}^{\text{ad}} = U * St_{\eta}$$

U – пороговый коэффициент

$$St_{\eta} = \sqrt{\frac{1}{\Phi - 1} \sum_{n=1}^{\Phi} (d_{\eta,n} - \bar{d}_{\eta,n})^2}$$

Φ – длина скользящего временного окна

Алгоритм выделения разномасштабных аномальных изменений

1. Будем считать, что в момент времени $n = n_0$ в ионосфере возникло аномальное изменение масштаба η_0 , если $|d_{\eta_0, n_0}| > T_{\eta_0}^{\text{ад}}$.
2. Мощность аномального изменения I_{η_0, n_0} в момент времени n_0 на масштабе η_0 : $I_{\eta_0, n_0} = d_{\eta_0, n_0}$.
3. Если $\forall n_i \in (t_1, t_2), t_2 > t_1: d_{\eta_0, n_i} > T_{\eta_0}^{\text{ад}}$, в период времени (t_1, t_2) наблюдалось ионосферное возмущение масштаба η_0 , длительность которого $l_{\eta_0} = t_2 - t_1$.

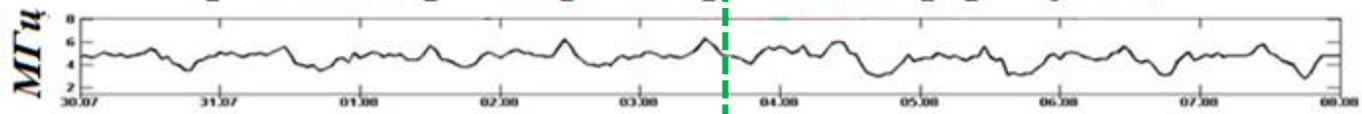
2. Оценка мощности (математической) аномалий:

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

$$\|d_{\eta, n}\|_2 = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_{\eta}} (d_{\eta, n})^2}$$

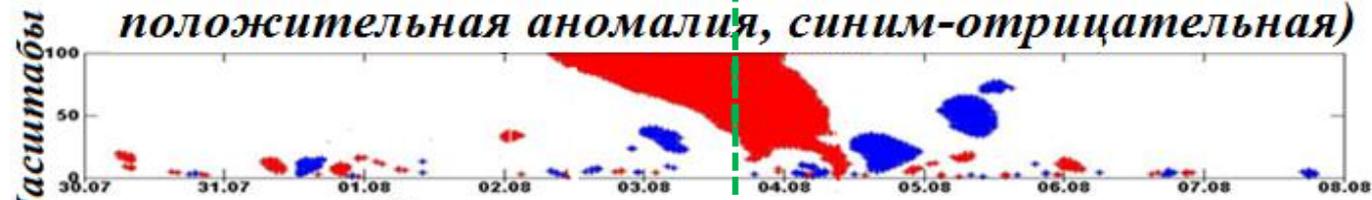
N_{η} – длина ряда на масштабе η

Временной ряд параметров ионосферы (foF2)

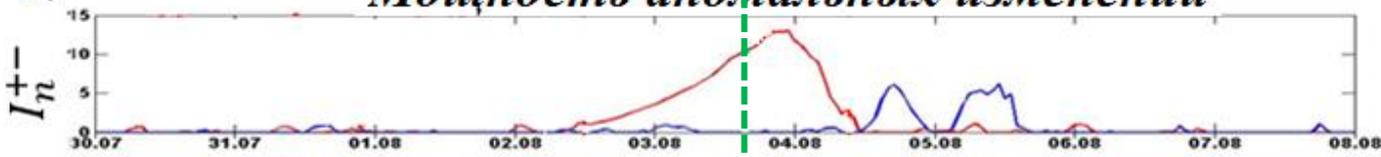


Начало магнитной бури

Выделенные аномальные изменения (красным - положительная аномалия, синим - отрицательная)



Мощность аномальных изменений

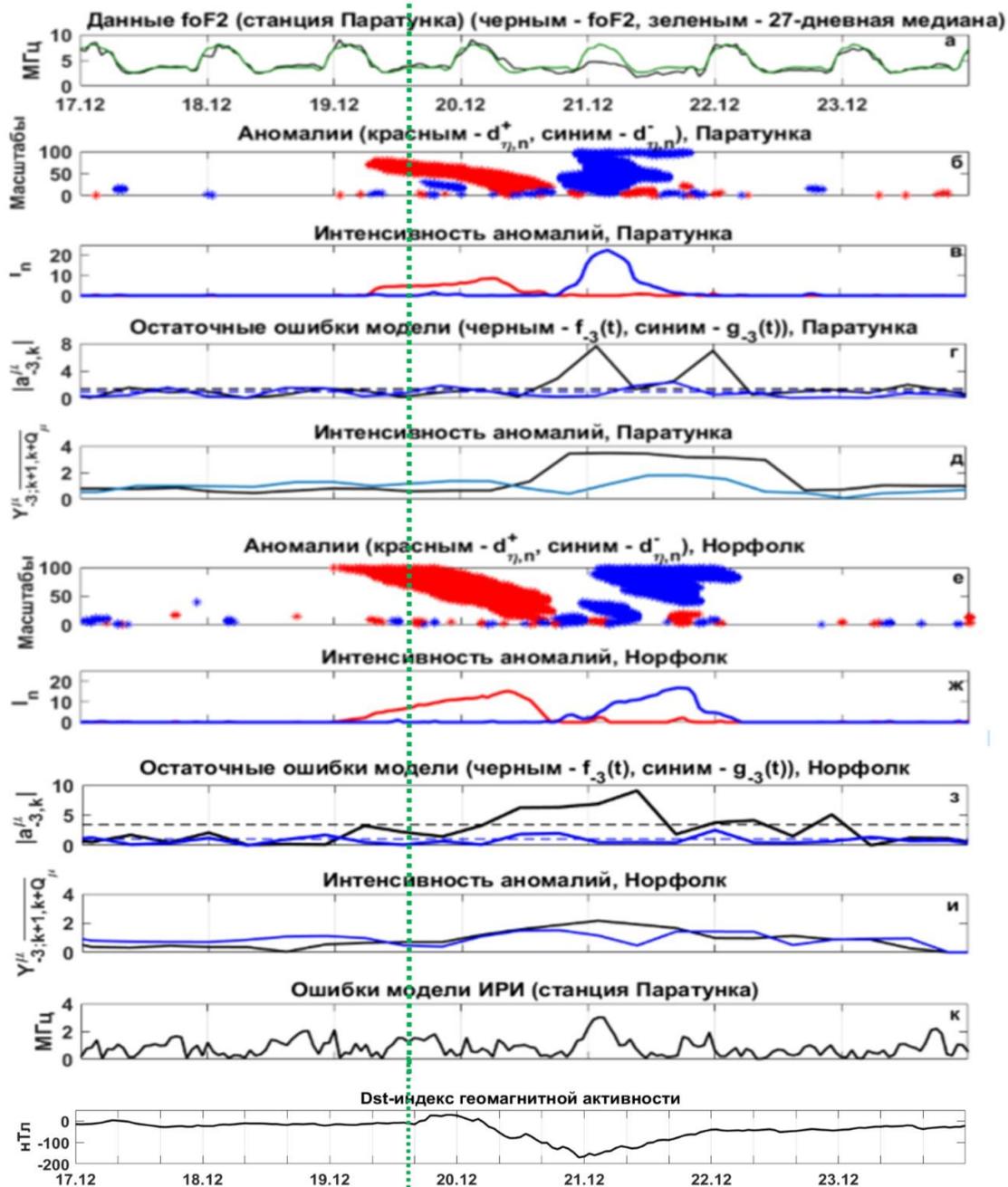


Пороговый коэффициент по данным станции «Паратунка»

$2.5 \leq U \leq 3.5$ – высокая солнечная активность

$1.5 \leq U \leq 2.5$ – низкая солнечная активность

Применение ОМКМ в период магнитной бури 19 декабря 2015 г.

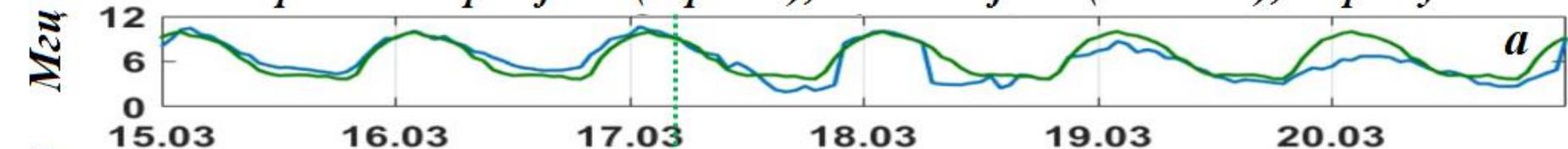


Анализ параметров ионосферы станции «Паратунка» (Россия, Камчатка)

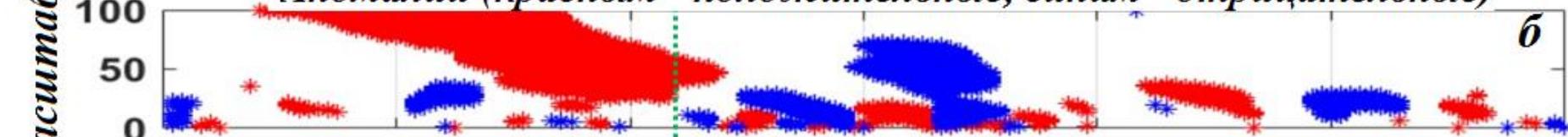
Анализ параметров ионосферы станции «Норфолк» (Австралия)

Применение ОМКМ в период магнитной бури 17 марта 2015 г.

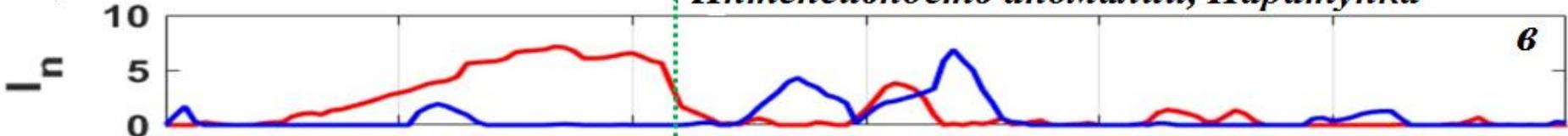
Временной ряд f_oF2 (черным), медиана f_oF2 (зеленым), Паратунка



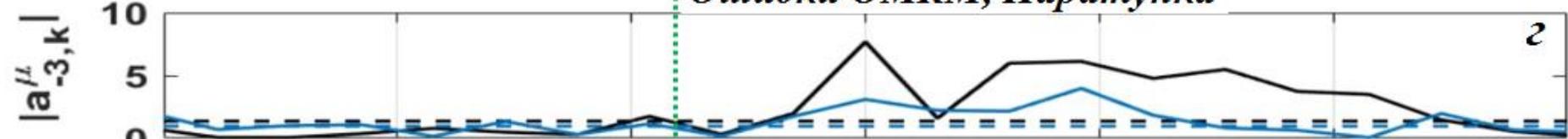
Аномалии (красным - положительные, синим - отрицательные)



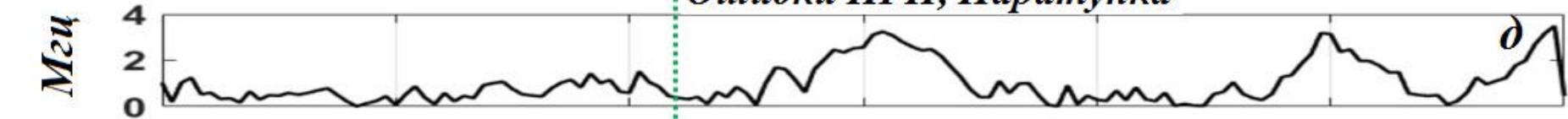
Интенсивность аномалий, Паратунка



Ошибки ОМКМ, Паратунка

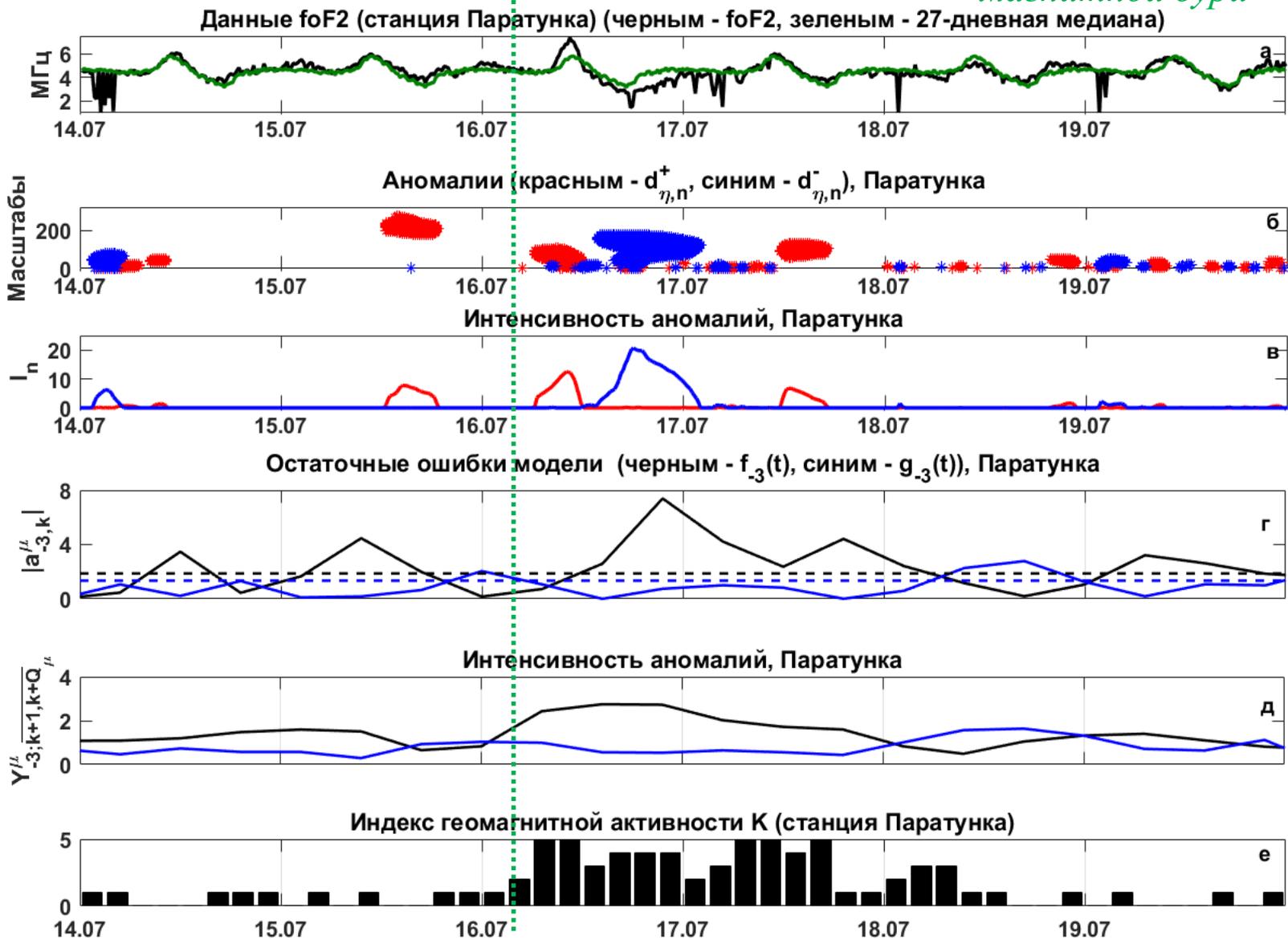


Ошибки ИРИ, Паратунка



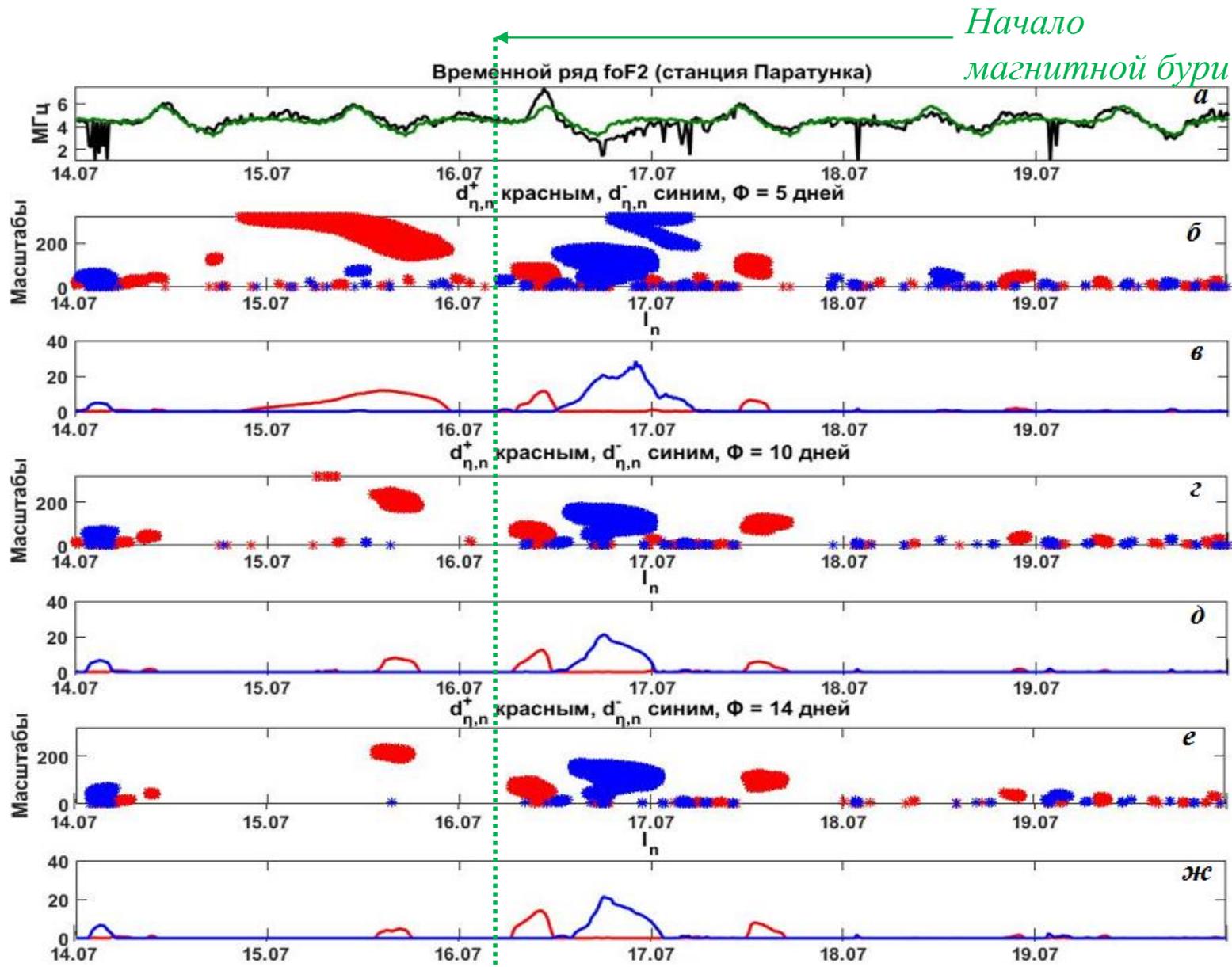
Применение ОМКМ в период магнитной бури 16 июля 2017 г.

Начало
магнитной бури



Применение алгоритма в период магнитной бури 16 июля 2017 г.

(с использованием различных значений параметра Φ (использовались $\Phi=5, 10$ и 14 дней))



Выводы

Применение предложенной обобщенной многокомпонентной модели (ОМКМ) к данным ионосферы позволило детально изучить динамику ионосферного процесса в возмущенные периоды.

ОМКМ, в отличие от аналогов (например, ИРИ и медианный метод), позволяет в оперативном режиме выделять ионосферные аномалии и оценивать их параметры.

Апробация, выполненная для часовых и 15-ти минутных ионосферных данных, показала эффективность применения ОМКМ в задаче выделения положительной фазы ионосферного возмущения, которое может возникать накануне сильных магнитных бурь и представляют интерес в задачах космической погоды.

Программная система анализа ионосферных данных:

<http://www.ikir.ru:8280/lserver>

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект №14-11-00194.

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