



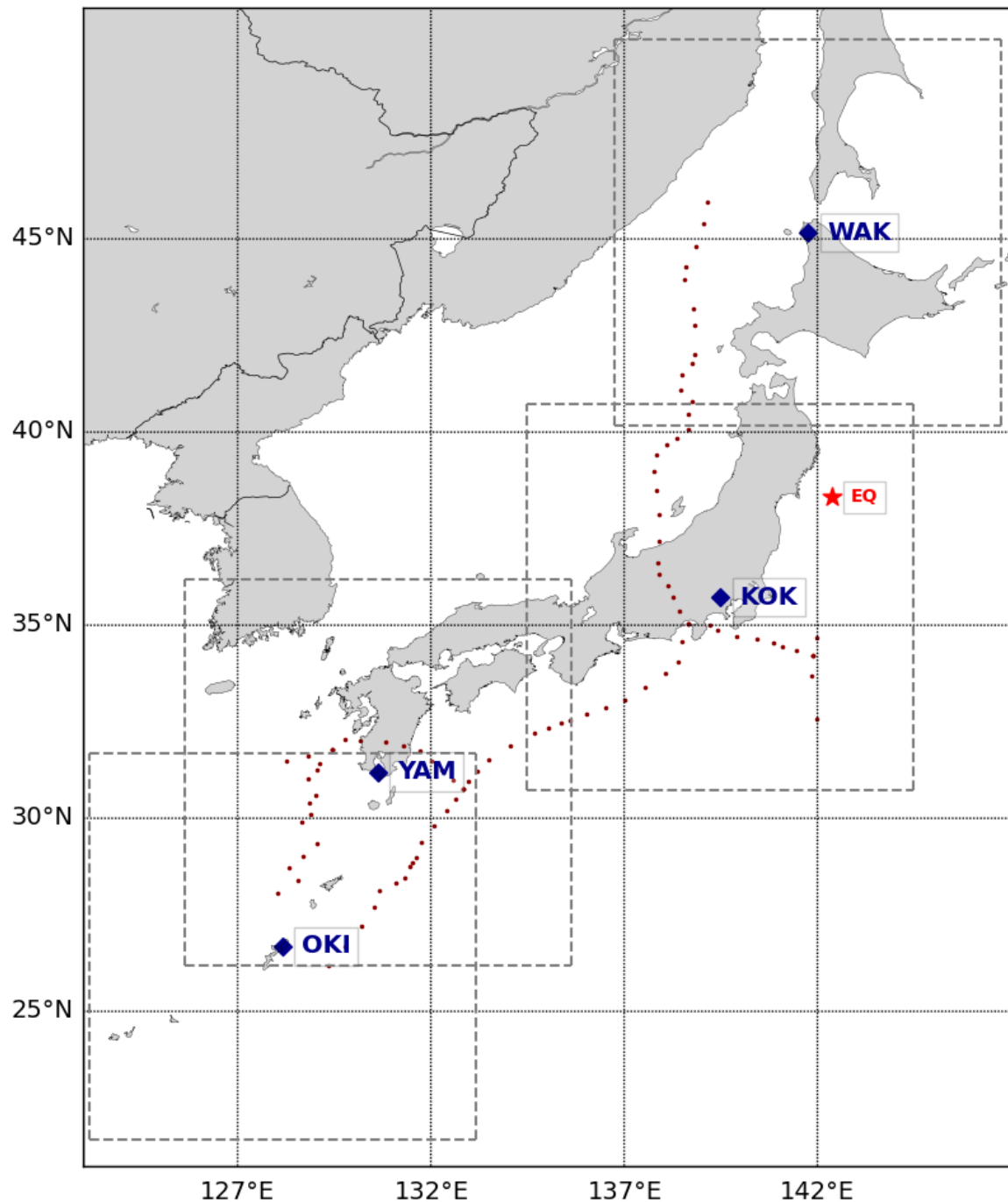
## Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса

Применение методов анализа и разложения временных рядов для выявления аномалий пространственно-временного распределения концентрации электронов в ионосфере по данным спутниковых измерений на примере землетрясения Тохоку 2011 года

Савельева Н.В. ([nasa2000@yandex.ru](mailto:nasa2000@yandex.ru)), Пилипенко В.А. ([pilipenko\\_va@mail.ru](mailto:pilipenko_va@mail.ru))

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru)

Москва, 12 ноября 2024 года



З/т Тохоку произошло 11 марта 2011 года.

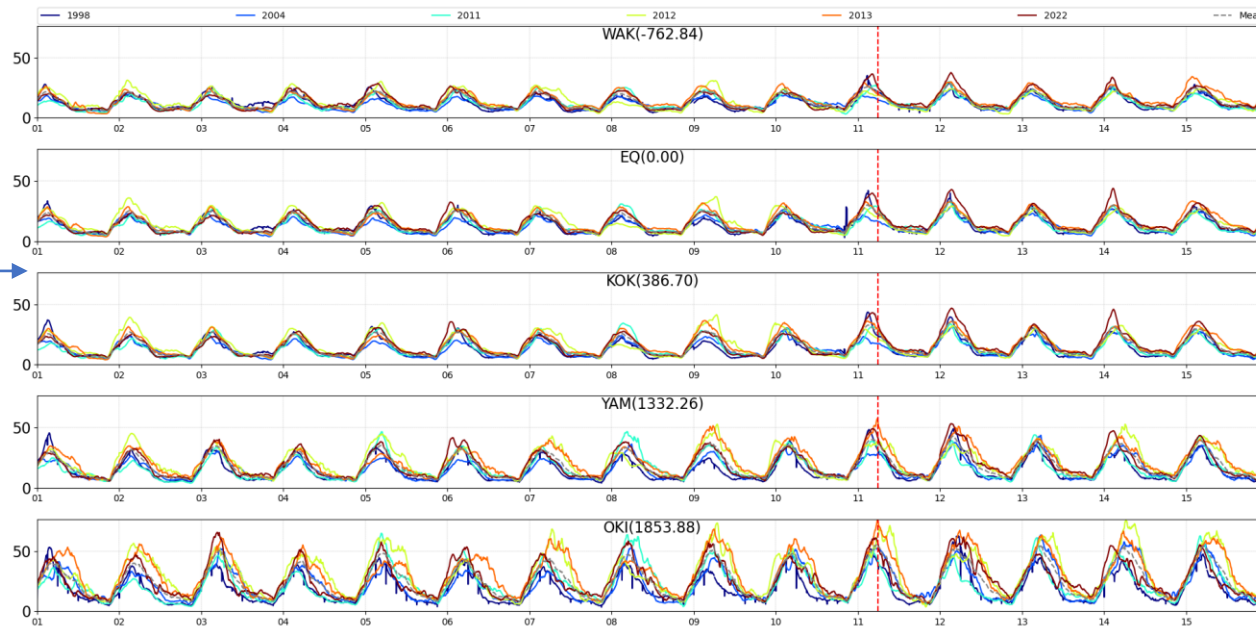
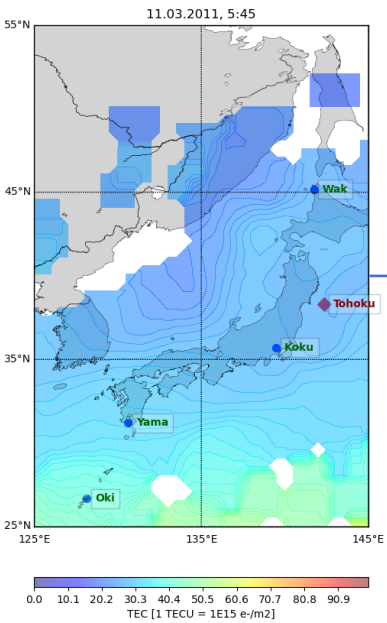
На карте показаны:

- эпицентр з/т (красная звездочка) и местоположения станций ионосферного зондирования (синие кружки);
- границы интегрирования ПЭС (серый пунктир,  $\pm 5^\circ$ );
- места разломов земной коры (красные точки) по данным цифровой карты разломов модели Питера Берда (<http://peterbird.name/>).

Название пункта	Геогр. широта WGS-84 °N	Геогр. долгота WGS-84 °E	Магнитн. широта IGRF-10 °N	Магнитн. долгота IGRF-10 °E
Эп. зт (EQ)	38.32	142.37		
Вакканей (Wak)	45.16	141.75	36.4	208.9
Кокубунжи (Kok)	35.71	139.49	26.8	208.2
Ямагава (Yam)	31.20	130.62	21.7	200.5
Окинава (Oki)	26.68	128.15	17.0	198.6

# Исходные данные

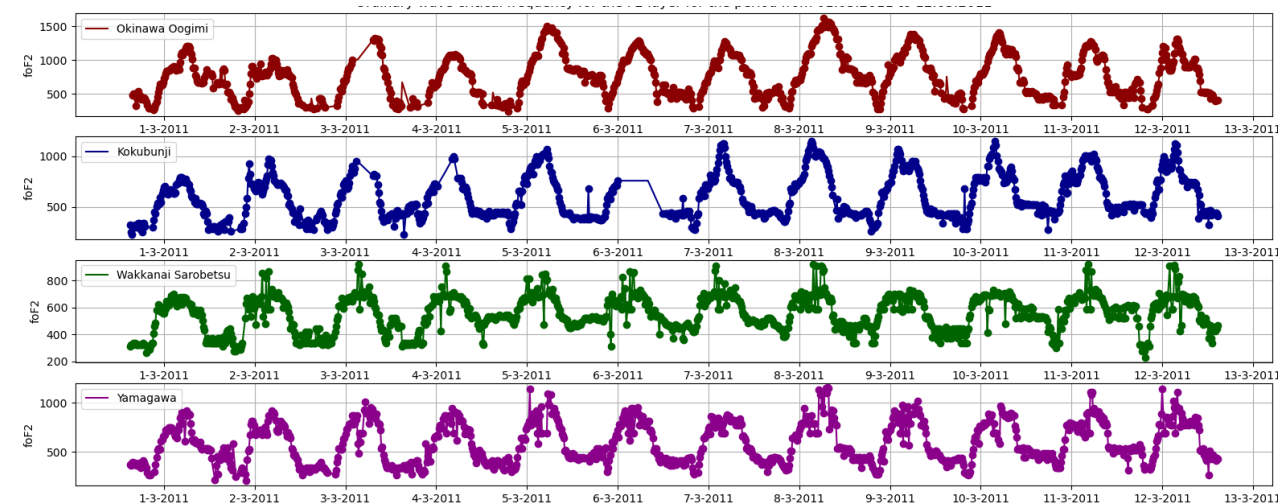
Двумерные карты ПЭС, построенные по задержкам GPS сигналов в ионосфере, принятых на станциях сети GEONET в Японии [1] с разрешением 2.5x2.5 градуса по широте и долготе и шагом по времени 5 минут.



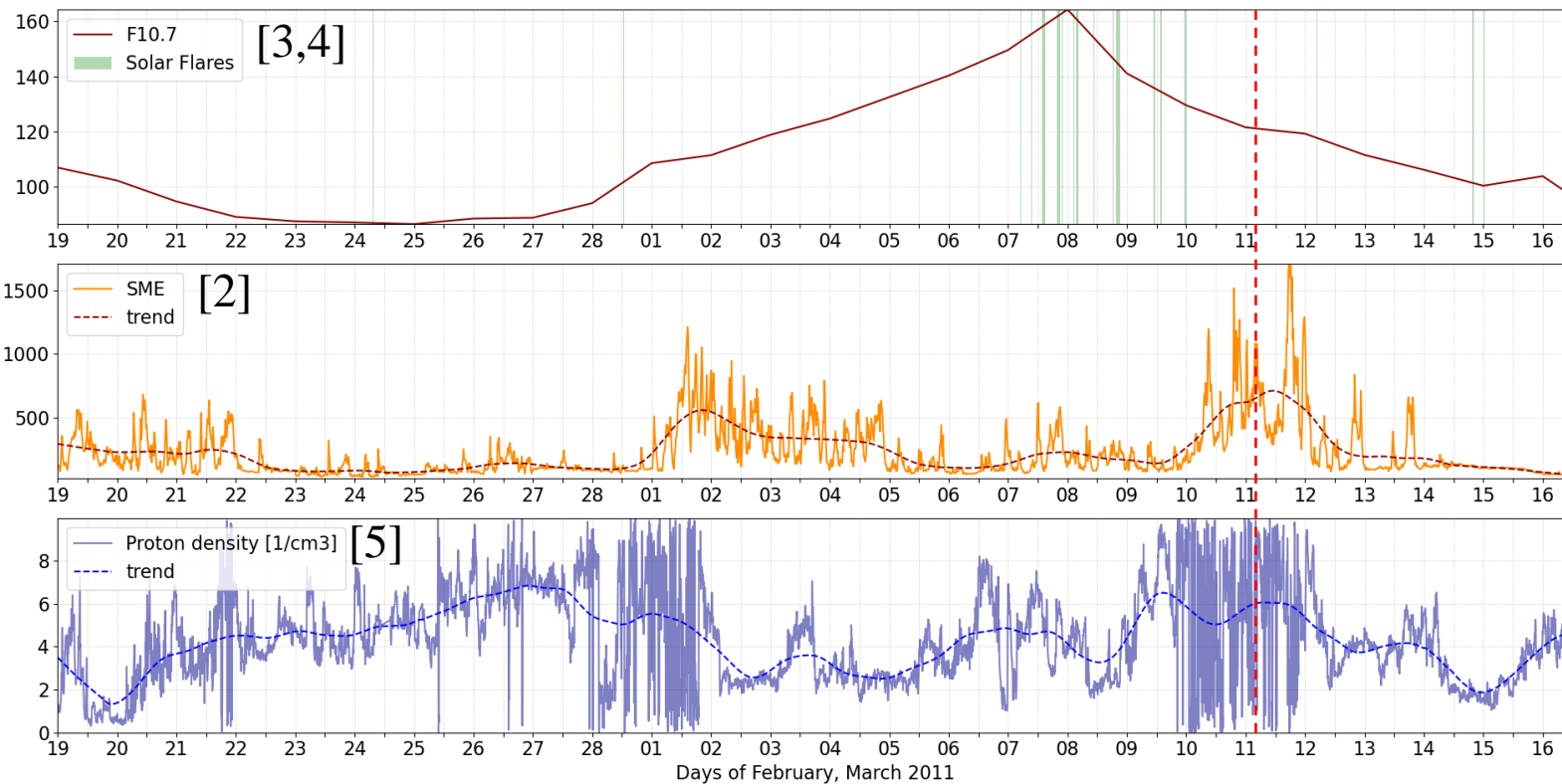
Наземные измерения критической частоты  $f_oF2$  (мера максимальной электронной концентрации в ионосфере), измеренные на четырех станциях ионосферного зондирования в Японии [2] с шагом по времени 15 минут.

1.Total Electron Content (GNSS-TEC) database by ISEE, Nagoya University, Japan. URL: <https://stdb2.isee.nagoya-u.ac.jp/GPS/GPS-TEC/index.html>

2.Ionosonde observations in Japan by Ionospheric Working Group of NIICT, Japan. URL: [https://wdc.nict.go.jp/IONO/index\\_E.html](https://wdc.nict.go.jp/IONO/index_E.html)



# Солнечная активность перед з/т Тохоку



1. World Data Center for Solar-Terrestrial Physics in Moscow. URL:  
<http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/monthly/>

2. SuperMAG Magnetic Indices. URL:  
<https://supermag.jhuapl.edu/indices/>

3. F10.7 cm Radio Emissions at Space. URL:  
<https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>

4. Catalog of Solar Flare Events by V.N. Ishkov, IZMIRAN, DOI: <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-FE-02>

5. SOHO/CELIAS/MTOF Proton Monitor. URL:  
<https://space.umd.edu/pm/>

# Методика анализа временных рядов STL

Для анализа временных рядов использован метод фильтрации и разложения временного ряда на долгопериодический тренд, сезонные колебания и остаточные (аномальные) вариации, известный под аббревиатурой STL (Cleveland, 1990).

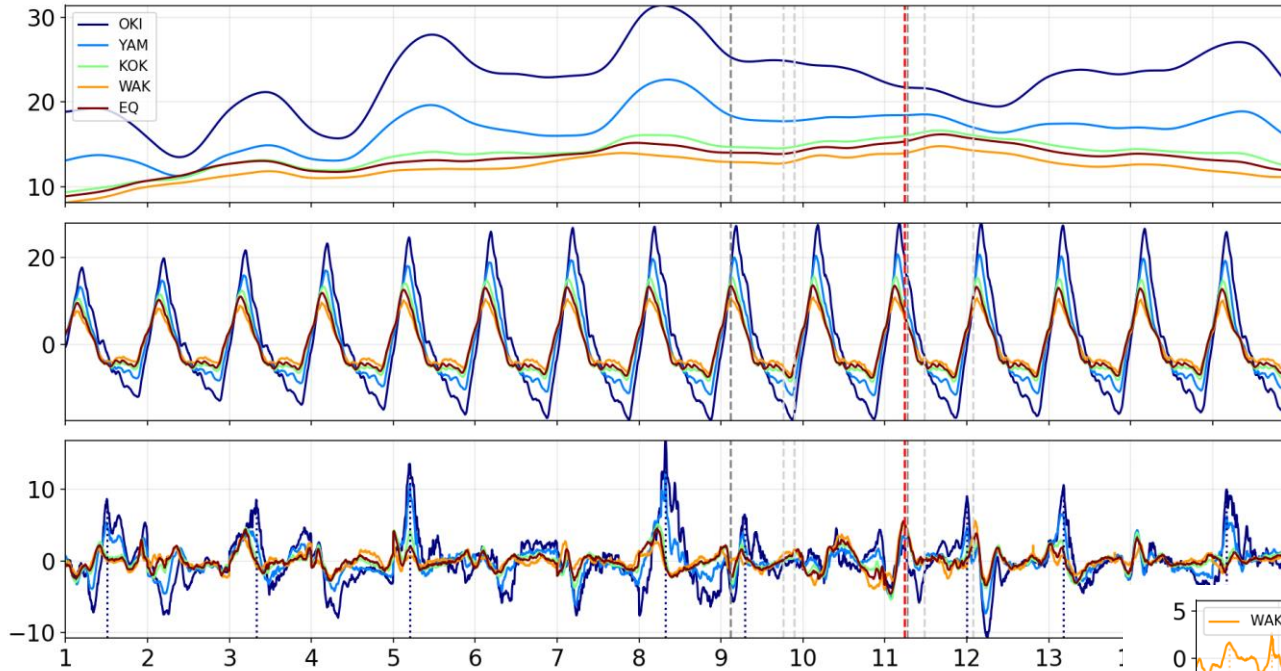
STL включает несколько этапов фильтрации, с применением фильтра LOESS (locally estimated scatterplot smoothing) без учета весовых коэффициентов или LOWESS (locally weighted scatterplot smoothing) с учетом весовых коэффициентов.

Такой подход позволяет разделить годовые, суточные изменения, связанные с движением Земли вокруг Солнца и вокруг своей оси и аномальные локальные вариации, возникающие в результате сейсмической активности за счет предполагаемых сейсмо-ионосферных связей.

Метод имеет ряд ограничений на исходные данные: равномерная дискретизация, отсутствие разрывов, наличие нескольких сезонных циклов, отсутствие «выбросов».

Ref. Cleveland, R.B., Cleveland, W.S., McRae, J.E., Terpenning, I. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS // Journal of Official Statistics Vol. 6, No. 1, 1990, pp. 3-73

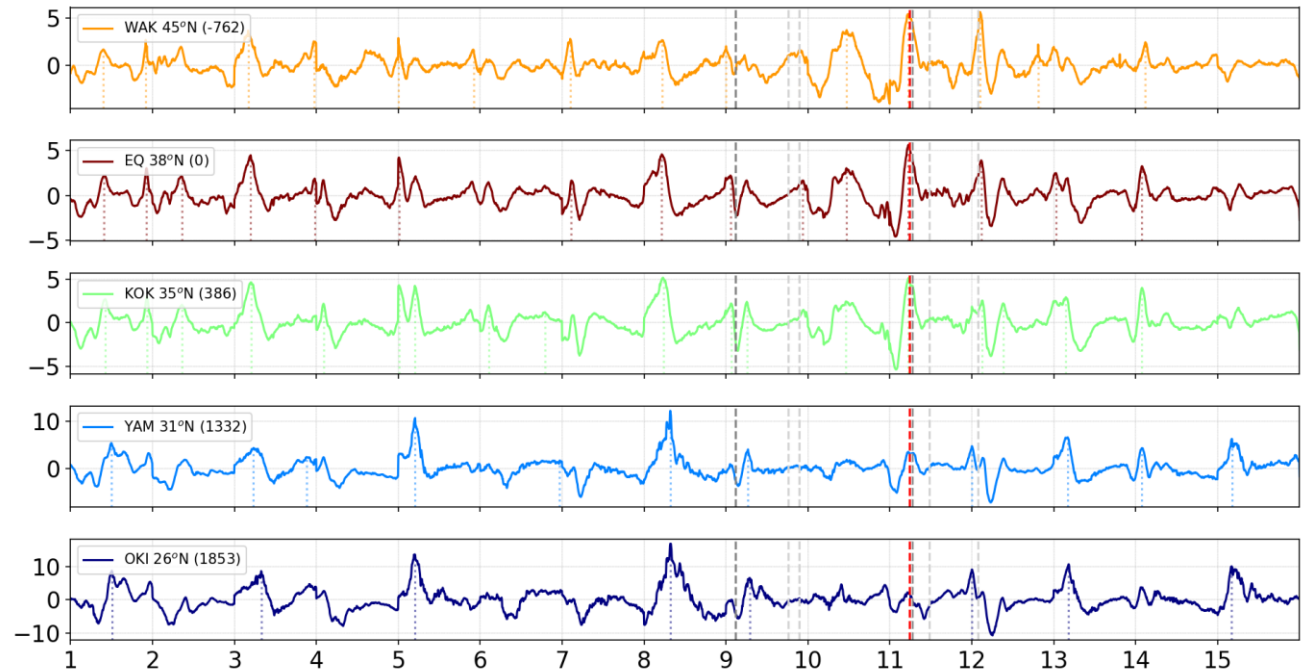
# Анализ временных рядов локального ПЭС с использованием классического метода STL



Данные по ПЭС дискретизированы с шагом 5 минут (288 измерений в сутки) и  $2.5 \times 2.5$  градуса по широте и долготе. База данных ведется с 1993г.

Непосредственно над Японией в данных практически нет разрывов. Отдельные пропуски устраняются путем интерполяции, так как исходные данные представляют собой двумерные карты.

Ввиду высокой точности измерений и усреднения сначала по лучу, затем по области вокруг станции, существенных «выбросов» в данных также нет.



# Анализ данных ионозонда по foF2 модифицированным методом STL

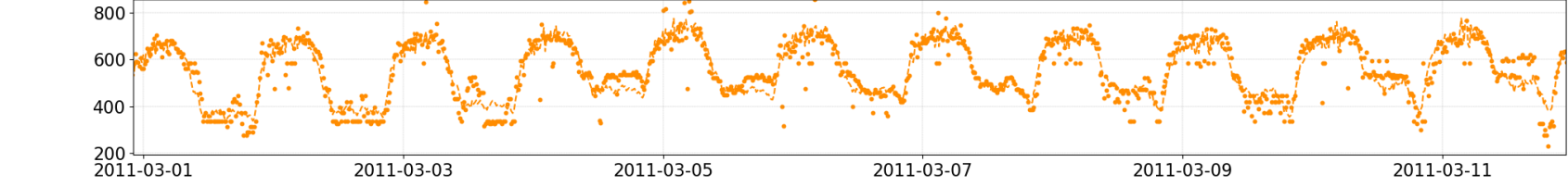
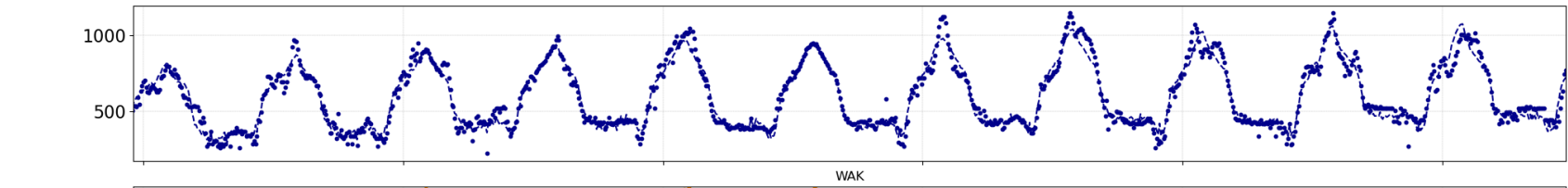
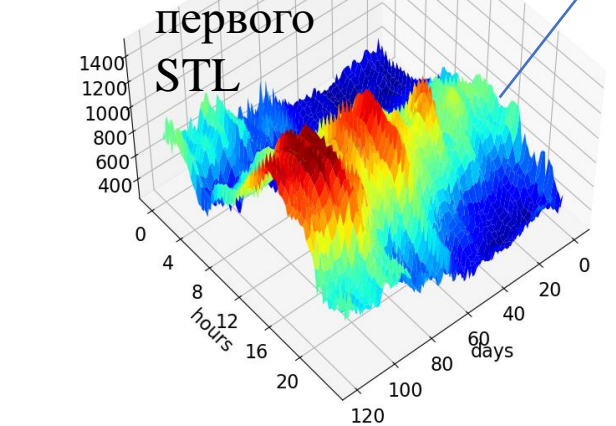
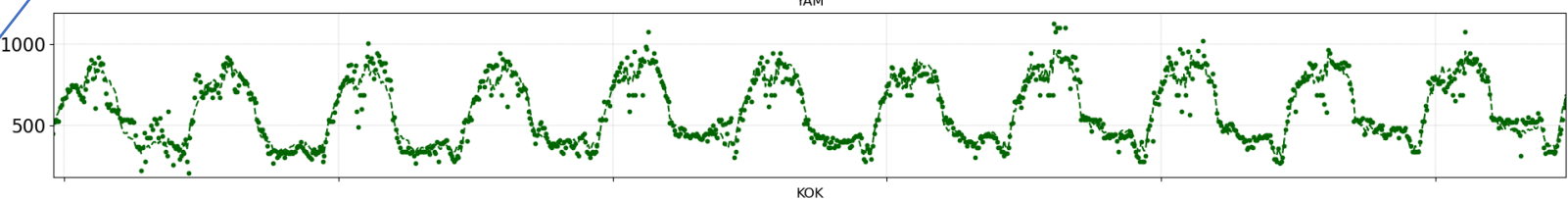
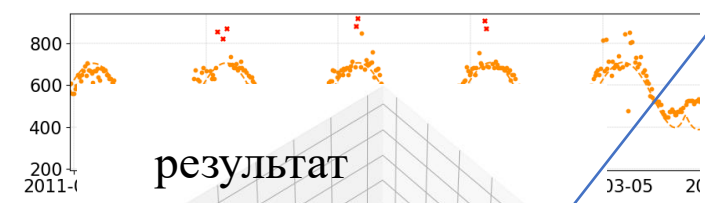
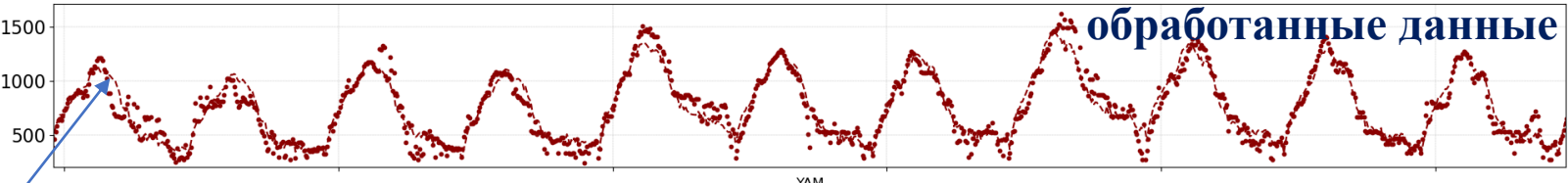
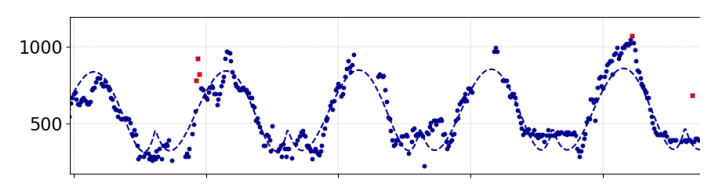
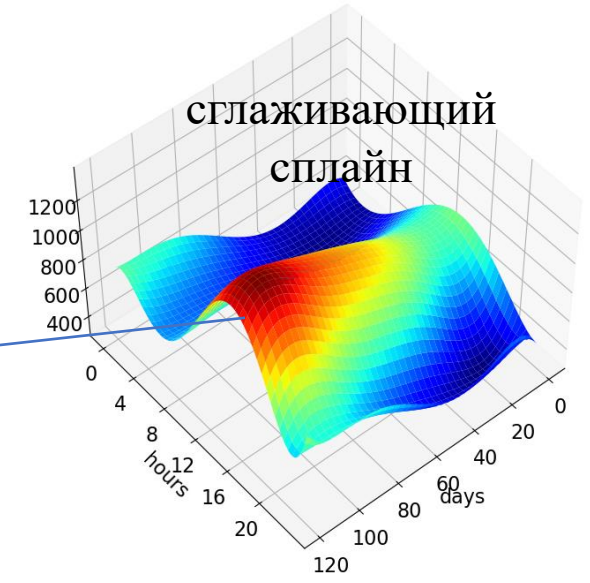
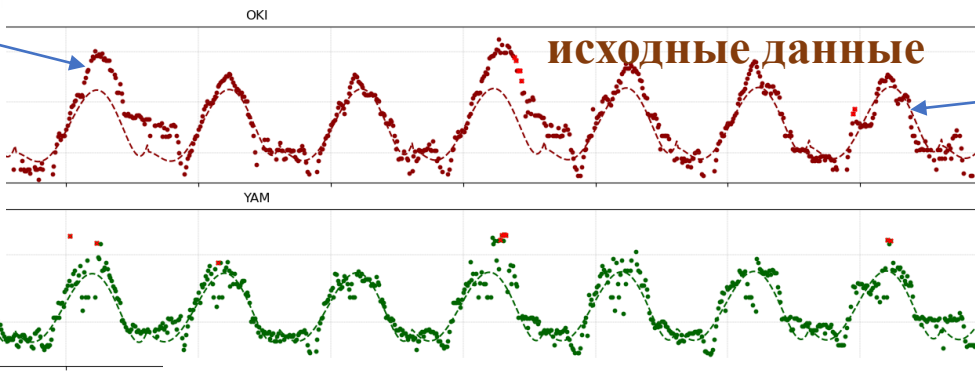
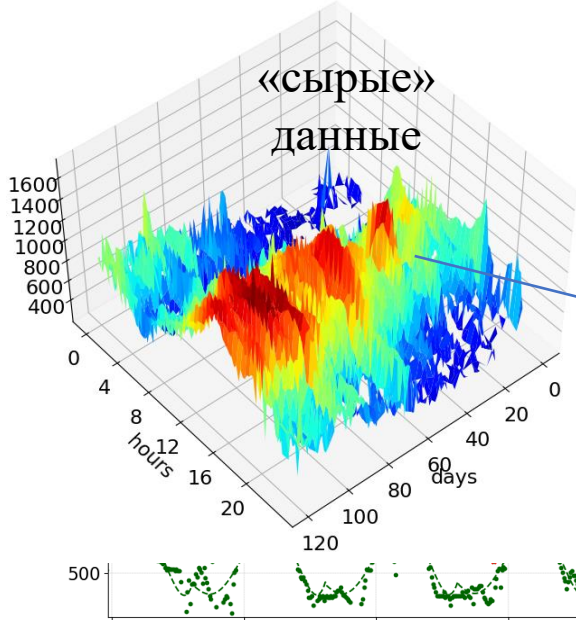
Измерения foF2 с разрешением 15 минут (96 измерений в сутки) содержат пропуски (длиной от минут до нескольких суток) и выбросы (одиночные и серии), потому классический STL дает искаженные результаты: часть периодической составляющей остается в ошибках.

Необходимо применение модифицированного метода STL, предложенного в статье Имашева, 2024.

## Алгоритм

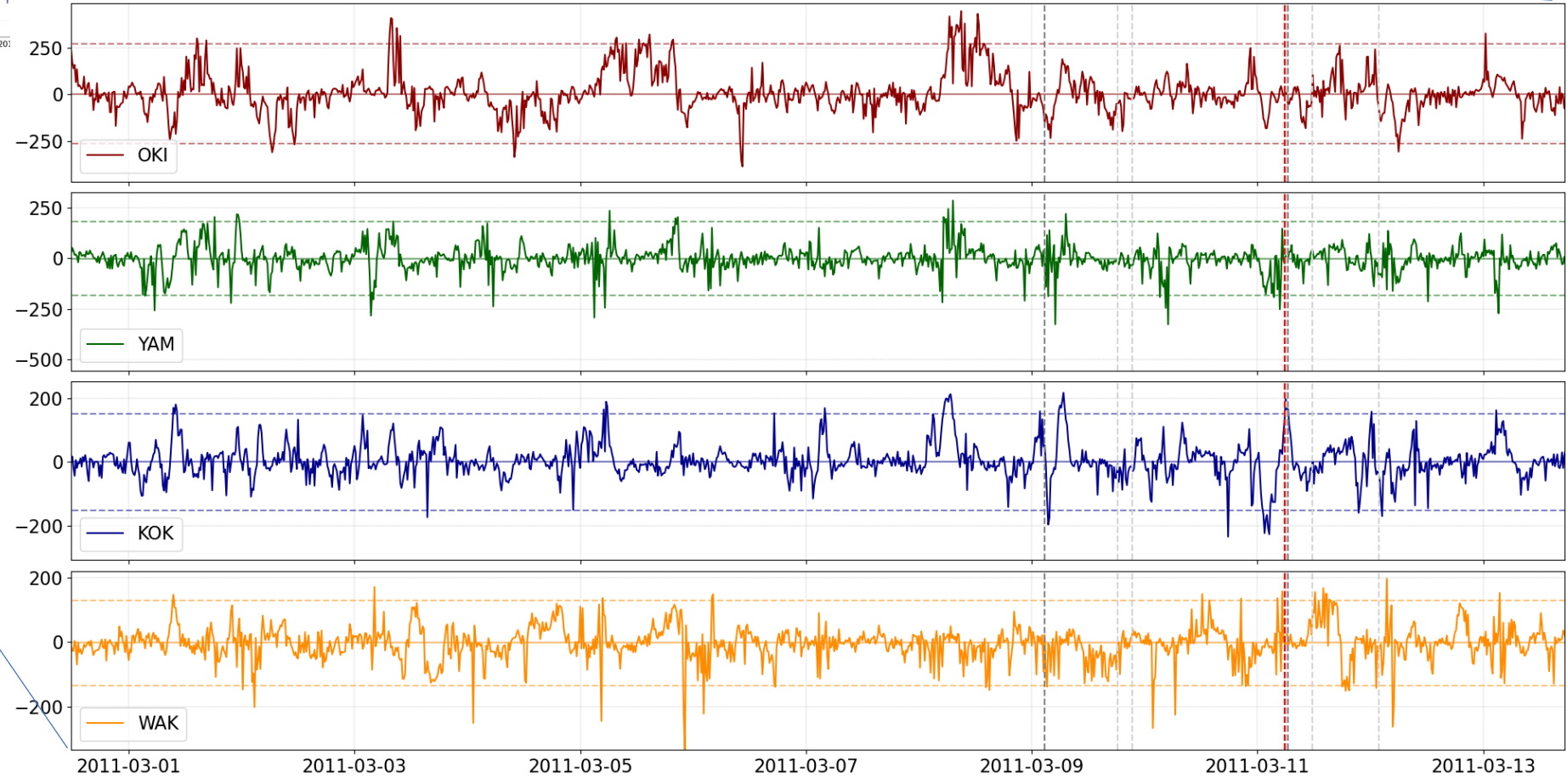
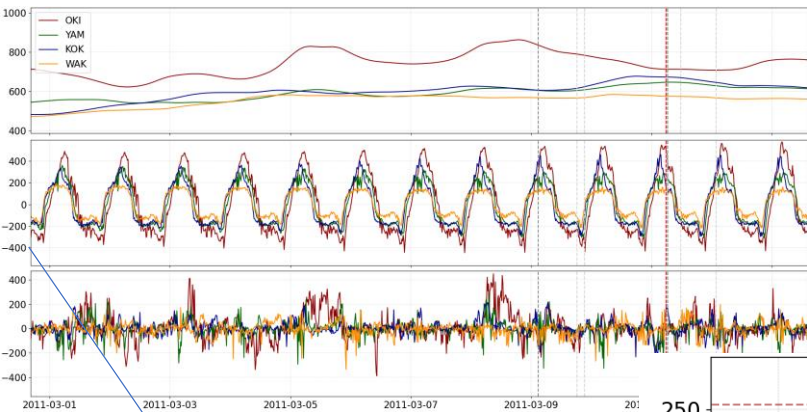
- Аппроксимация данных с использованием двумерного сглаживающего сплайна.
- Интерполяция пропусков в исходных данных полученным сплайном.
- Первый STL цикл.
- Использование полученного в первом STL-цикле разложения (тренд и сезонный компонент) в качестве более точной интерполяции исходных данных.
- Анализ полученных в первом STL-цикле остаточных вариаций для выявления недостоверных измерений («выбросов»), а также расчета весовых коэффициентов.
- Второй STL цикл с весовыми коэффициентами.

Ref. Имашев С.А., Паров С. В. Модифицированное сезонное разложение вариаций модуля индукции магнитного поля Земли // Информационные технологии. Том 30, № 2, 2024. DOI: 10.17587/it.30.59-67

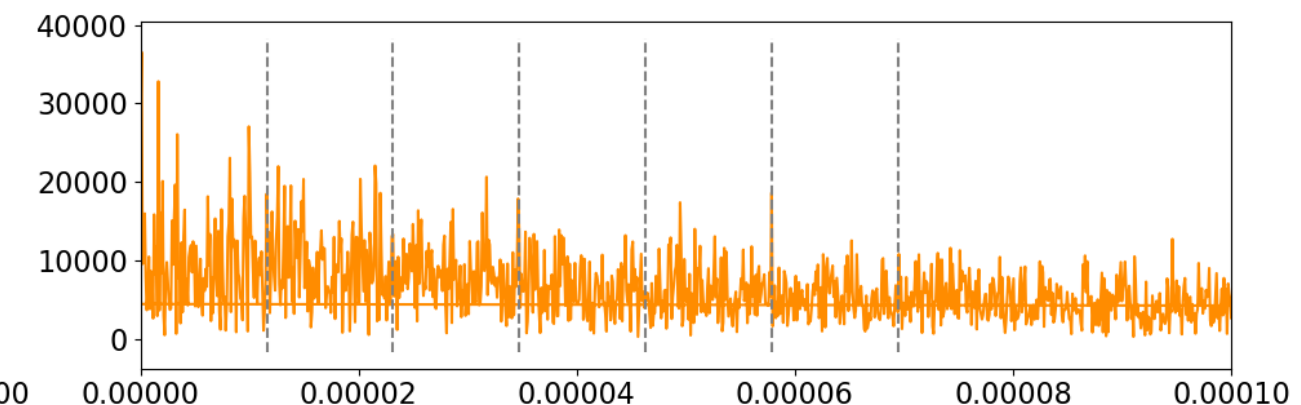
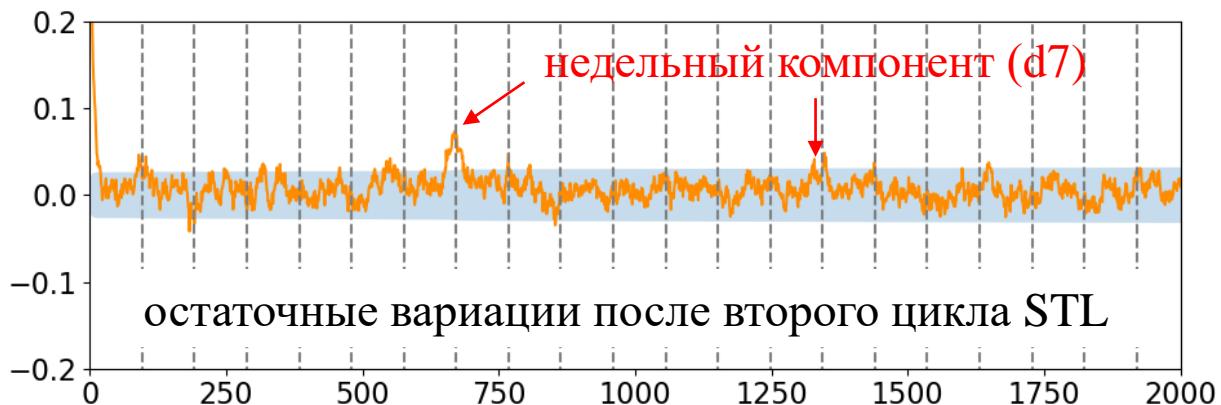
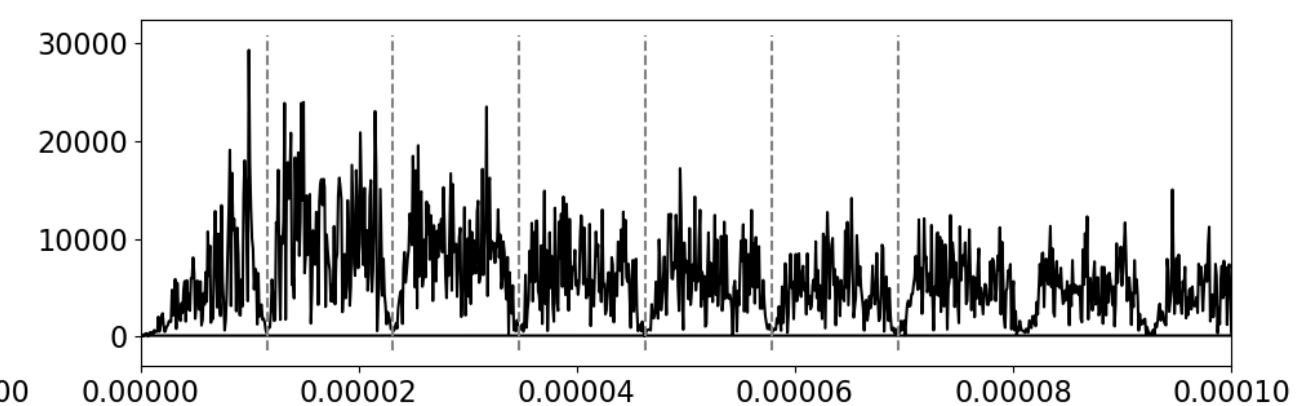
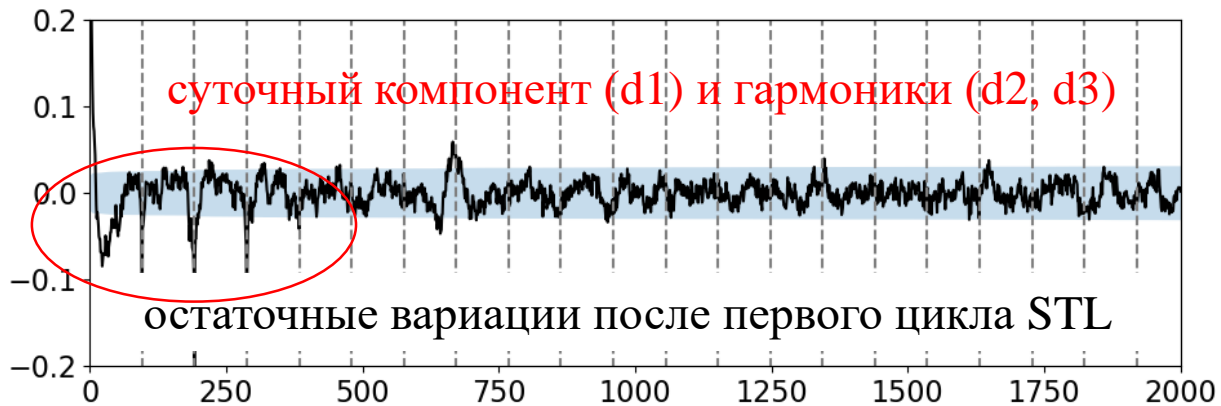
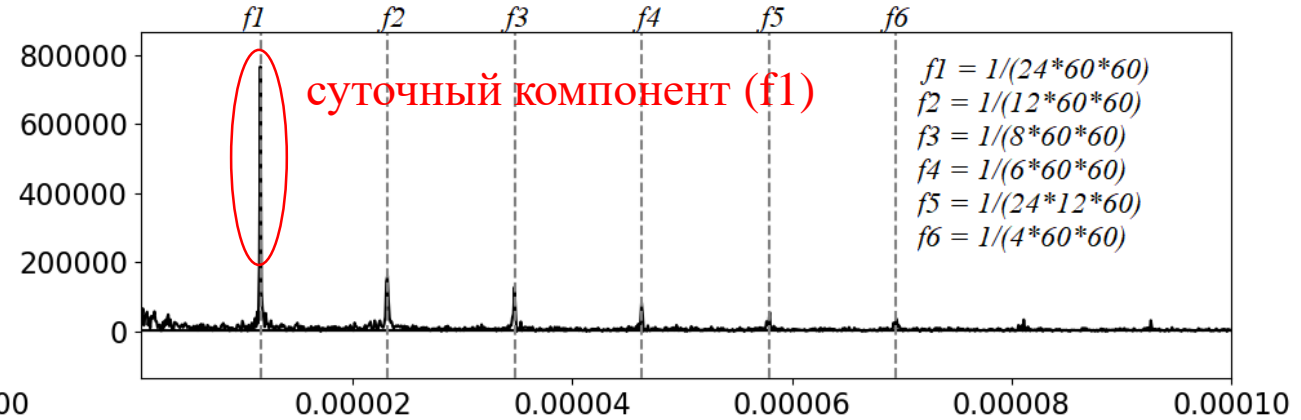
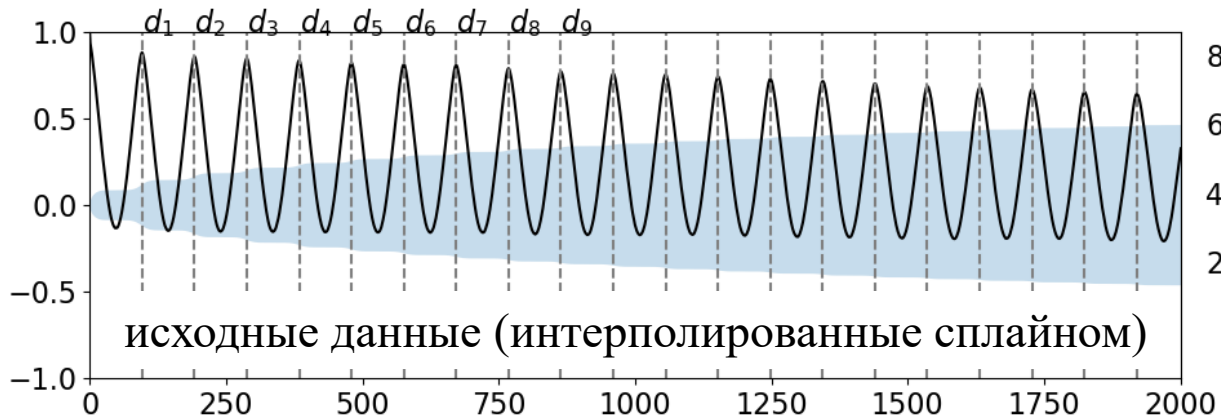




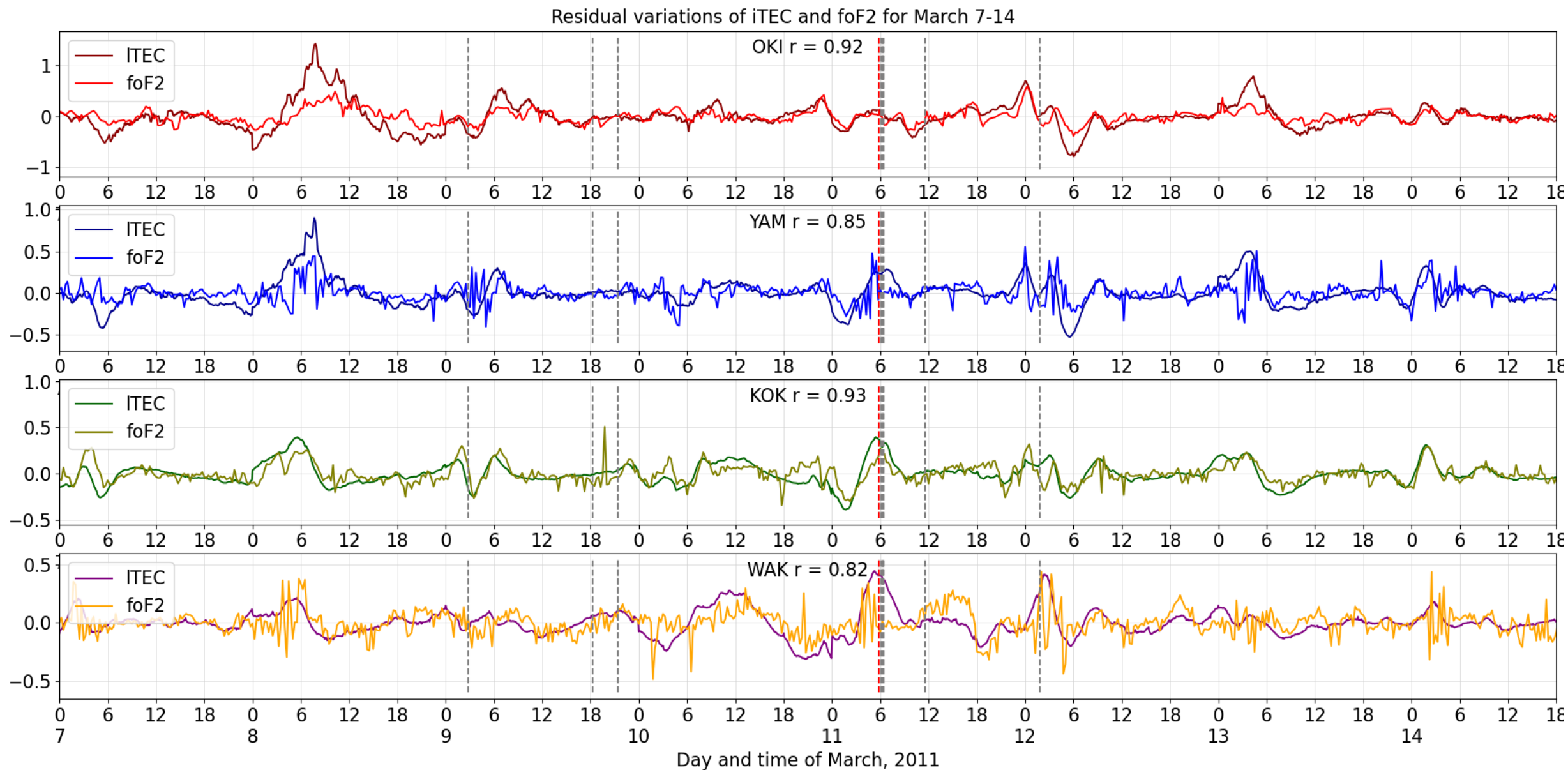
# Результат второго цикла STL для четырех наземных станций



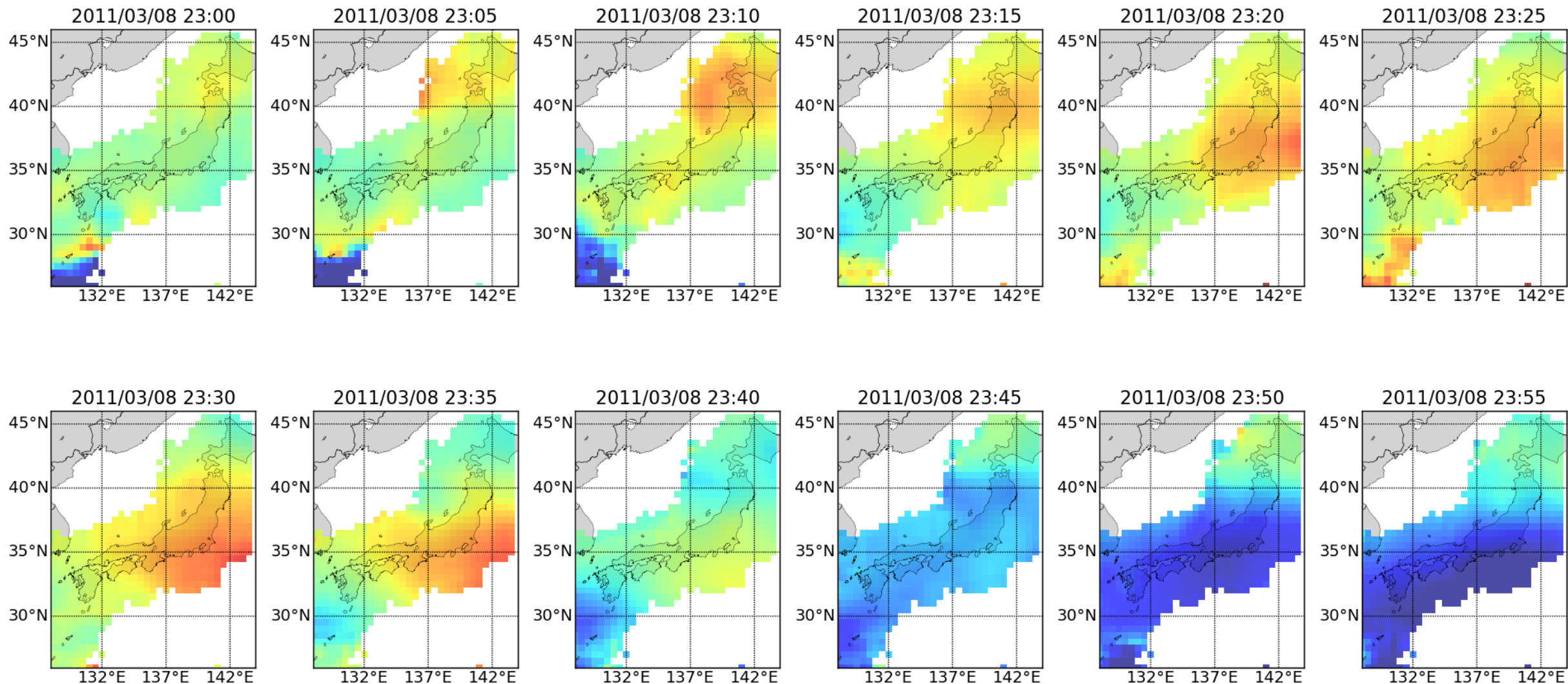
# Сравнение результатов первого и второго цикла STL



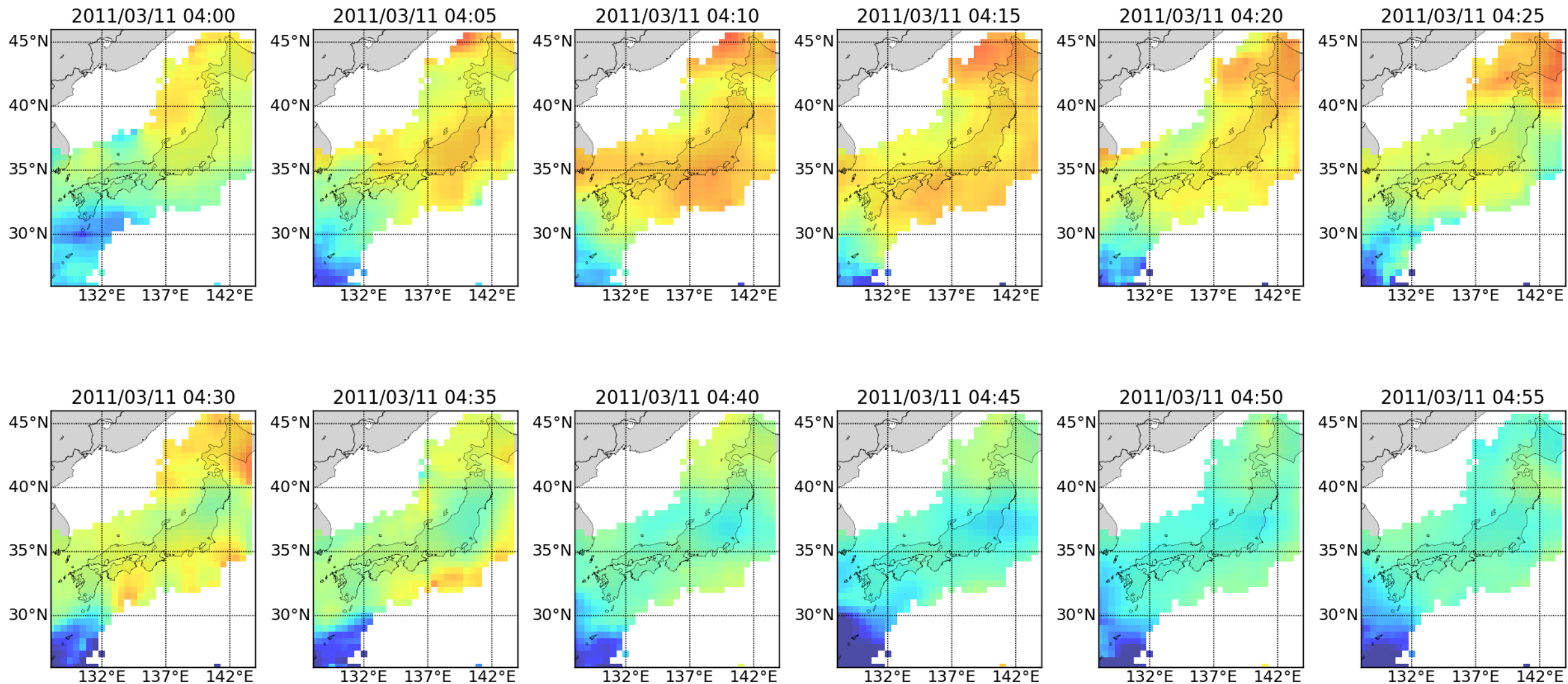
# Сопоставление аномальных вариаций локального ПЭС и foF2



# Анализ пространственного распределения остаточных вариаций ПЭС 8 марта 2011 года: неоднородность с 23:00 до 23:40 UT (+1d 8:00-8:40 LT)



# Анализ пространственного распределения остаточных вариаций ТЕС 11 марта 2011 года: неоднородность с 4:00 до 4:40 UT (13:00-13:40 LT)



# ВЫВОДЫ

- Предложен метод выделения аномальных вариаций концентрации электронов в ионосфере в период перед сильным землетрясением над областью сейсмической активности.
- Показана возможность разделения аномальных неоднородностей электронной концентрации, обусловленных внешними факторами (солнечная активность) и сейсмическими факторами, за счет предполагаемого взаимодействия литосферы с атмосферой и ионосферой.
- Для выделения статистически-значимых отклонений параметров электронной концентрации использован модифицированный метод анализа временных рядов с последующей корреляцией результатов независимых измерений.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**