



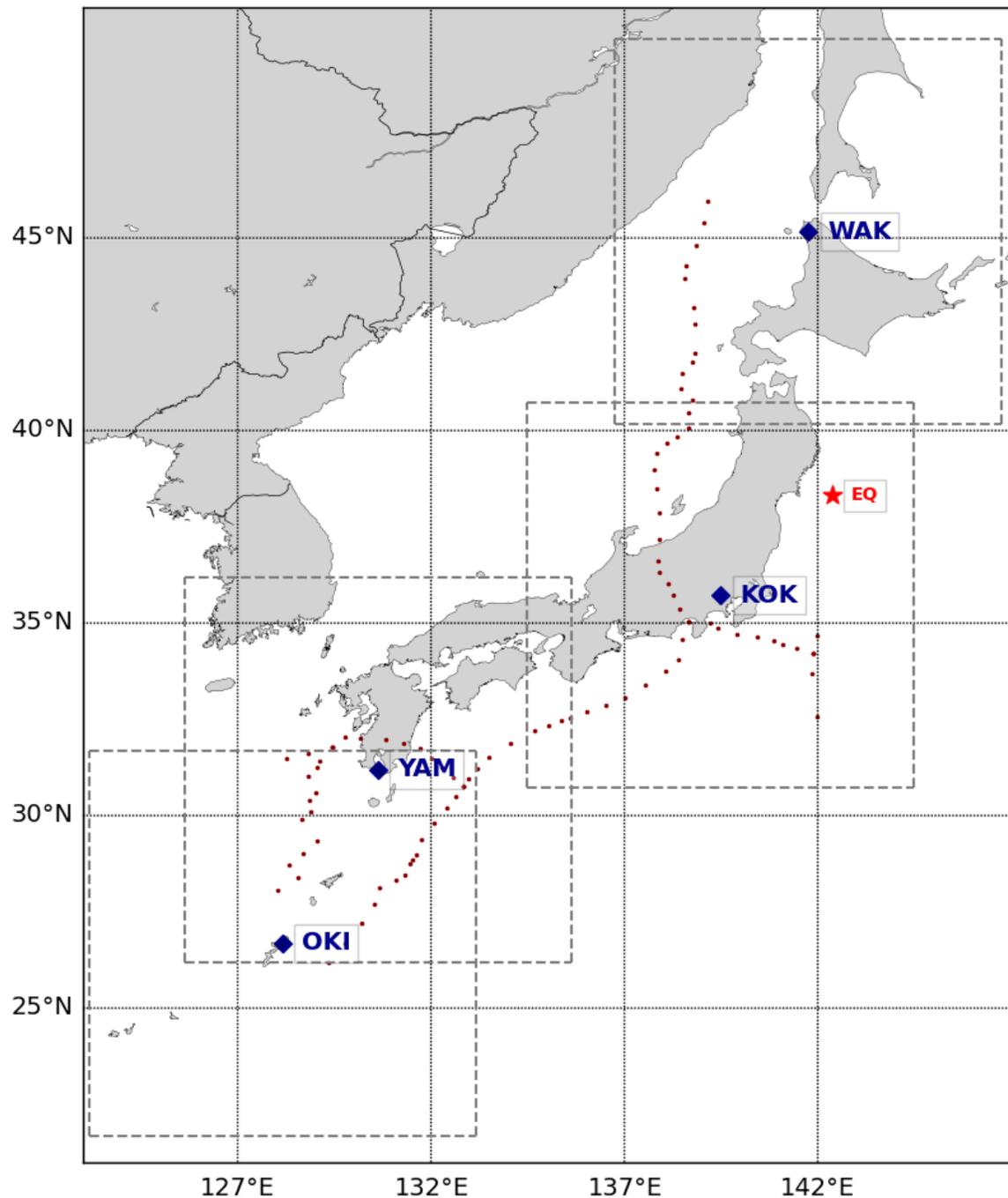
Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса

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), Пилипенко В.А. (pilipenko_va@mail.ru)

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, www.ifz.ru

Москва, 12 ноября 2024 года



З/т Тохоку произошло 11 марта 2011 года.

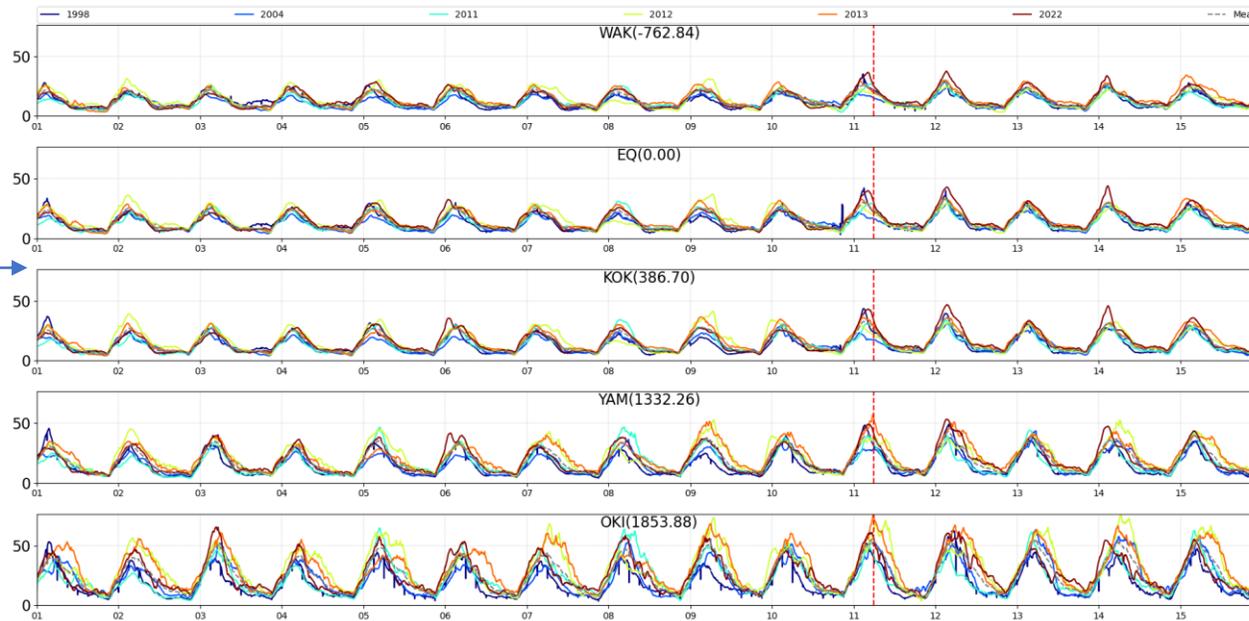
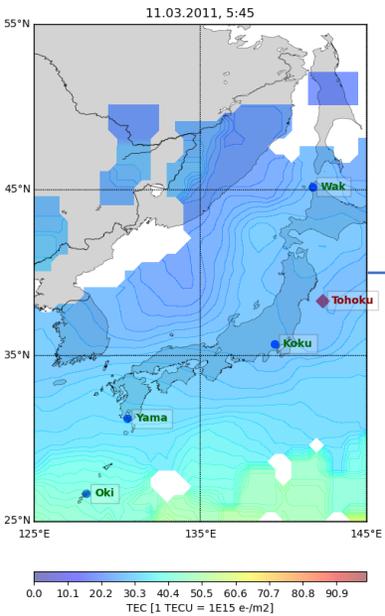
На карте показаны:

- 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

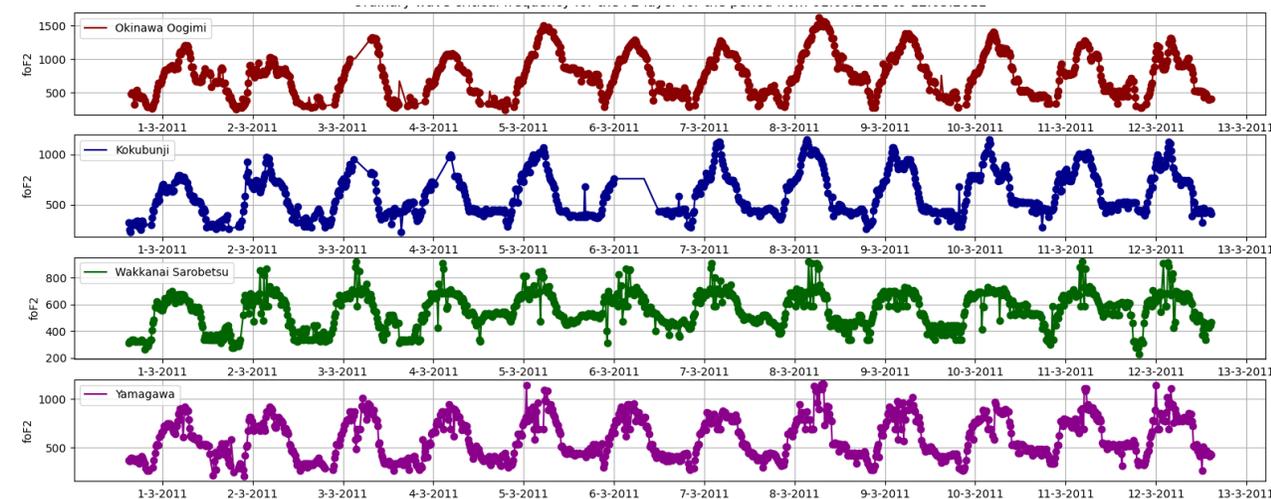
Двумерные карты ПЭС, построенные по задержкам GPS сигналов в ионосфере, принятых на станциях сети GEONET в Японии [1] с разрешением 2.5x2.5 градуса по широте и долготе и шагом по времени 5 минут.



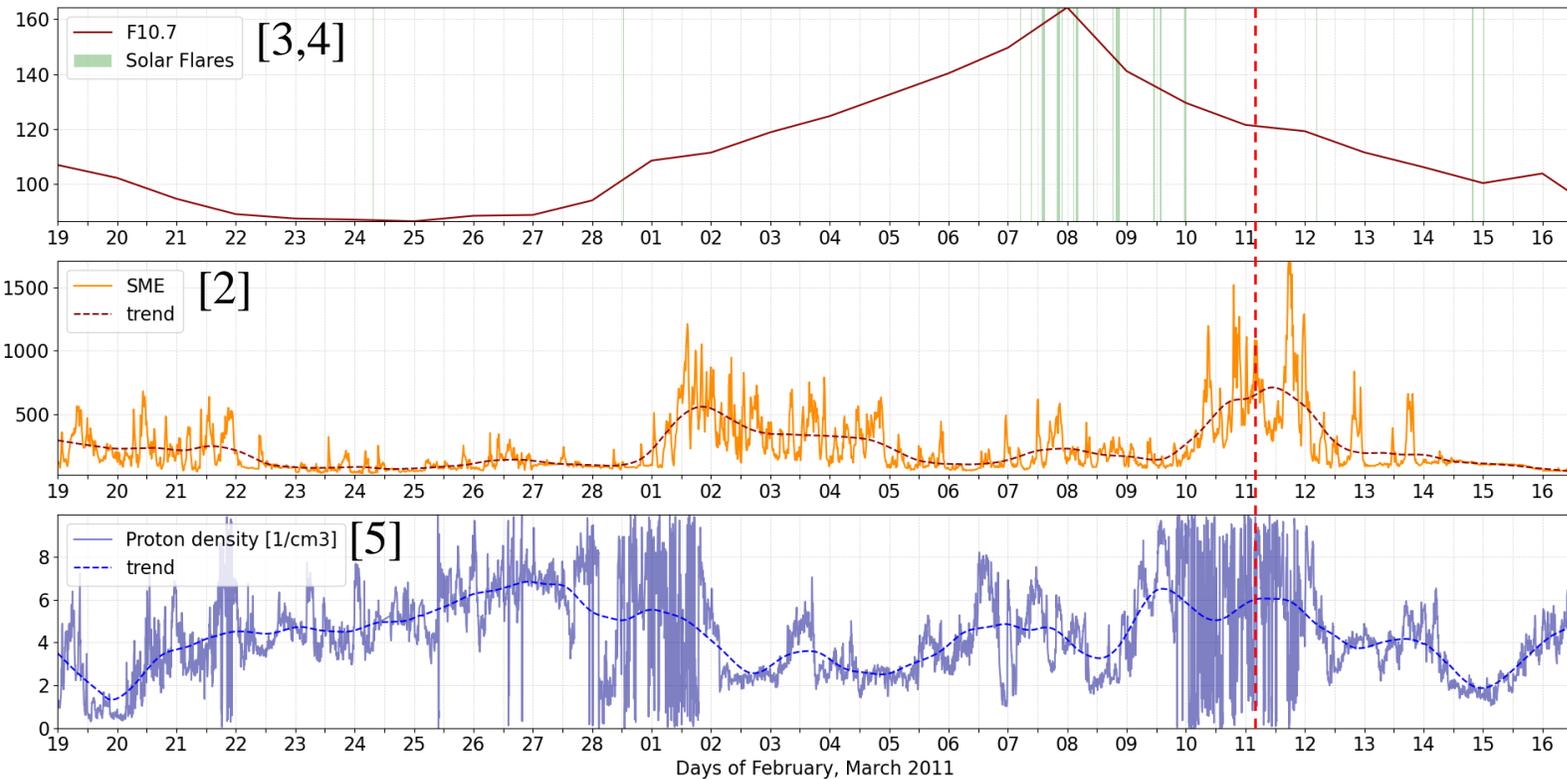
Наземные измерения критической частоты f_oF2 (мера максимальной электронной концентрации в ионосфере), измеренные на четырех станциях ионосферного зондирования в Японии [2] с шагом по времени 15 минут.

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



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).

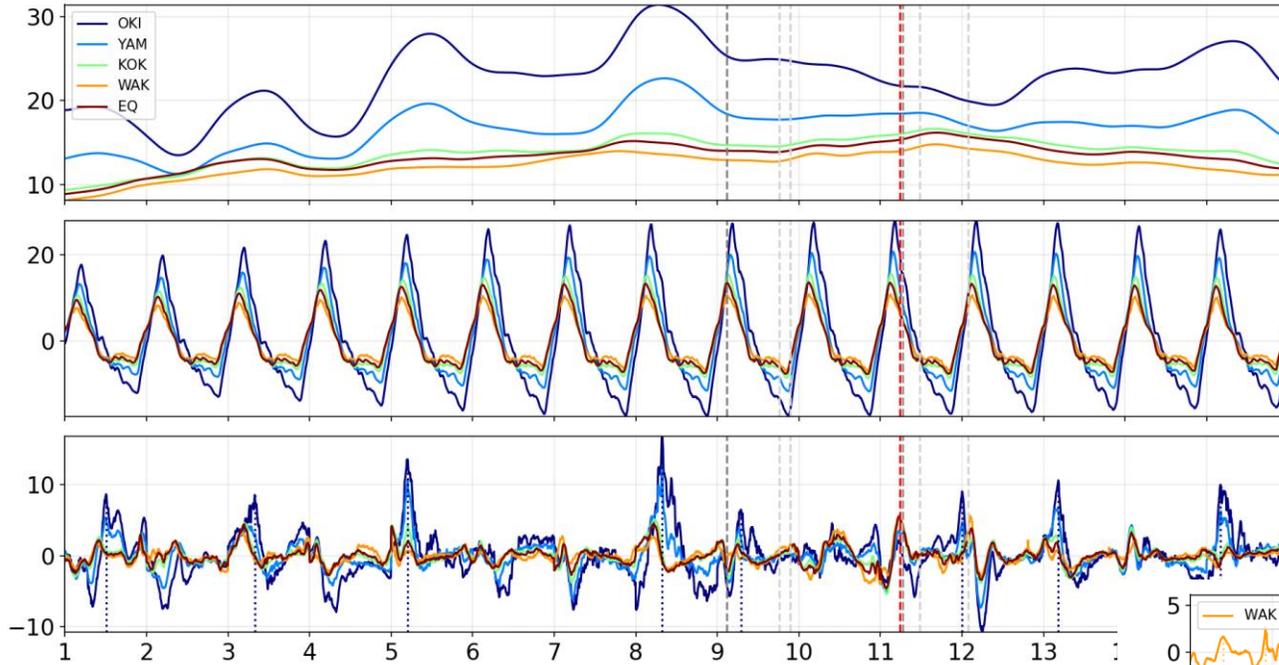
STL включает несколько этапов фильтрации, с применением фильтра LOESS (locally estimated scatterplot smoothing) без учета весовых коэффициентов или LOWESS (locally weighted scatterplot smoothing) с учетом весовых коэффициентов.

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

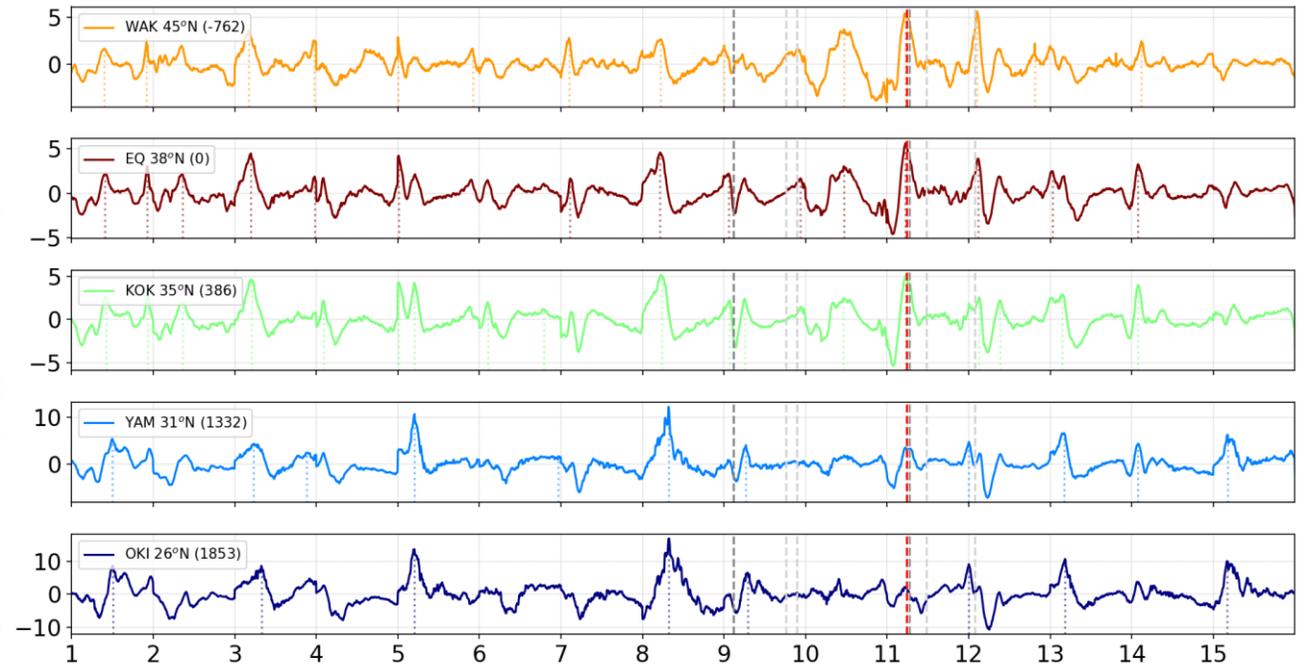
Анализ временных рядов локального ПЭС с использованием классического метода STL



Данные по ПЭС дискретизированы с шагом 5 минут (288 измерений в сутки) и 2.5x2.5 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

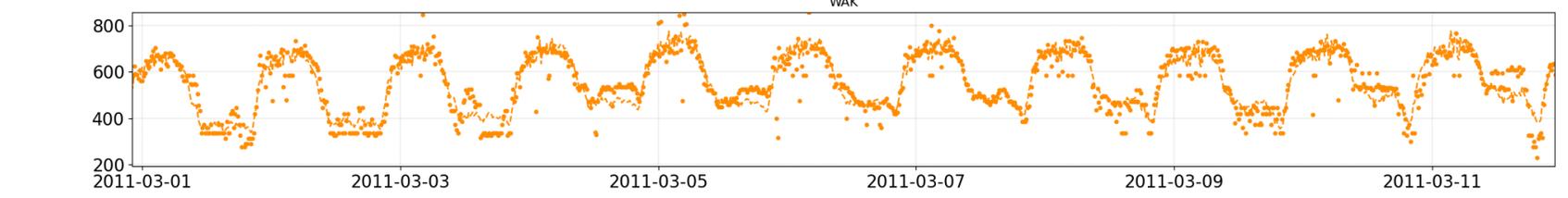
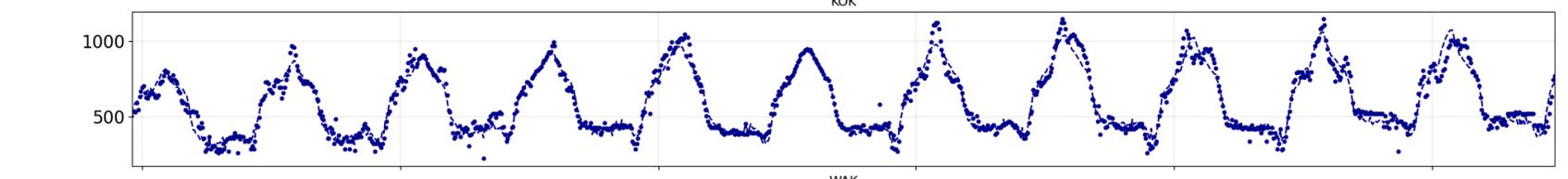
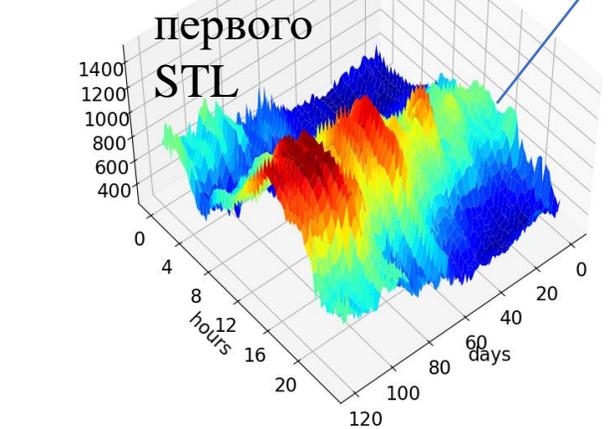
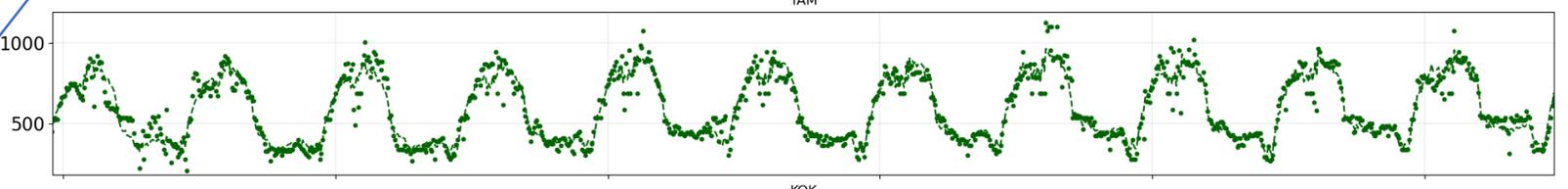
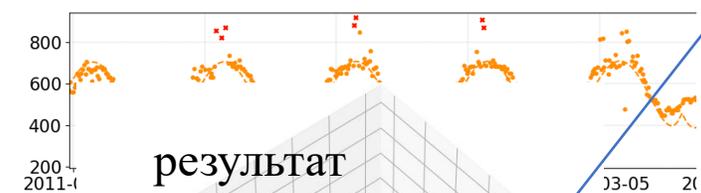
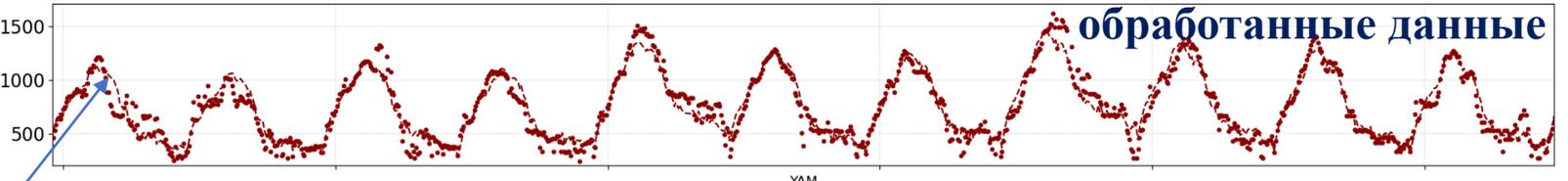
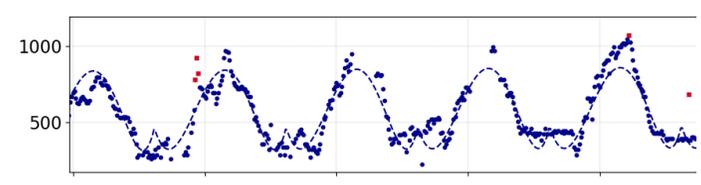
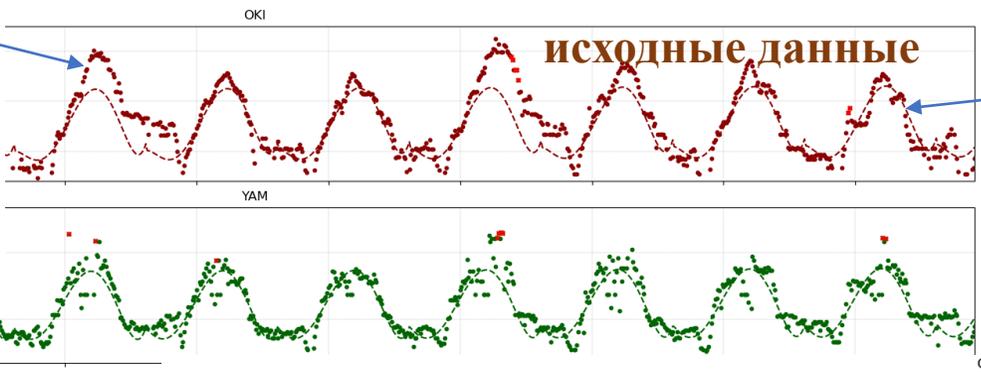
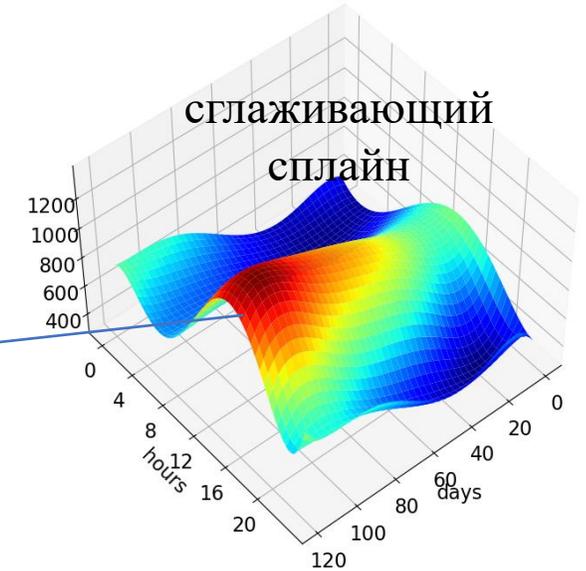
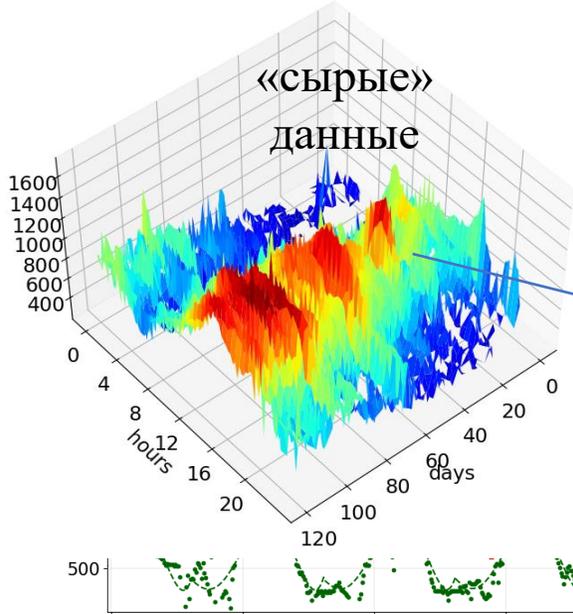
Измерения foF2 с разрешением 15 минут (96 измерений в сутки) содержат пропуски (длиной от минут до нескольких суток) и выбросы (одиночные и серии), потому классический STL дает искаженные результаты: часть периодической составляющей остается в ошибках.

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

Алгоритм

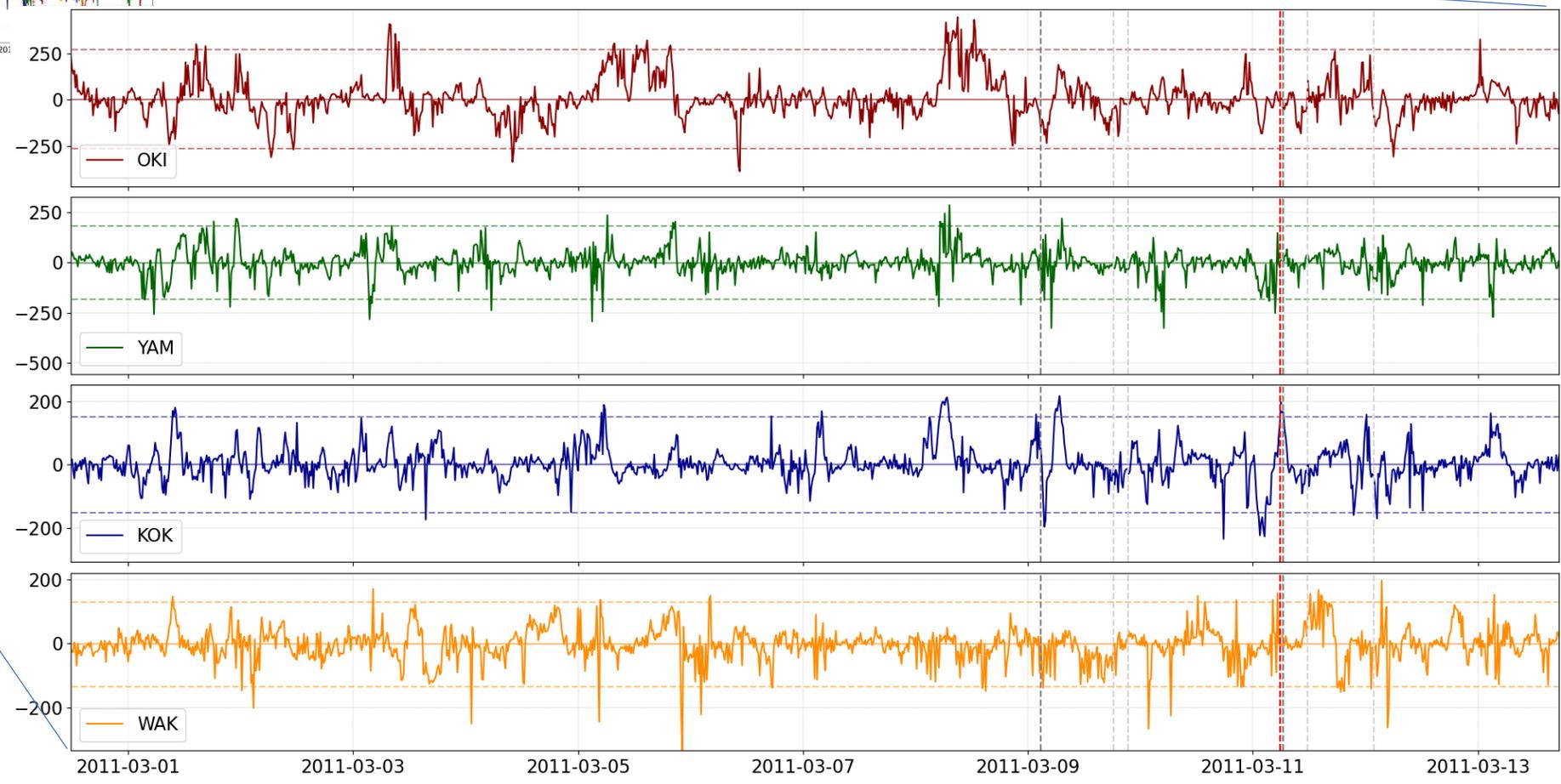
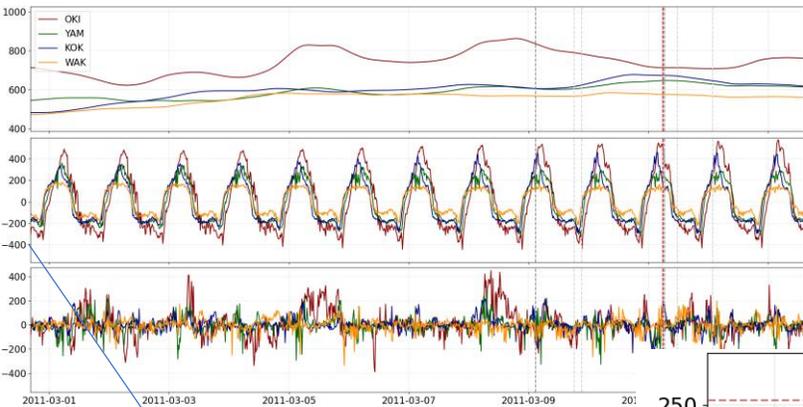
- Аппроксимация данных с использованием двумерного сглаживающего сплайна.
- Интерполяция пропусков в исходных данных полученным сплайном.
- Первый STL цикл.
- Использование полученного в первом STL-цикле разложения (тренд и сезонный компонент) в качестве более точной интерполяции исходных данных.
- Анализ 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

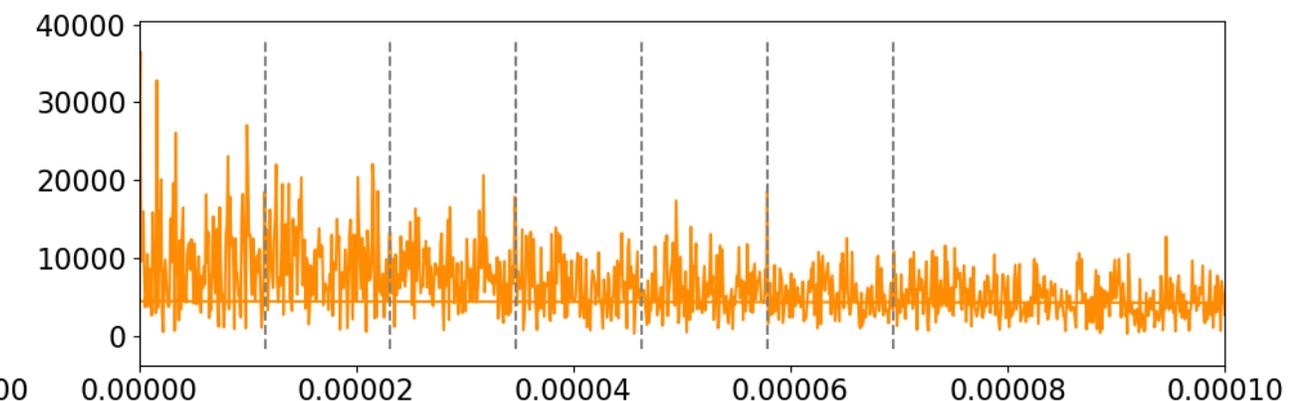
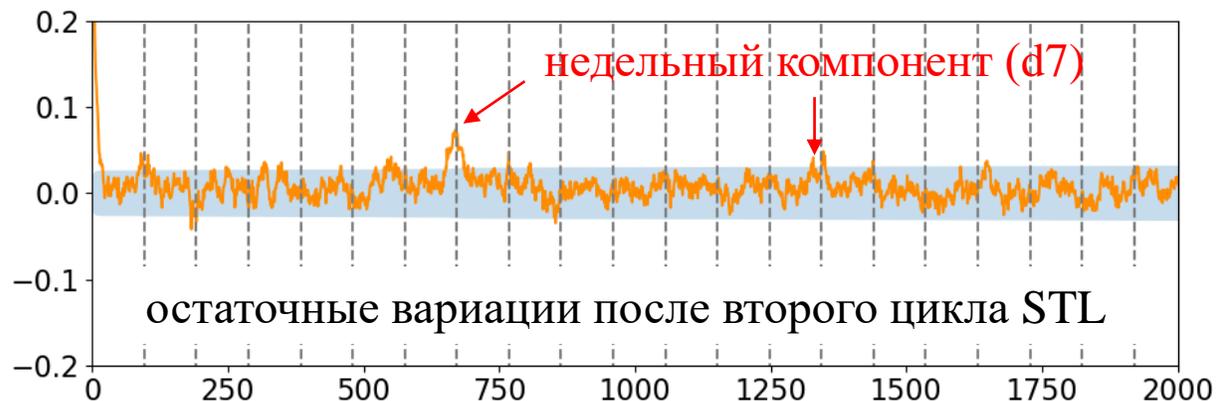
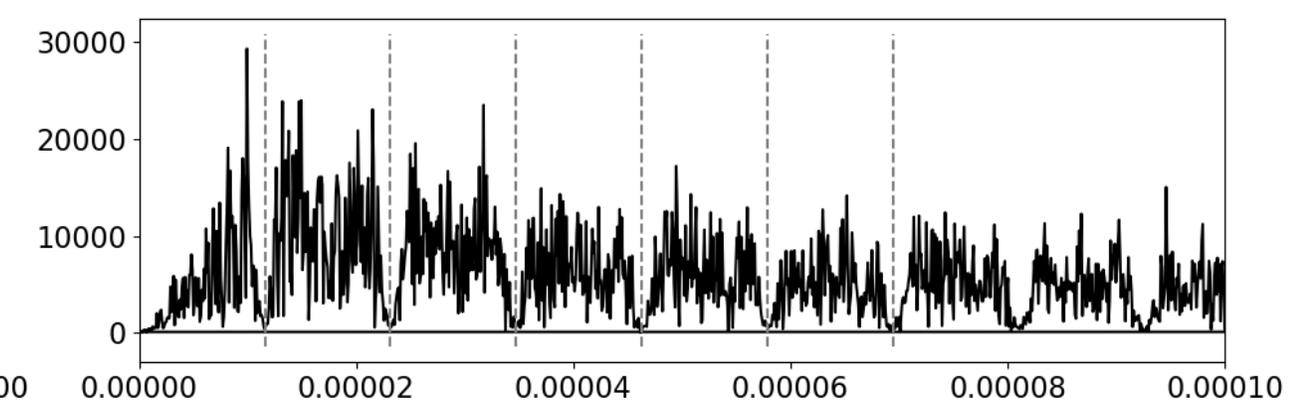
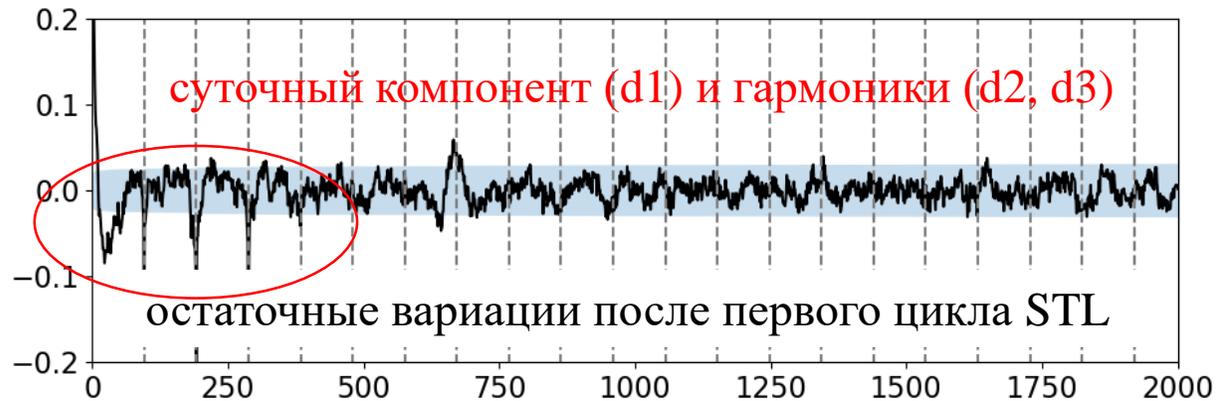
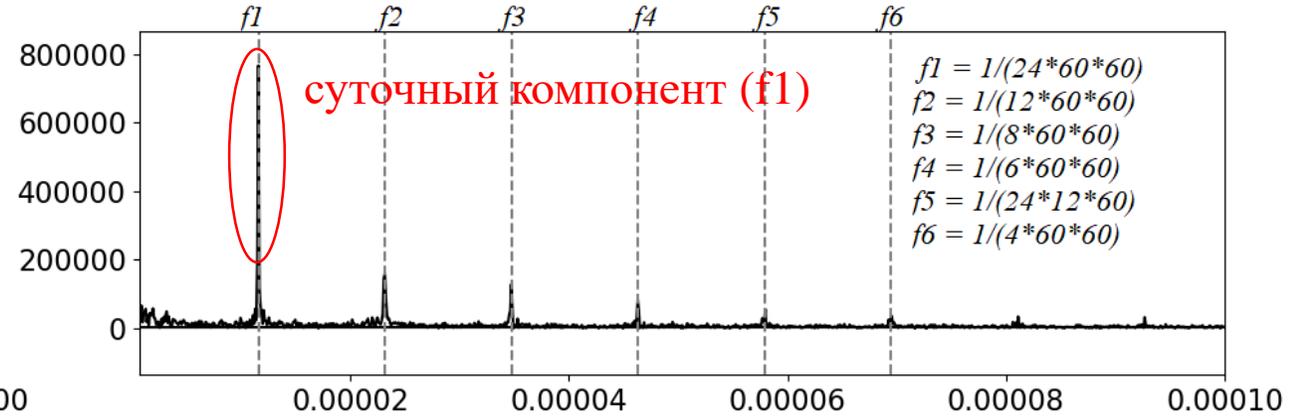
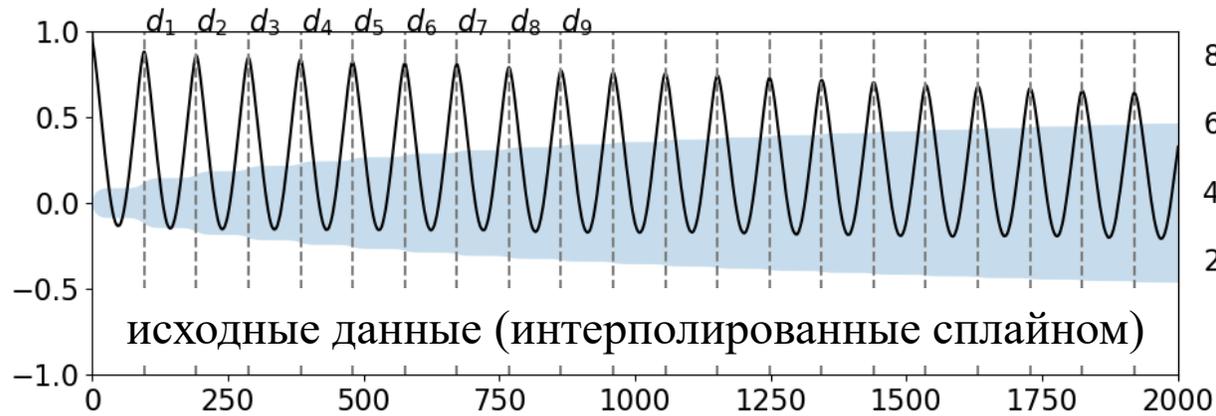


2011-03-01 2011-03-03 2011-03-05 2011-03-07 2011-03-09 2011-03-11

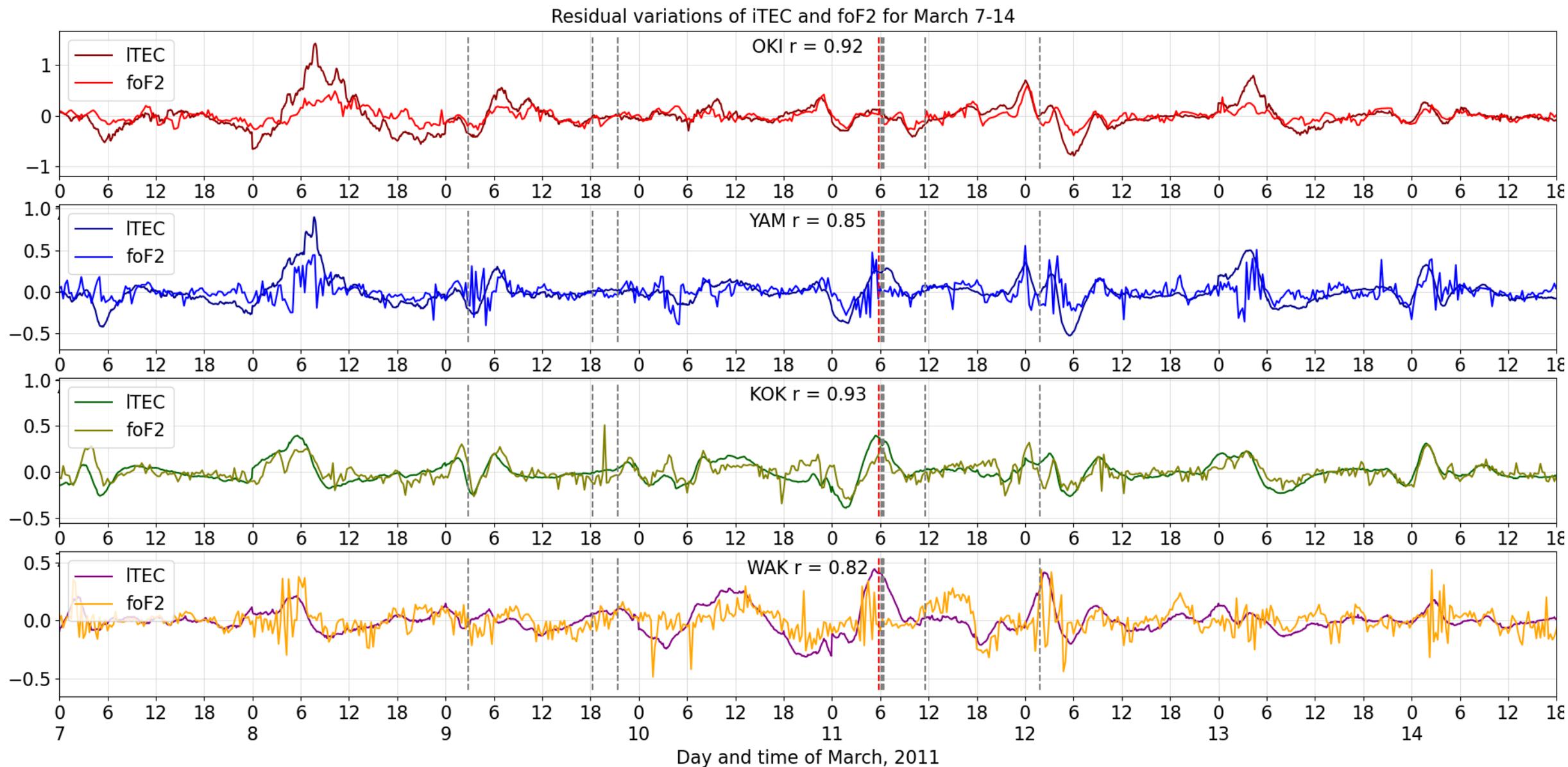
Результат второго цикла STL для четырех наземных станций



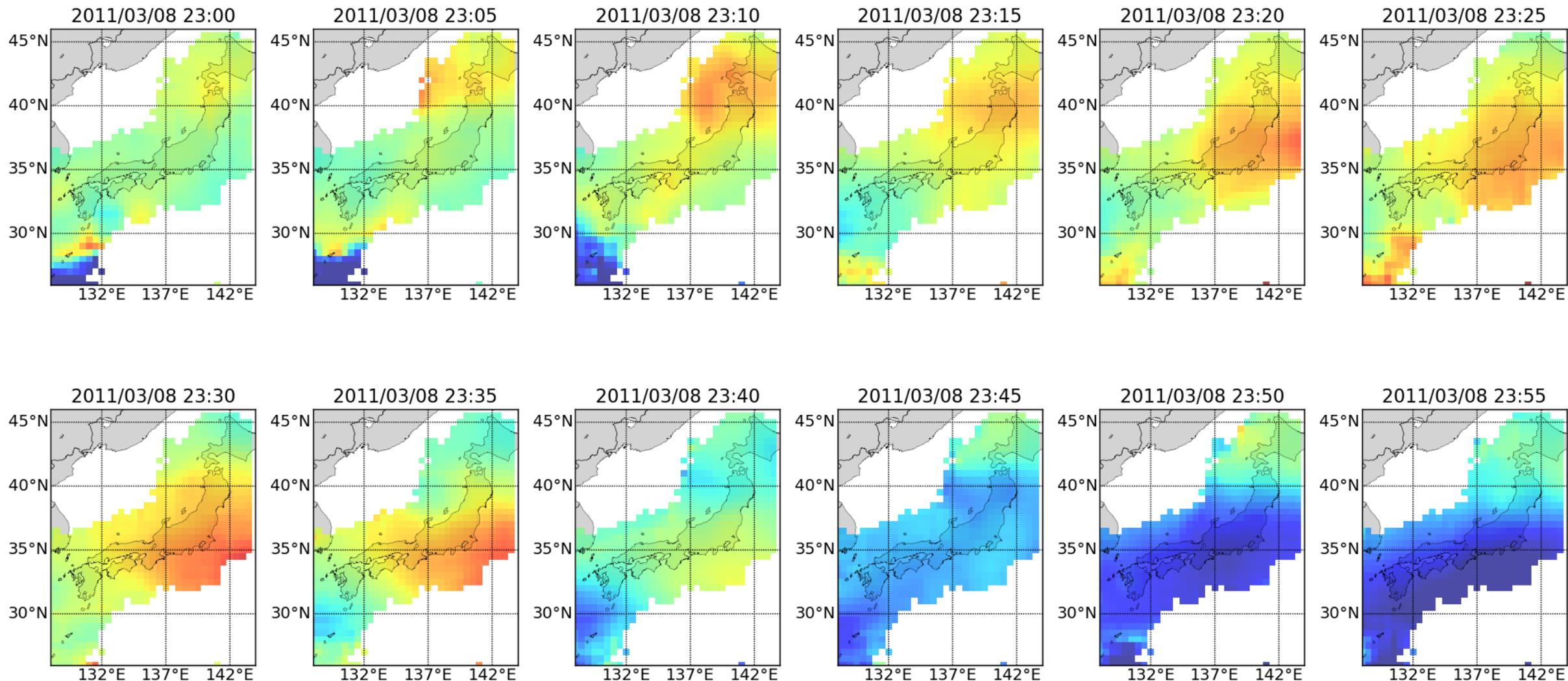
Сравнение результатов первого и второго цикла STL



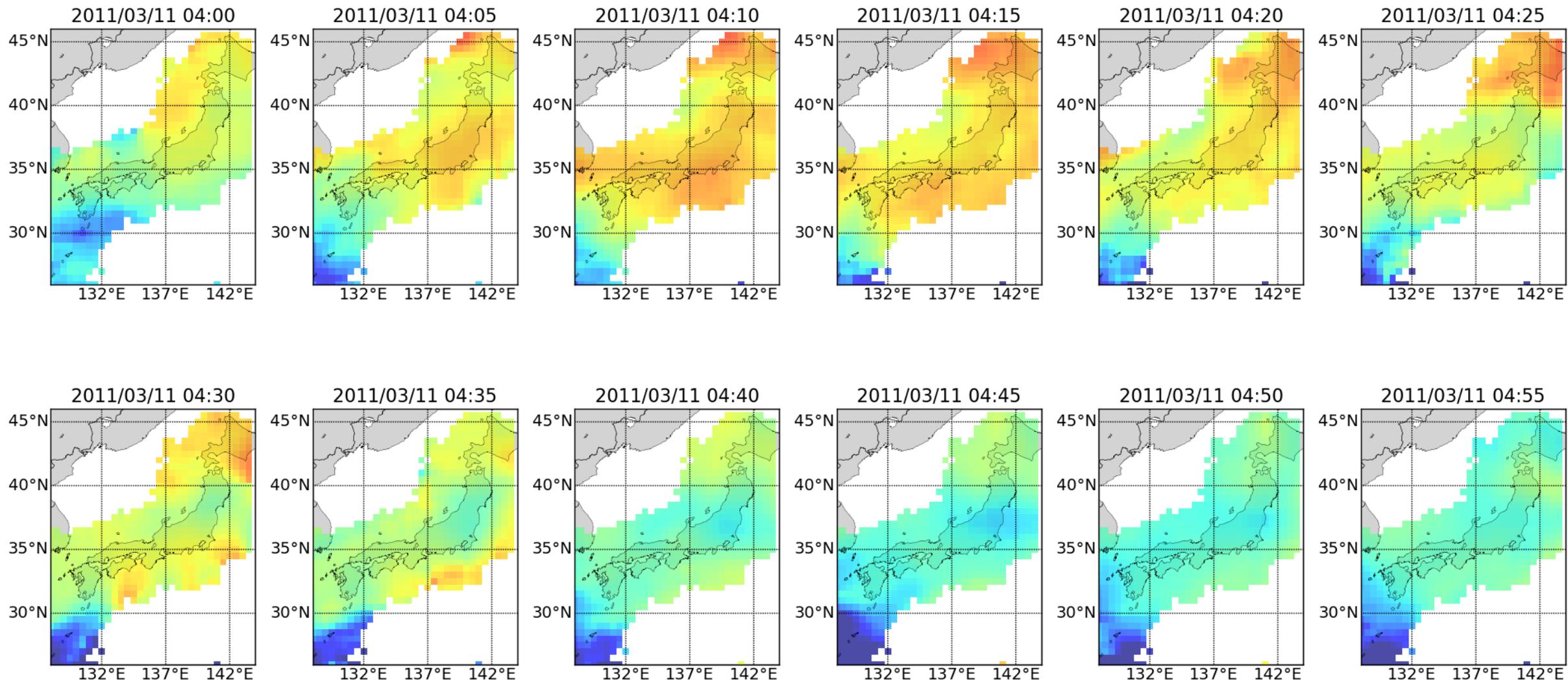
Сопоставление аномальных вариаций локального ПЭС и foF2



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!