



Семинар кафедры физики атмосферы физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова
Москва, 07 июня 2022 г.



Глобальные навигационные спутниковые системы как средство мониторинга ионосферных неоднородностей

Юрий Ясюкевич, в.н.с., к.ф.-м.н.

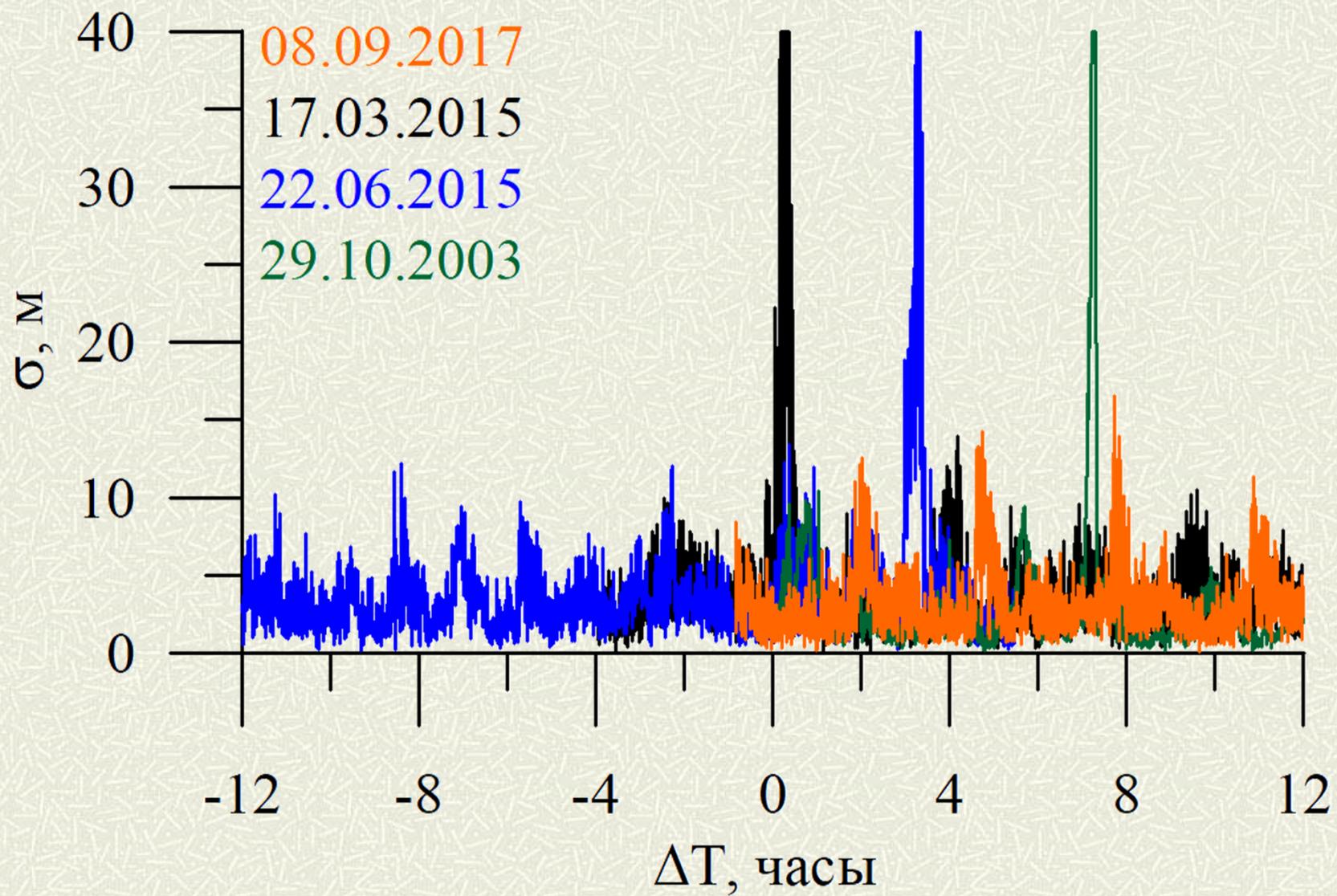
А. Киселев, А. Веснин, И. Едемский, Д. Сидоров, А. Падохин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
Физический факультет МГУ, Москва*

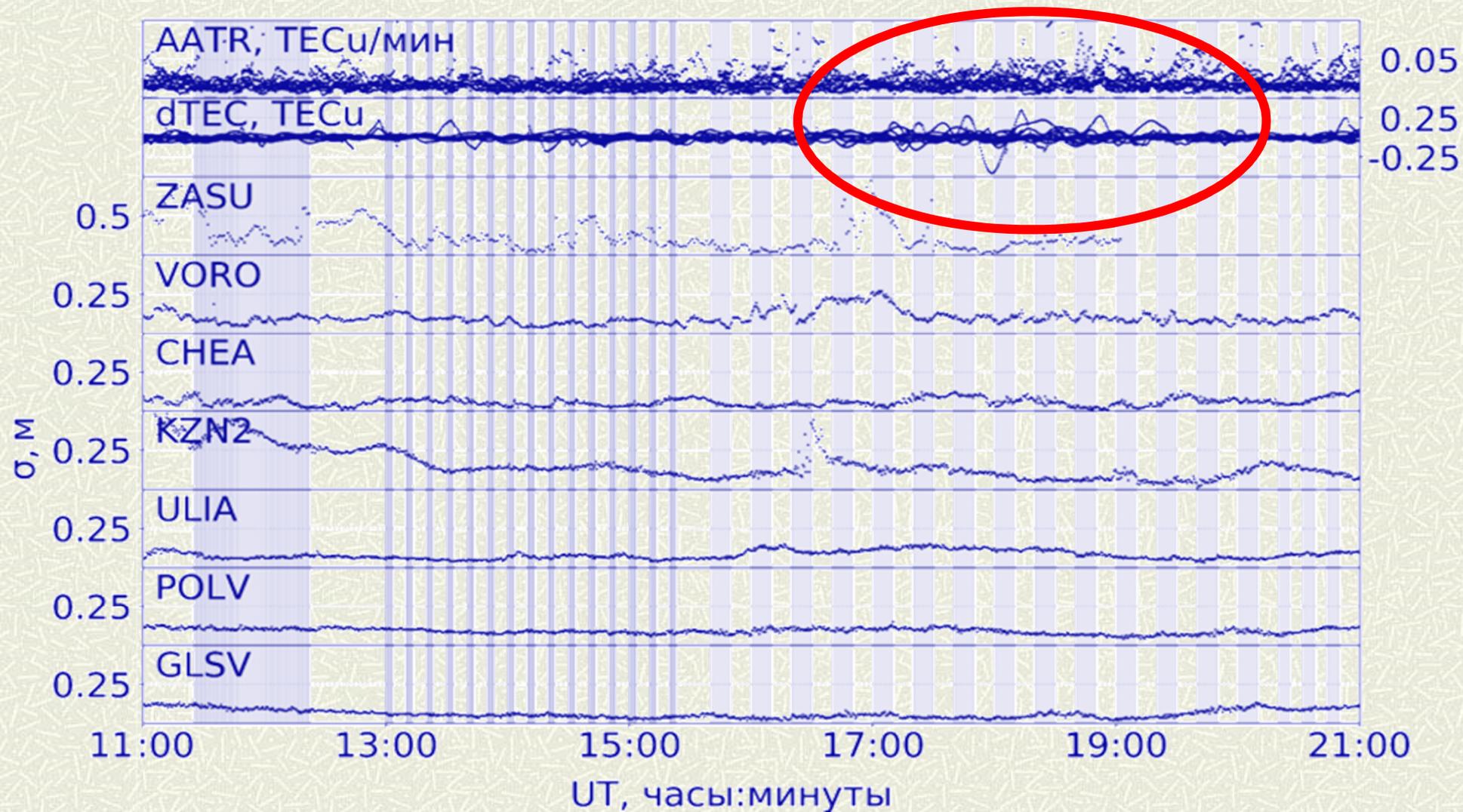
Продукты ГНСС

- Точность позиционирования
- Вариации ПЭС
- Индексы возмущенности на основе ПЭС
- Абсолютное полное электронное содержание

Ошибка позиционирования во время магнитных бурь

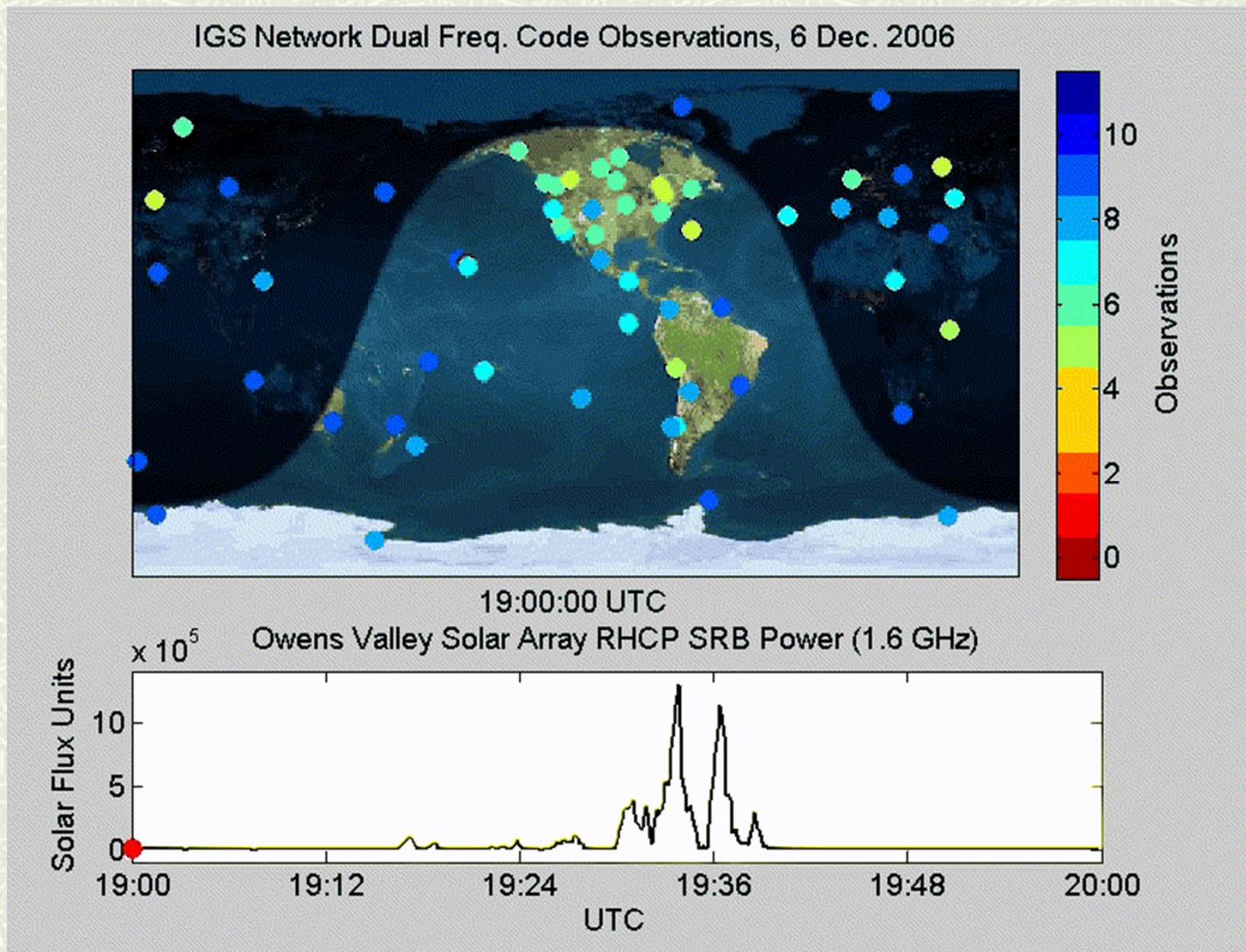


Ошибки РРР, 23 августа 2010 г.

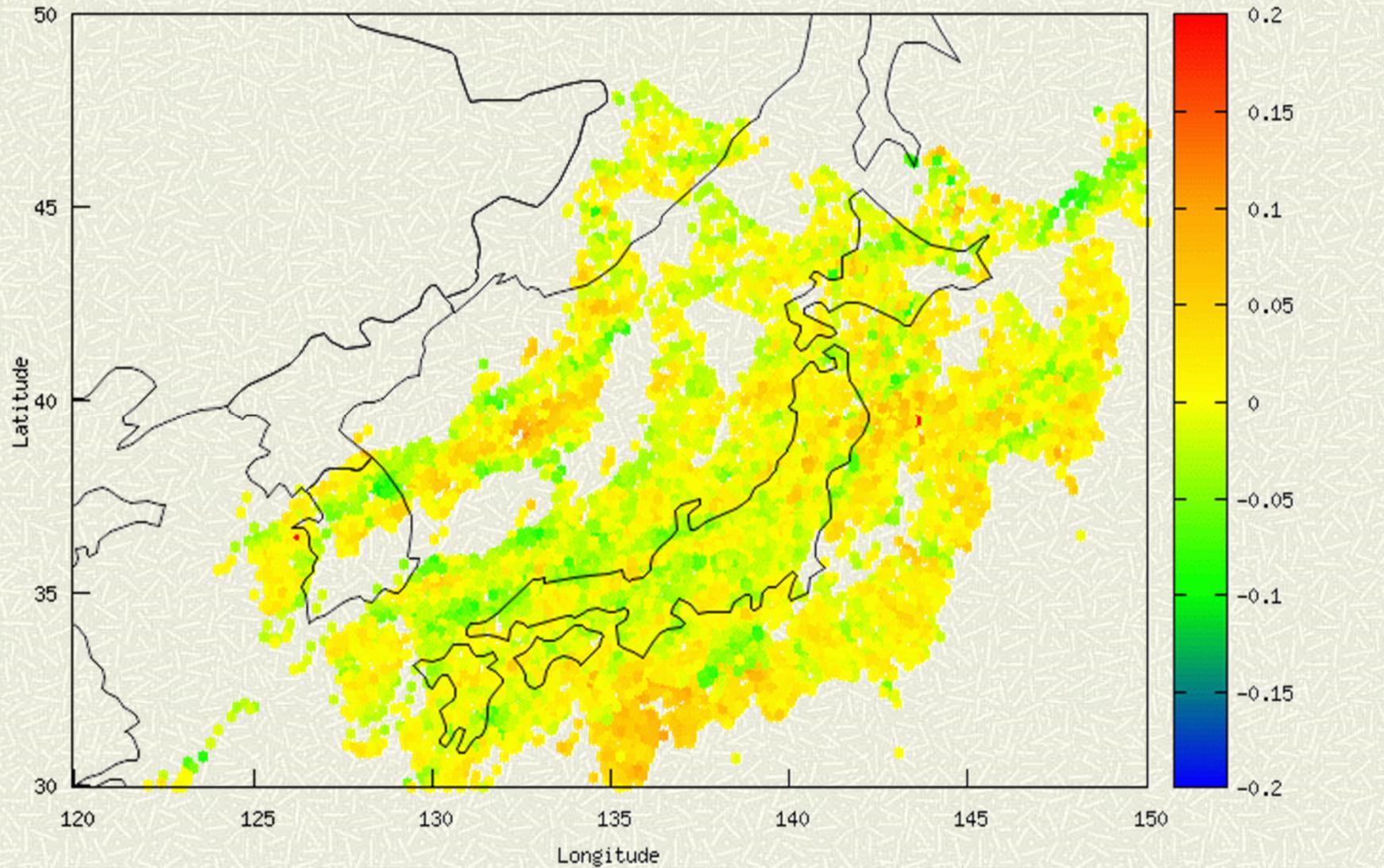


Сбои во время солнечных вспышек

6 декабря 2006 г.



Мегаземлетрясение Тохоку 11 марта 2011 г. в Японии ($M_w=9$)



Ионосфера

ПЭС (TEC) – Полное электронное содержание (total electron content)

$$I = \int_0^D Ne(r) dr - \text{“наклонное” ПЭС}$$

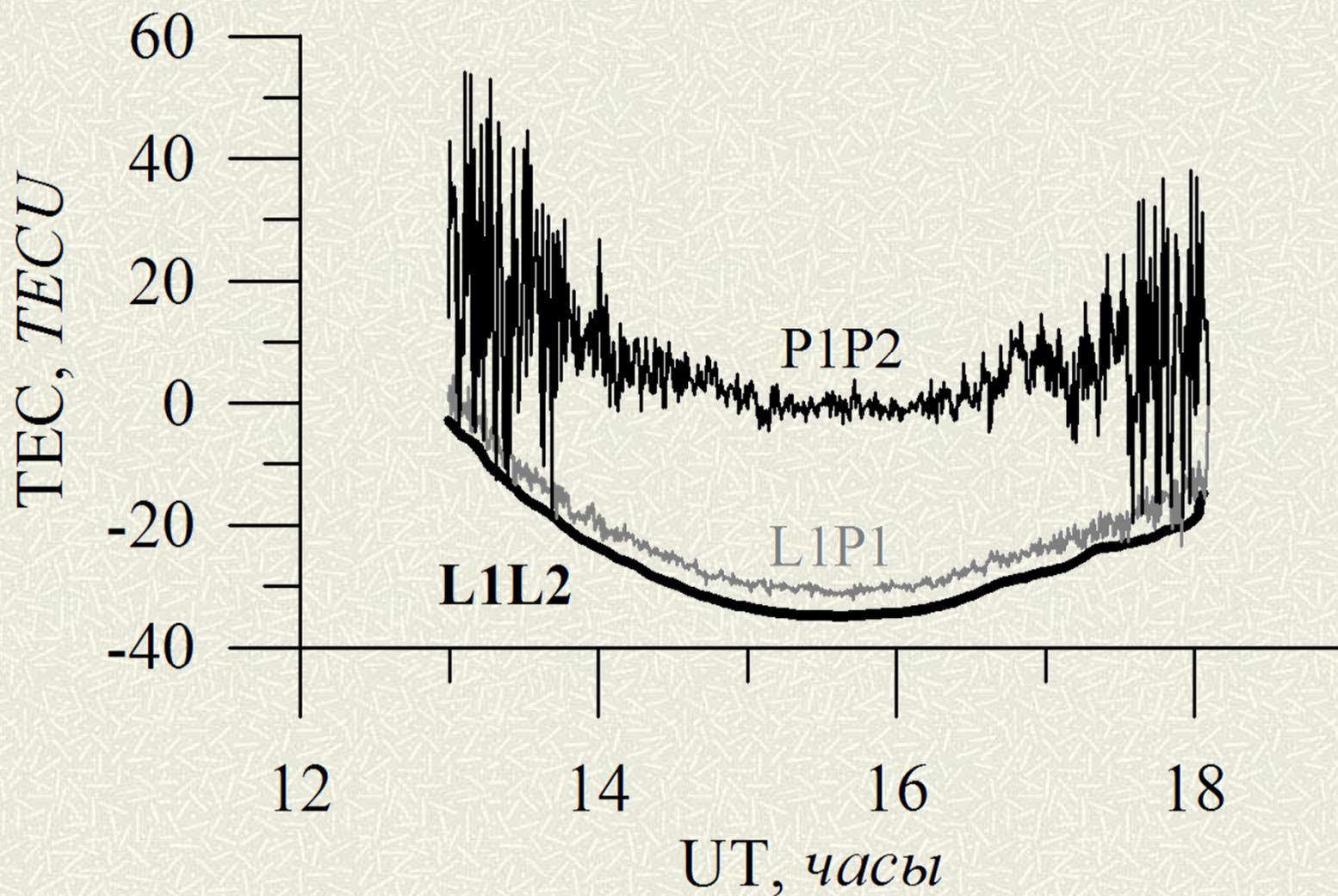


Полное электронное содержание в ГНСС

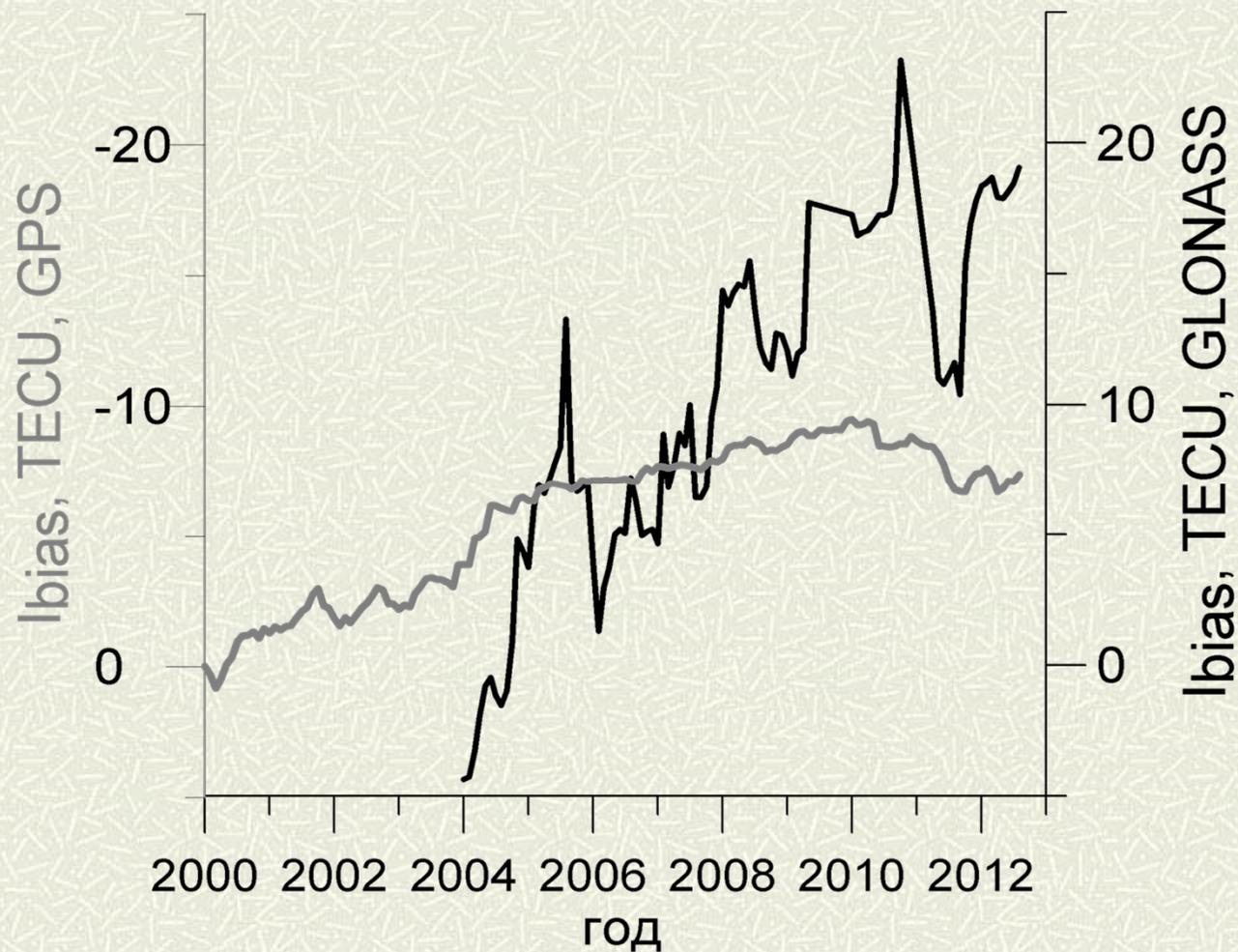
$$I = \int_D N(s) ds =$$
$$= \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + const + \sigma \varphi]$$

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [P_2 - P_1 + cT_{BIAS} + \sigma P]$$

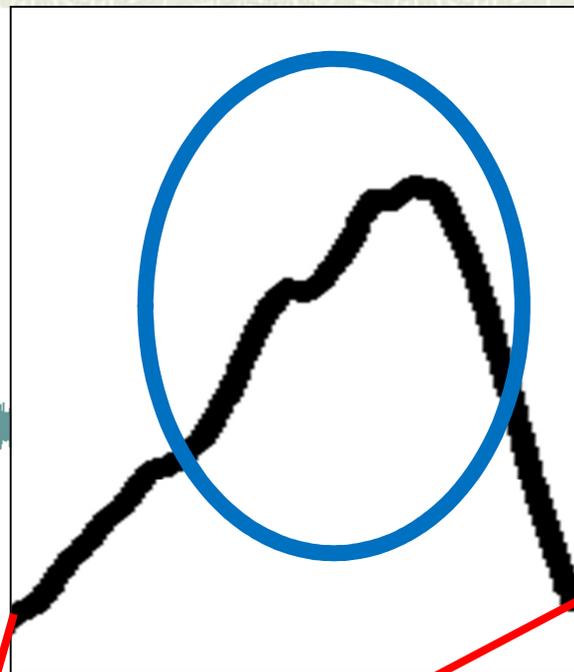
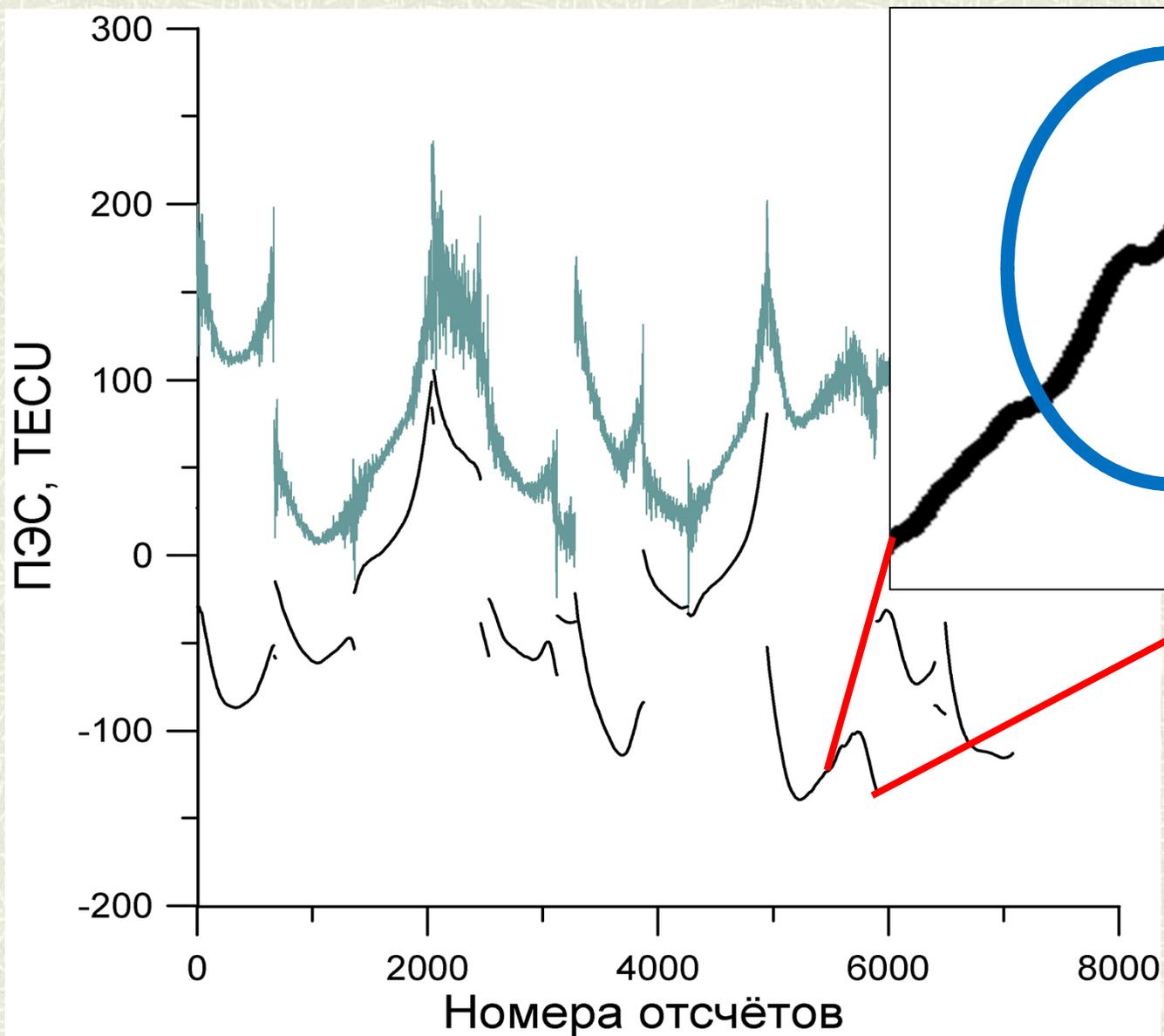
Полное электронное содержание в ГНСС



ДКЗ в частотных каналах навигационных спутников



Полное электронное содержание в ГНСС

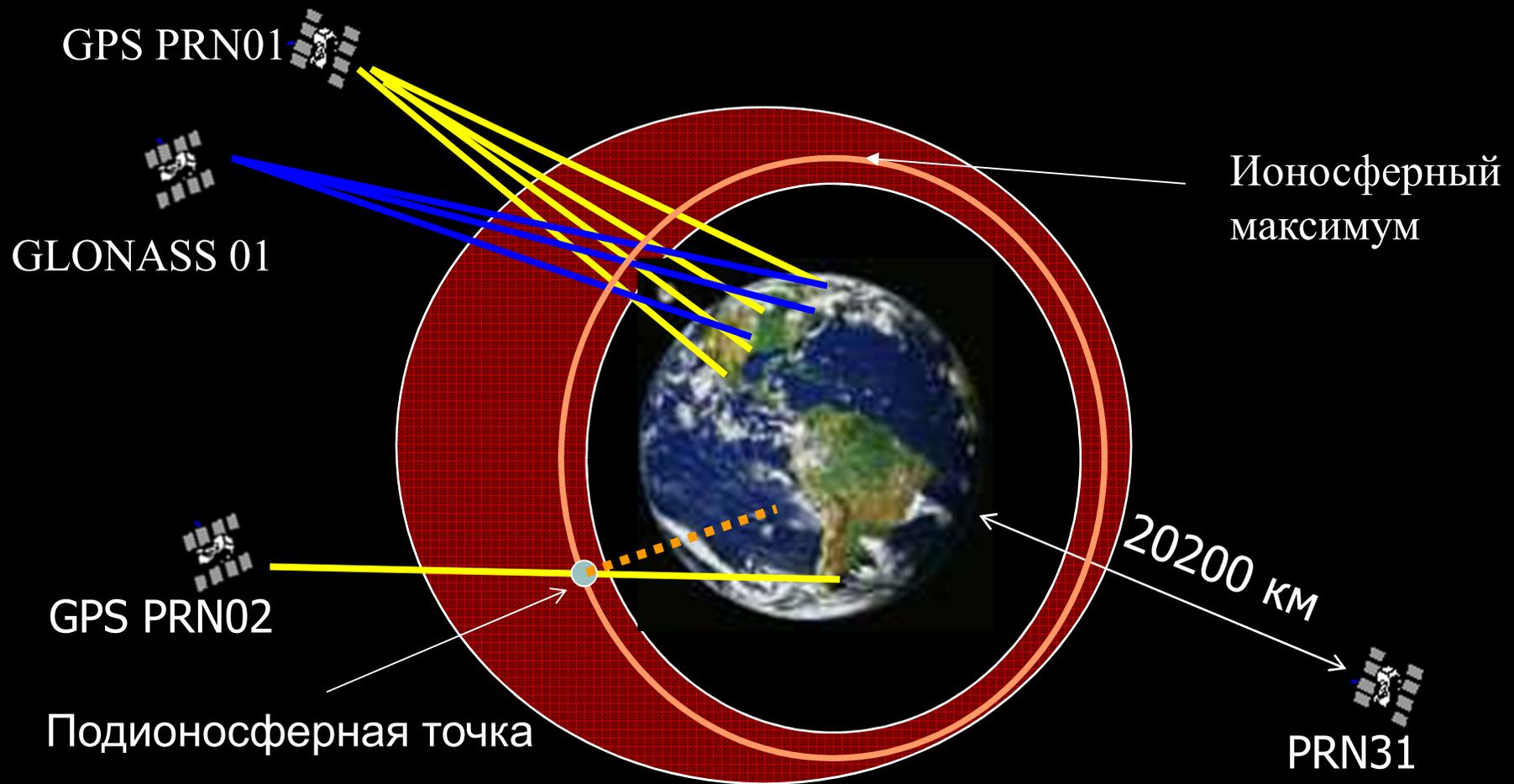


Волны

ГНСС-зондирование

$f_1=1575.42$ МГц
 $f_2=1227.60$ МГц
 $h=20\ 200$ км

$f_1=1602.0+k\ 0.5625$ МГц
 $f_2=1246.60+k\ 0.4375$ МГц
 $h=19\ 100$ км



Развитие ГНСС

1) Прогресс космического сегмента:

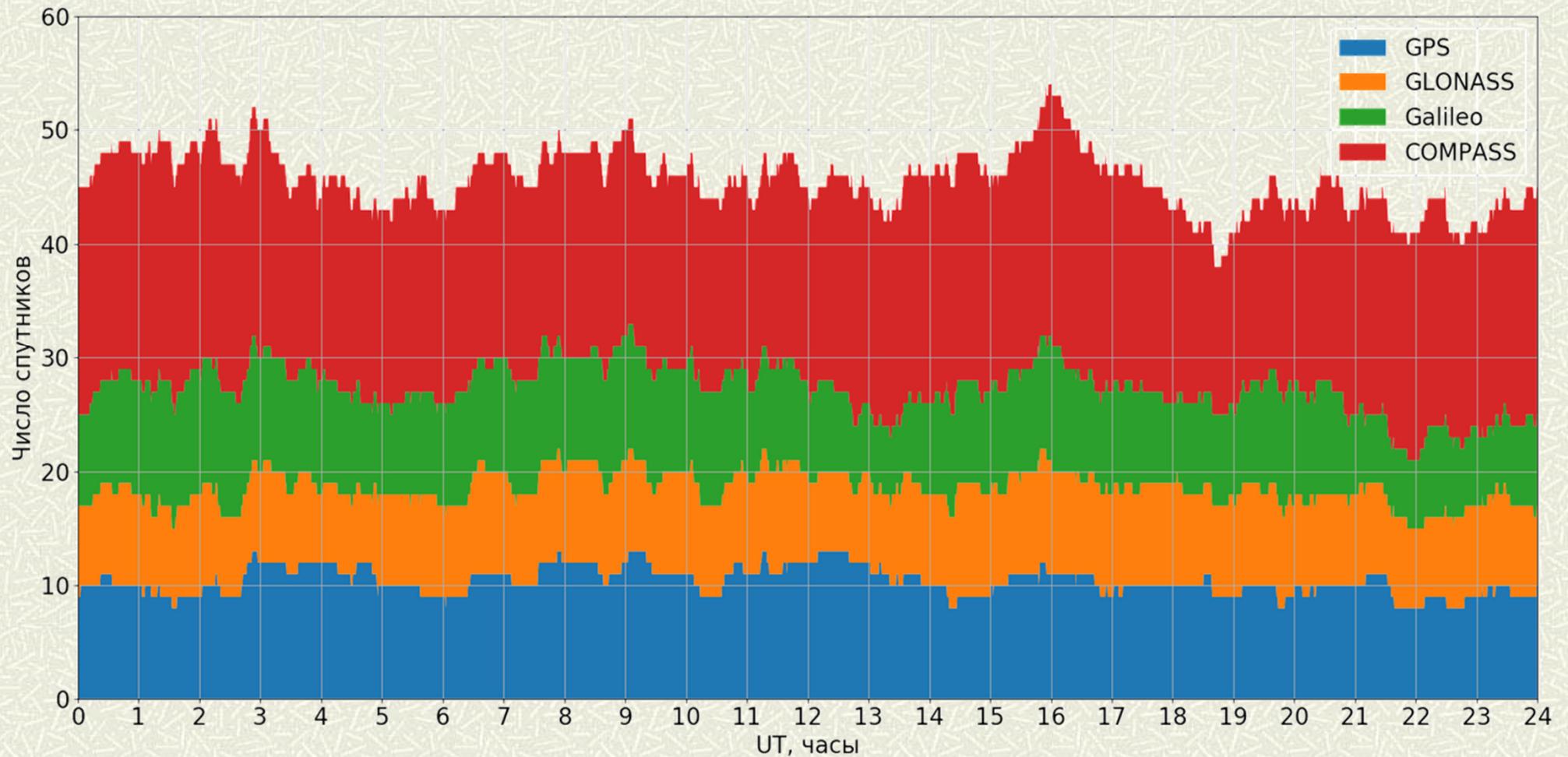
- Появление новых навигационных систем
- Рост спутниковой группировки
- Внедрение новых сигналов

2) Прогресс сегмента потребителей:

- Рост числа станций
- Новые приемники

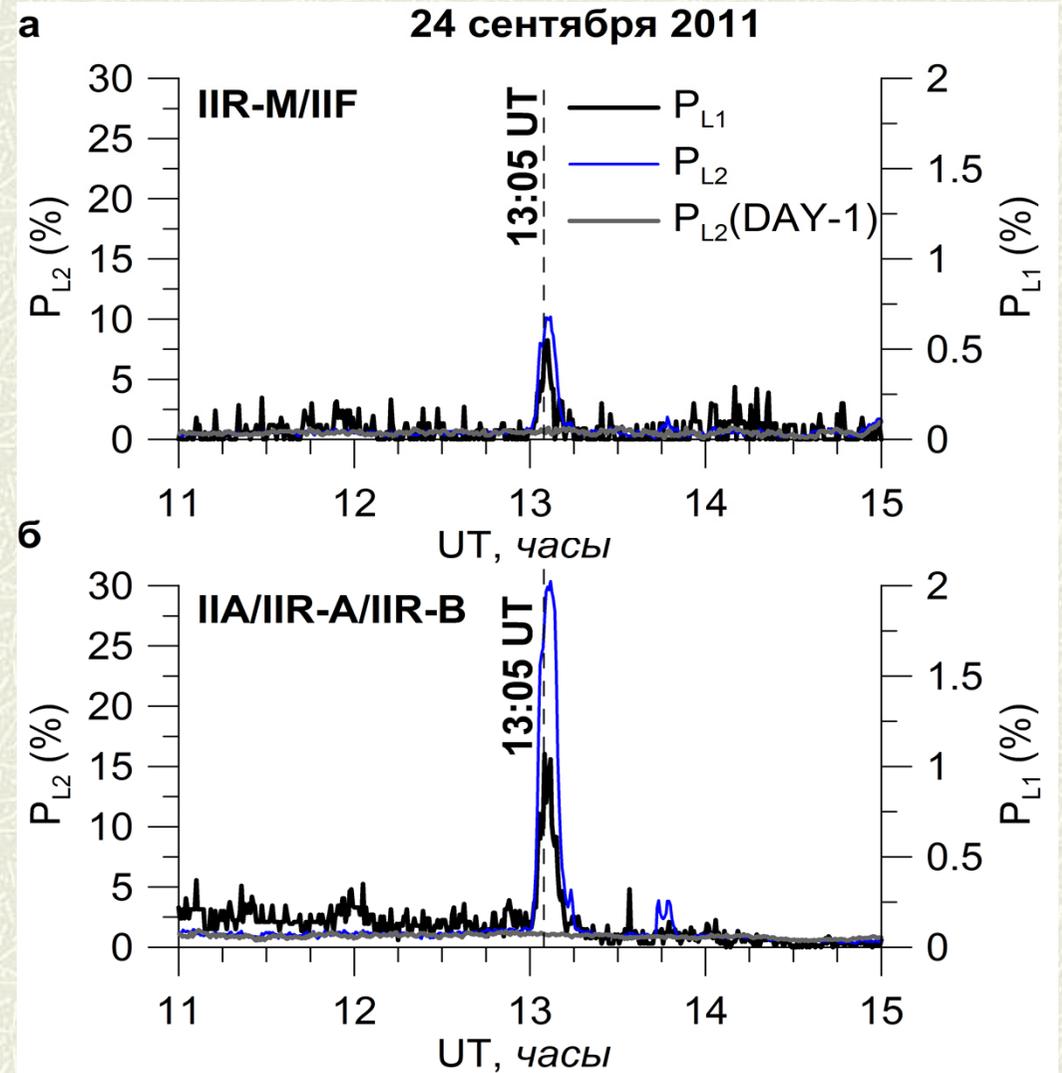
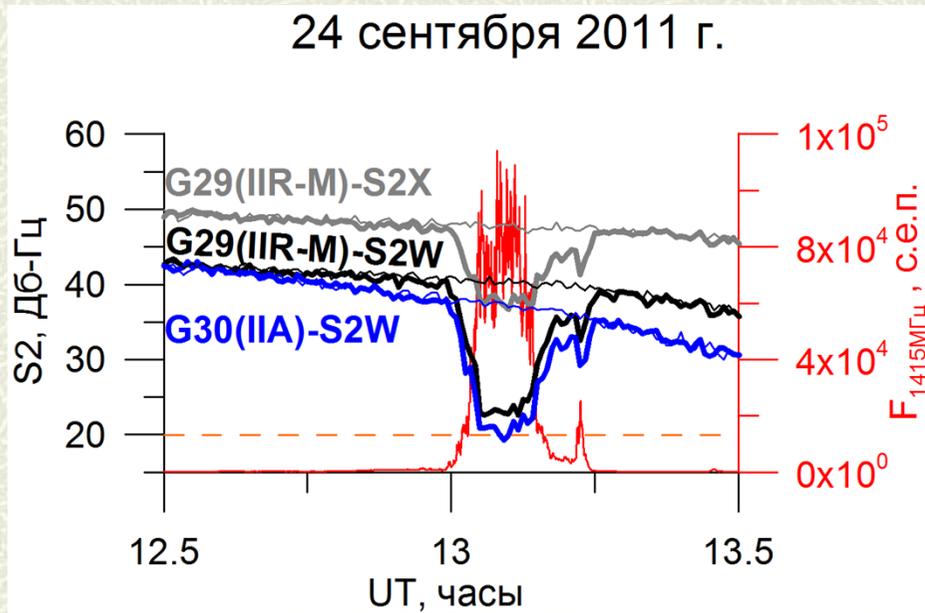
3) Новые методы обработки данных

Количество наблюдаемых спутников

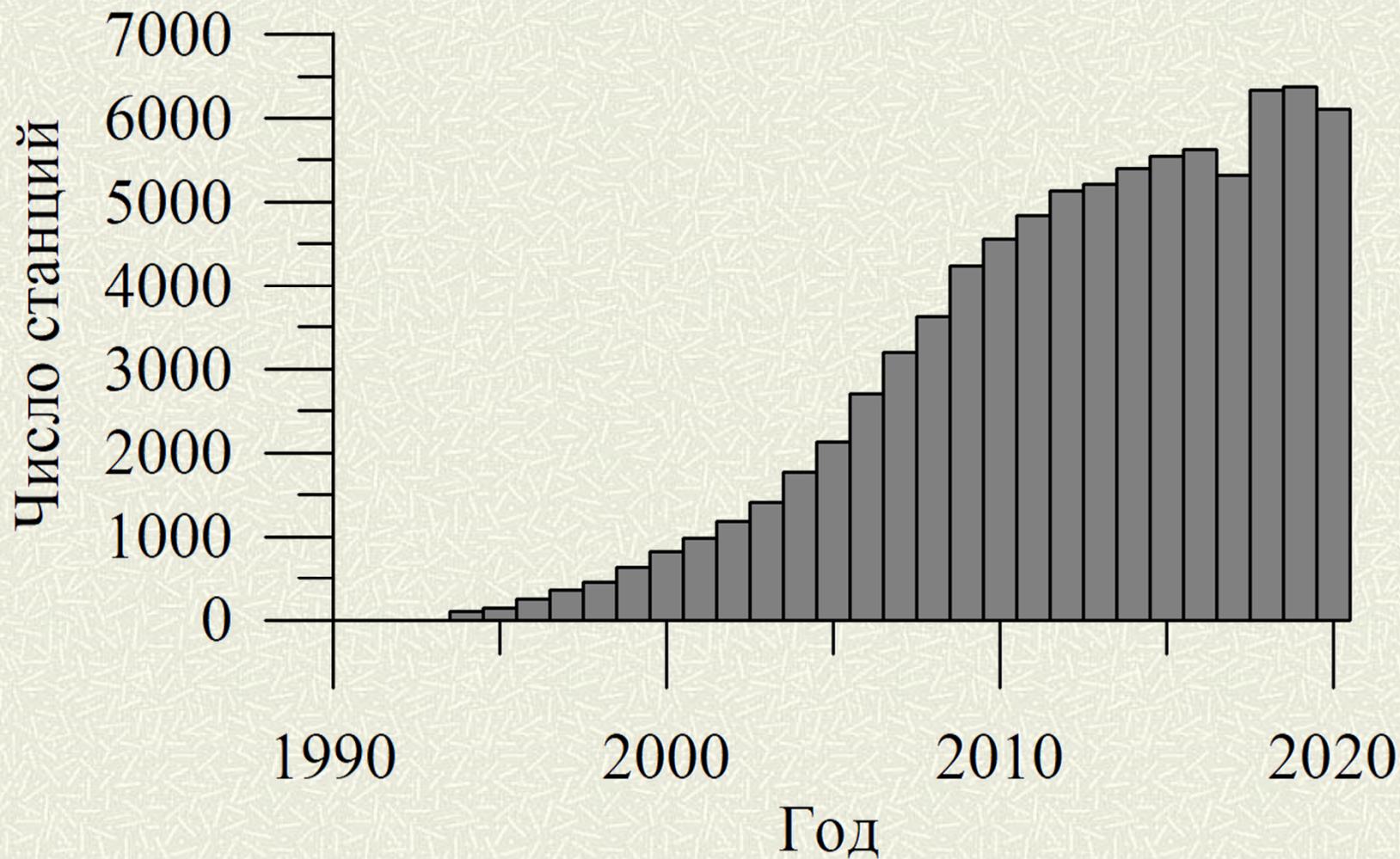


**10.05.2022*

Солнечная вспышка 24.09.2011

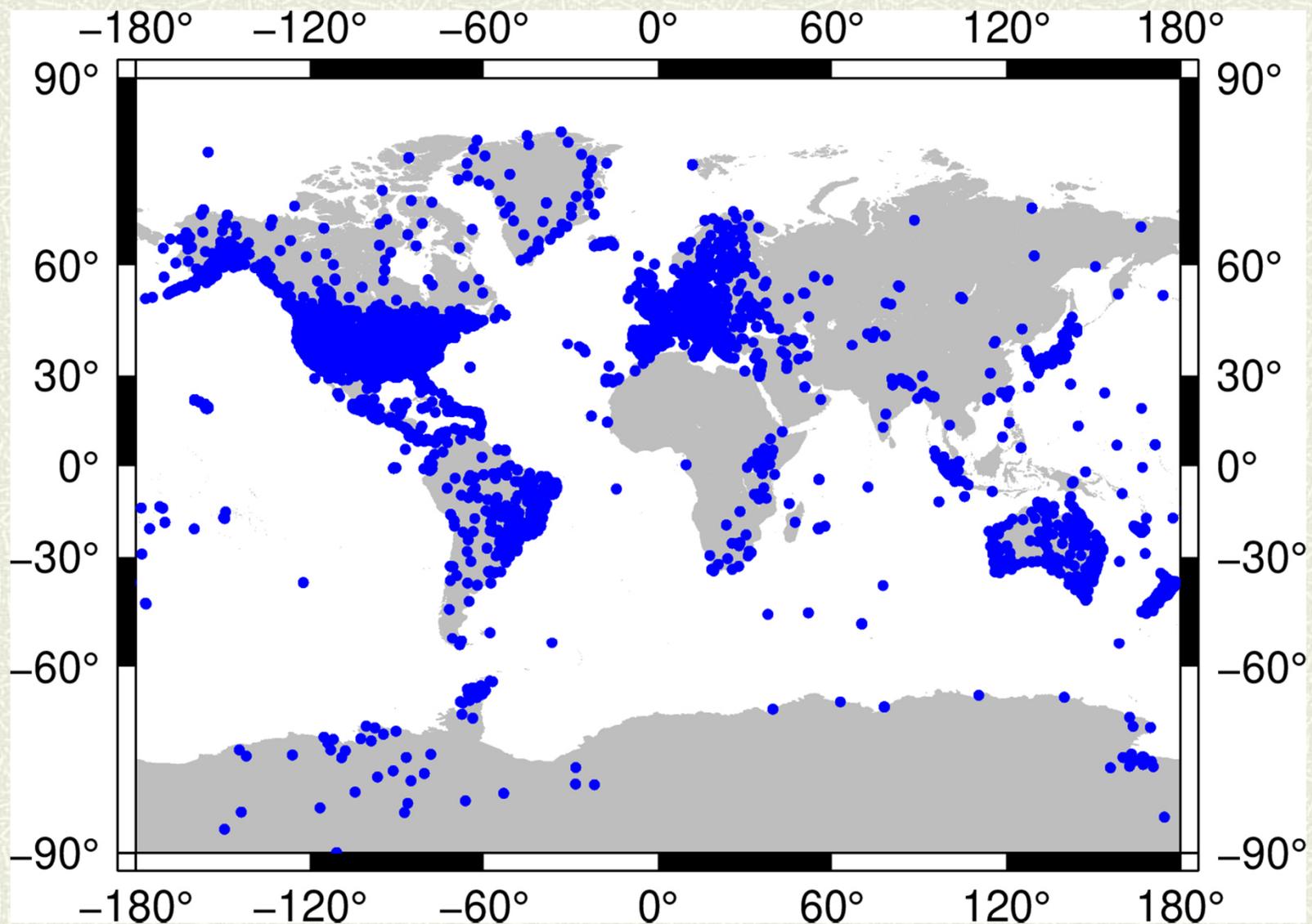


Изменение числа станций ГНСС



С 2000 г. по 2012 г. число станций росло практически линейно.

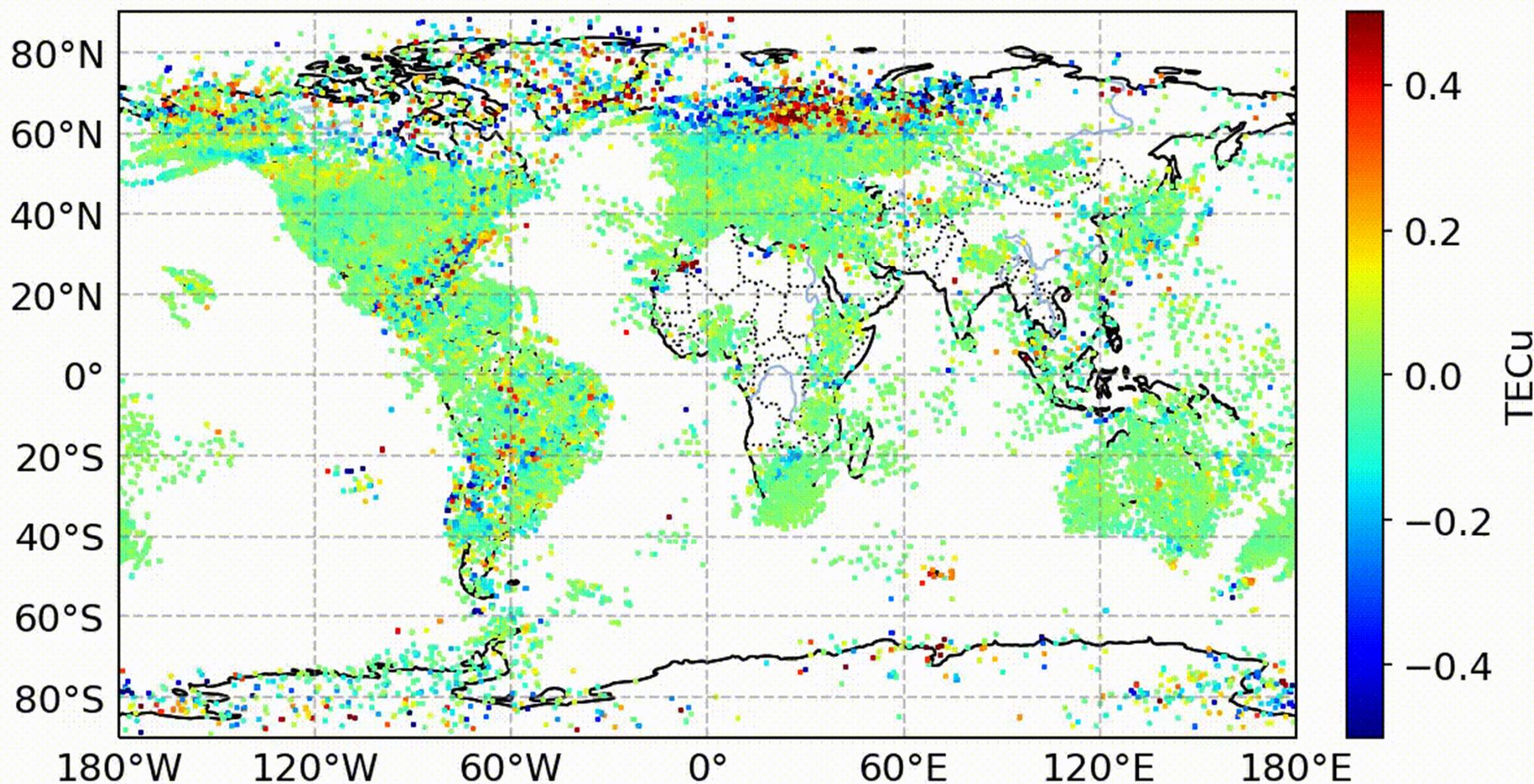
Распределение числа станций



Глобальная картина возмущений ПЭС во время магнитной бури 22 июня 2015 г.

2015-06-22T17:00:00Z (DOY 173)
10-20 minute TEC variations

Created by SIMuRG



<https://simurg.iszf.irk.ru/> or <https://simurg.space/>

SIMuRG Home Sites Data Queries Events GEC Documentation

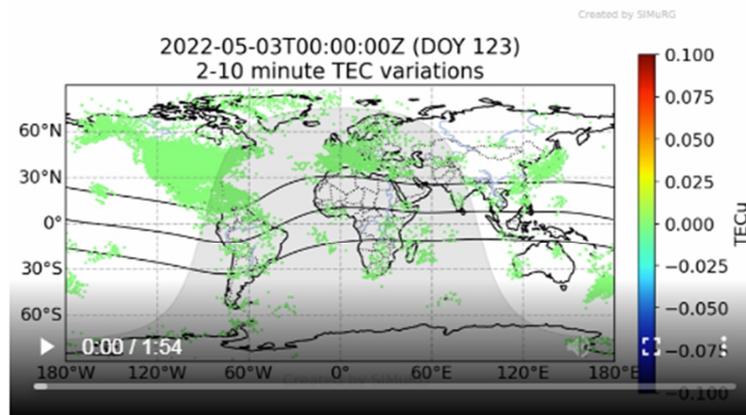


SIMuRG: System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS.

SIMuRG is the tool for collecting, processing, storage and presentation of GNSS total electron content data. The data product are TEC variations series, corrected TEC, TEC variations maps, Wtec and Iv indices, ionospheric disturbances parameters

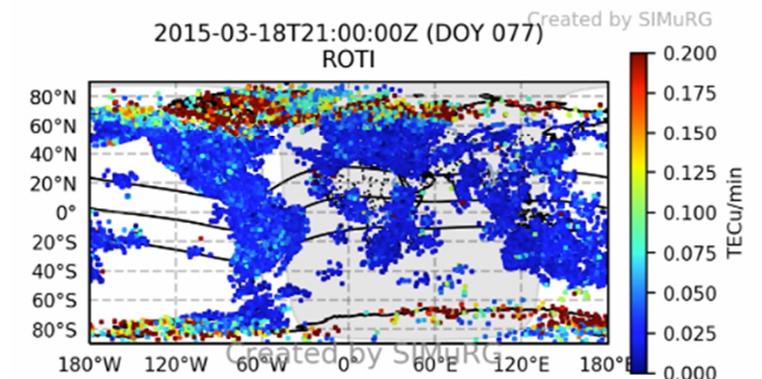
Developed under Russian Science Foundation support(project № 17-77-20005)

Latest maps



Interesting event

Storm. Characteristics: Ap index - 47, maximum Kp - 6, start - 2015-03-18 00:00, end - 2015-03-18 23:59



Работа системы – обработка ГНСС данных в формате Rinex

- Сбор данных (nav и obs файлы).
- Расчет ПЭС по фазовым и групповым измерениям.
- Расчет углов места и азимутов.
- Фильтрация вариаций.
- Сохранение в базе данных.
- Карты ПЭС.
- * Предварительный анализ.

Продукты SIMuRG

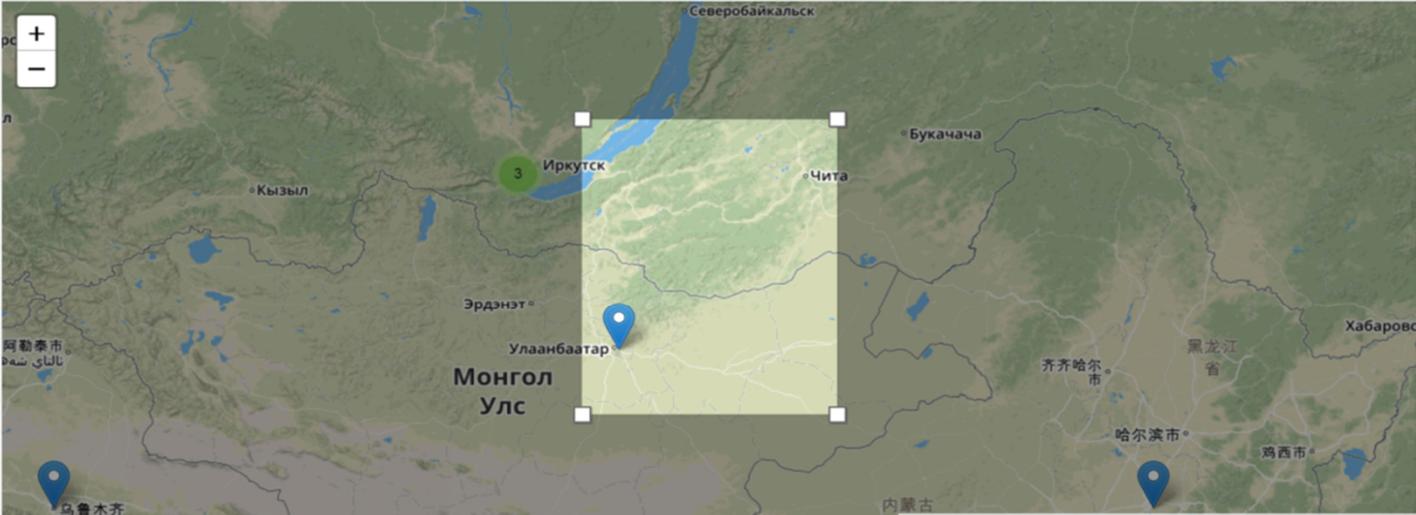
- 1) Глобальные/региональные карты
- 2) Данные с отдельной станции
- 3) Вторичная обработка

- 1) Вариации ПЭС в диапазонах 2-10 мин, 10-20 мин, 20-60 мин
- 2) ROTI/AATR
- 3) TEC adjusted

Graphical interface vs API

SIMuRG Home FTPs Receivers Queries ↗

TEC variations maps



e-mail

Start date and time: 27.07.2018 00:00

End date and time: 27.07.2018 23:59

Additional settings

Vmin: -0,5

Vmax: 0,5

Output data format: HDF5

Filtration range (periods): 2-20 min

Colormap: jet

Aspect: equal

Grid: subionospheric points

Create

SIMuRG group 2018

SIMuRG

E-mail

Email

Start date and time(UTC) 2019-06-23 00:00  End date and time(UTC) 2019-06-23 23:59 

Min. lat. -73.82 Max. lat. 73.63

Min. lon. -180.00 Max. lon. 180.00

Product type

2-10 minute TEC variations

Using SIMuRG database TEC only

Create maps images Create maps movies Solar terminator Magnetic equator

Data available:

Product type

2-10 minute TEC variations

2-10 minute TEC variations

10-20 minute TEC variations

20-60 minute TEC variations

ROTI

Adjusted TEC

Graphical interface vs API

API for SIMuRG use JSON-format both for queries/requests and its replies. API for SIMuRG is under development. Please, check method names by request:

▼ Details

```
import json
import requests
rq = requests.post("https://simurg.iszf.irk.ru/api",
                  json={"method": "get_list_of_methods", # This method
                        # provides you list of our methods
                        "args": {} # It doesn't need any arguments
                       }
                  )
methods = rq.json()
print(methods)
```

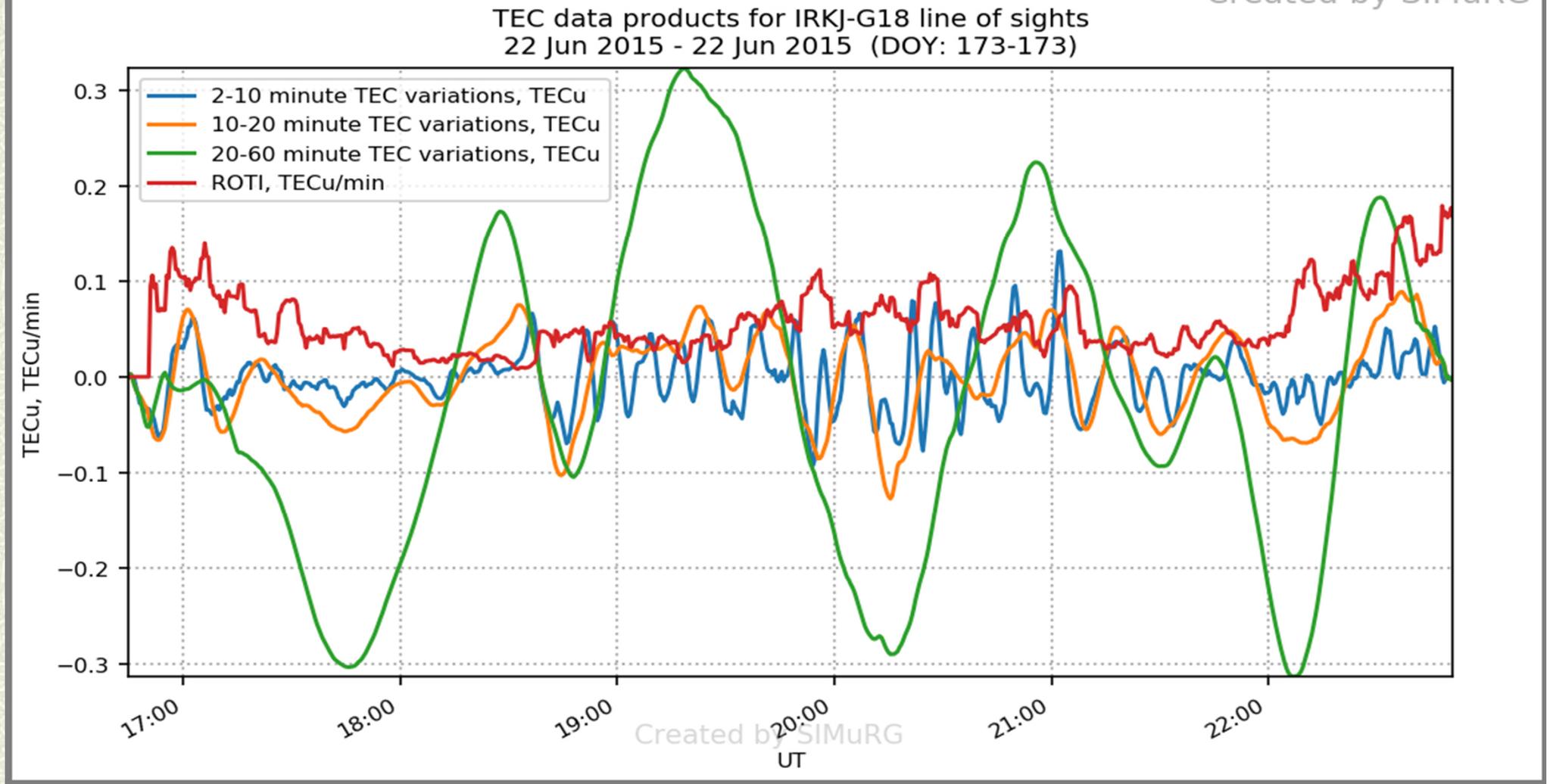
What kind of result you should get:

▼ Details

```
['', 'check', 'delete', 'create_map', 'create_series', 'get_site', 'get_data_count', 'get_list_of_methods', 'get_limbo', 'get_al
```

SIMuRG: data series

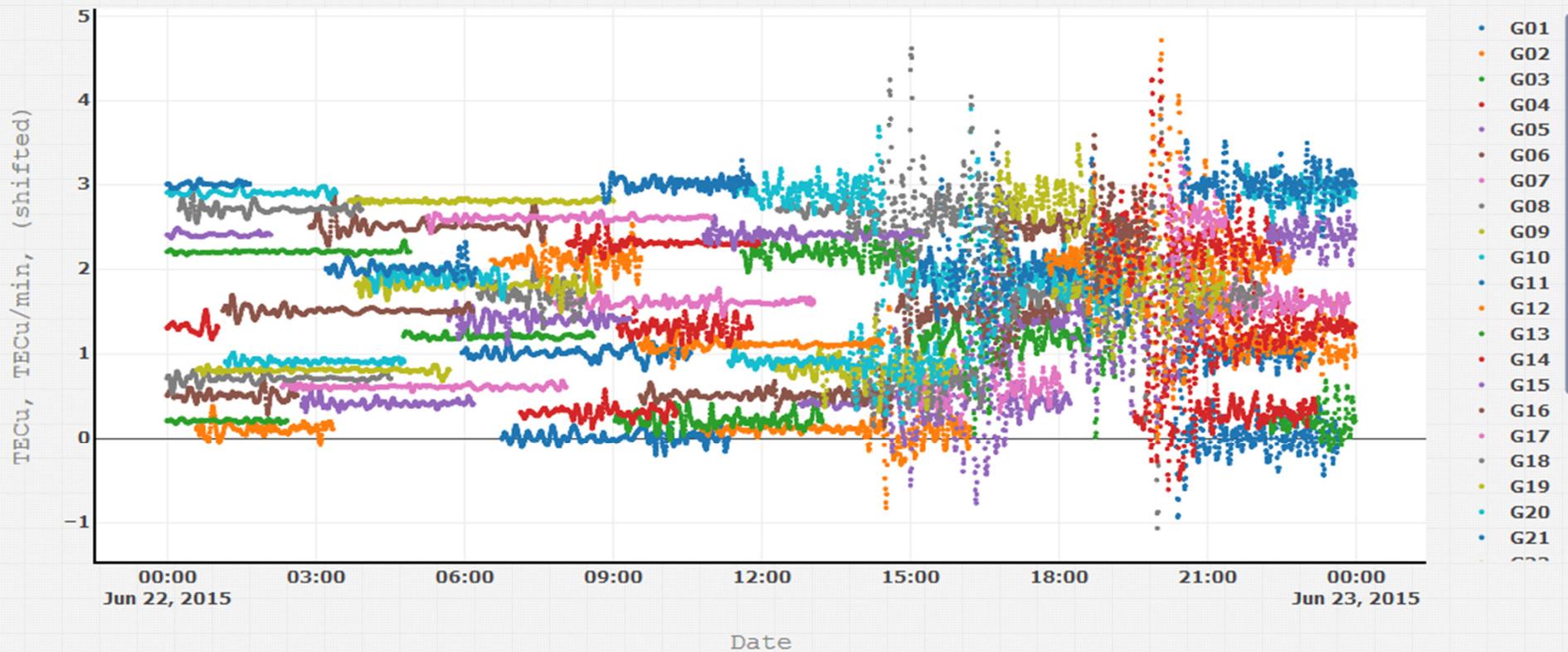
Created by SIMuRG



SIMuRG: data series

Series

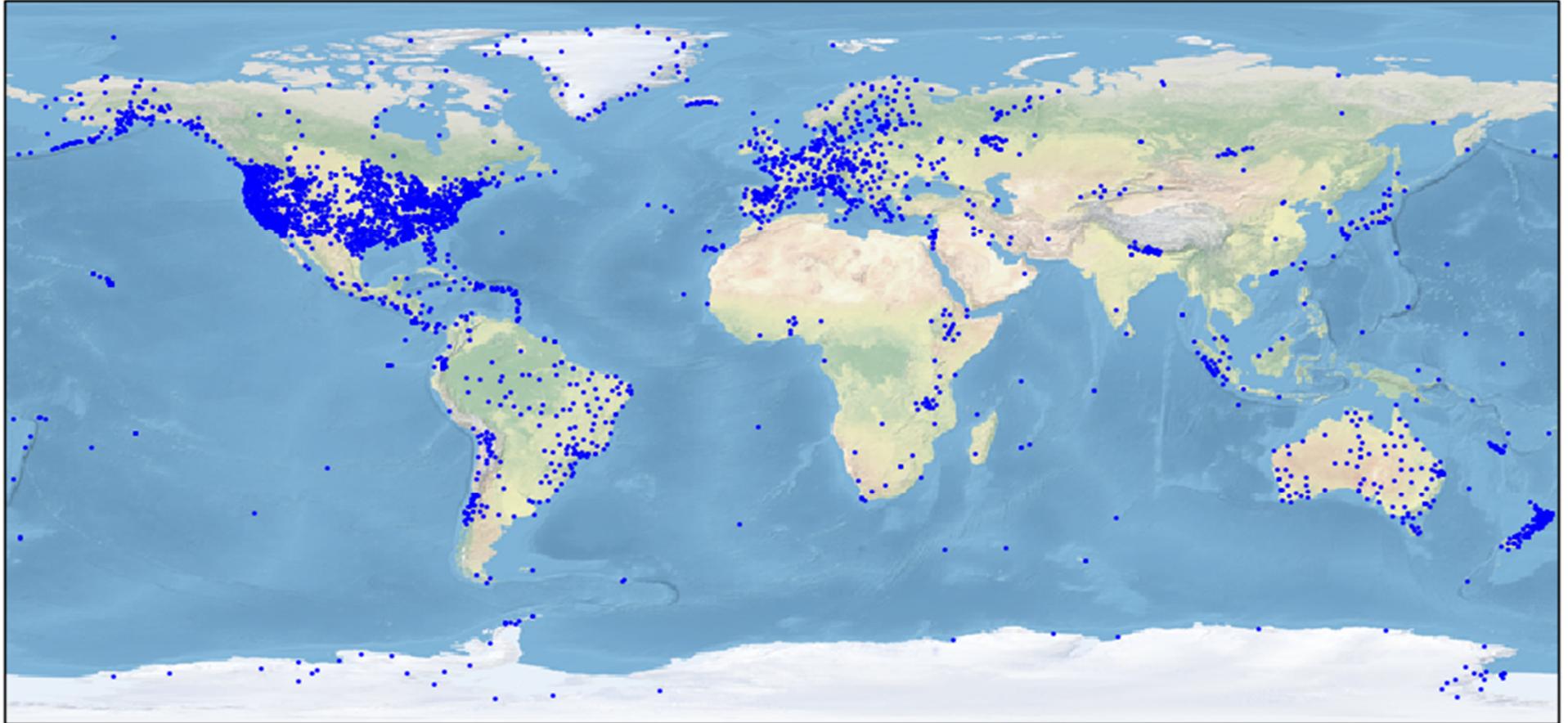
Series data



2-10 minute TEC variations 10-20 minute TEC variations 20-60 minute TEC variations ROTI Adjusted TEC geometry

Download

SIMuRG

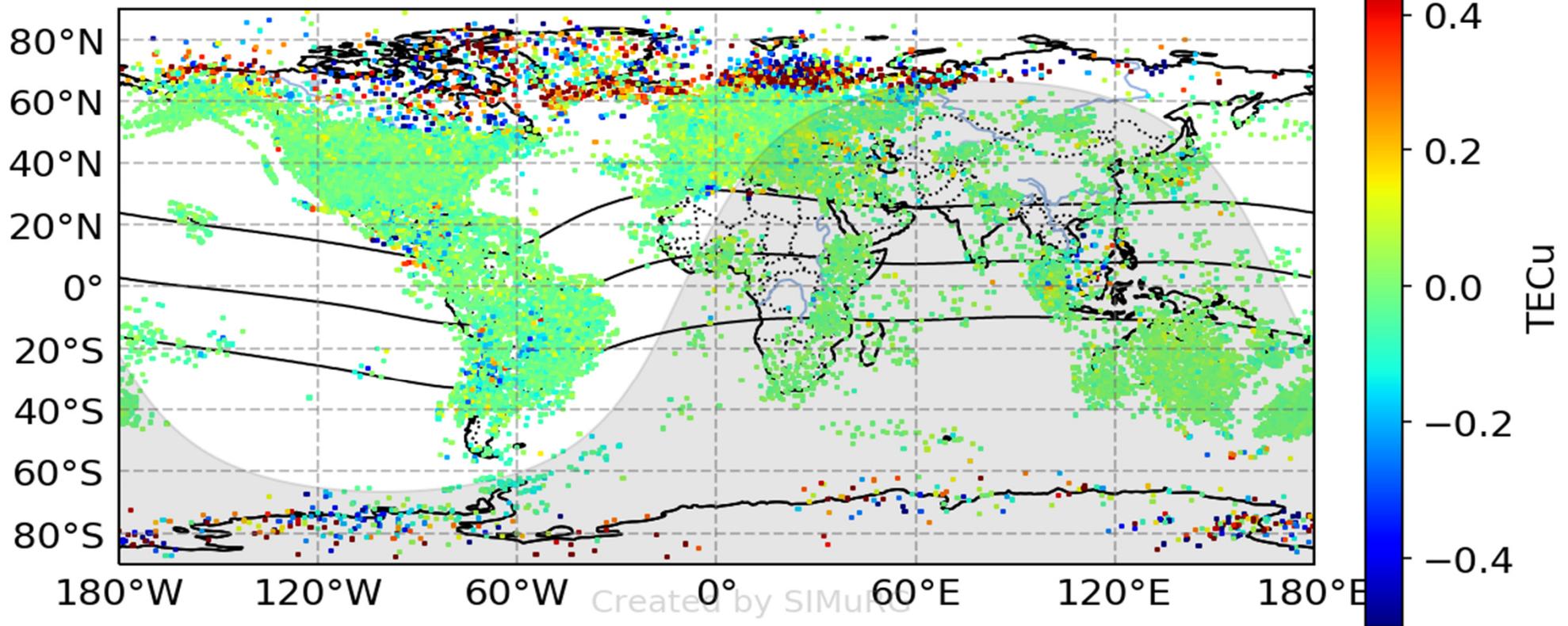


For provided GNSS data we acknowledge: Austrian data center (BEV), Northern California Earthquake Data Center, Pacific Northwest Geodetic Array (PANGA), INGV - Rete Integrata Nazionale GPS, Institute of Geodynamics, National Observatory of Athens, Dutch Permanent GNSS Array (DPGA), Scripps Orbit and Permanent Array Center, UCSD\cite(Dow2009), Earth Observatory of Singapore, Royal Observatory of Belgium\cite(Bruyninx2012), REseau National GPS permanent (RENAG), Institute of solar-terrestrial physics SB RAS \cite(Yasyukevich2018).

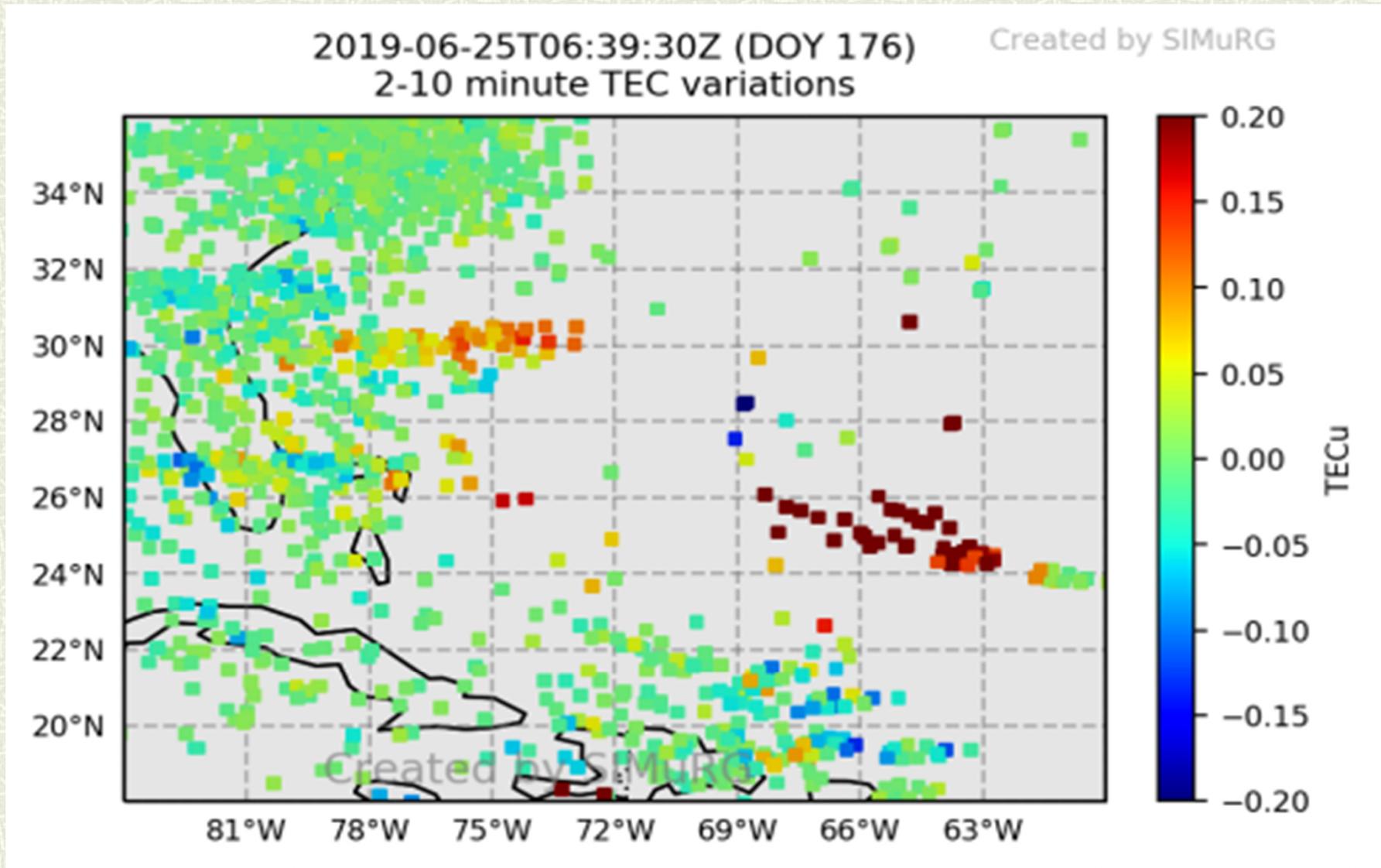
SIMuRG: 2-10 min TEC variations maps

Created by SIMuRG

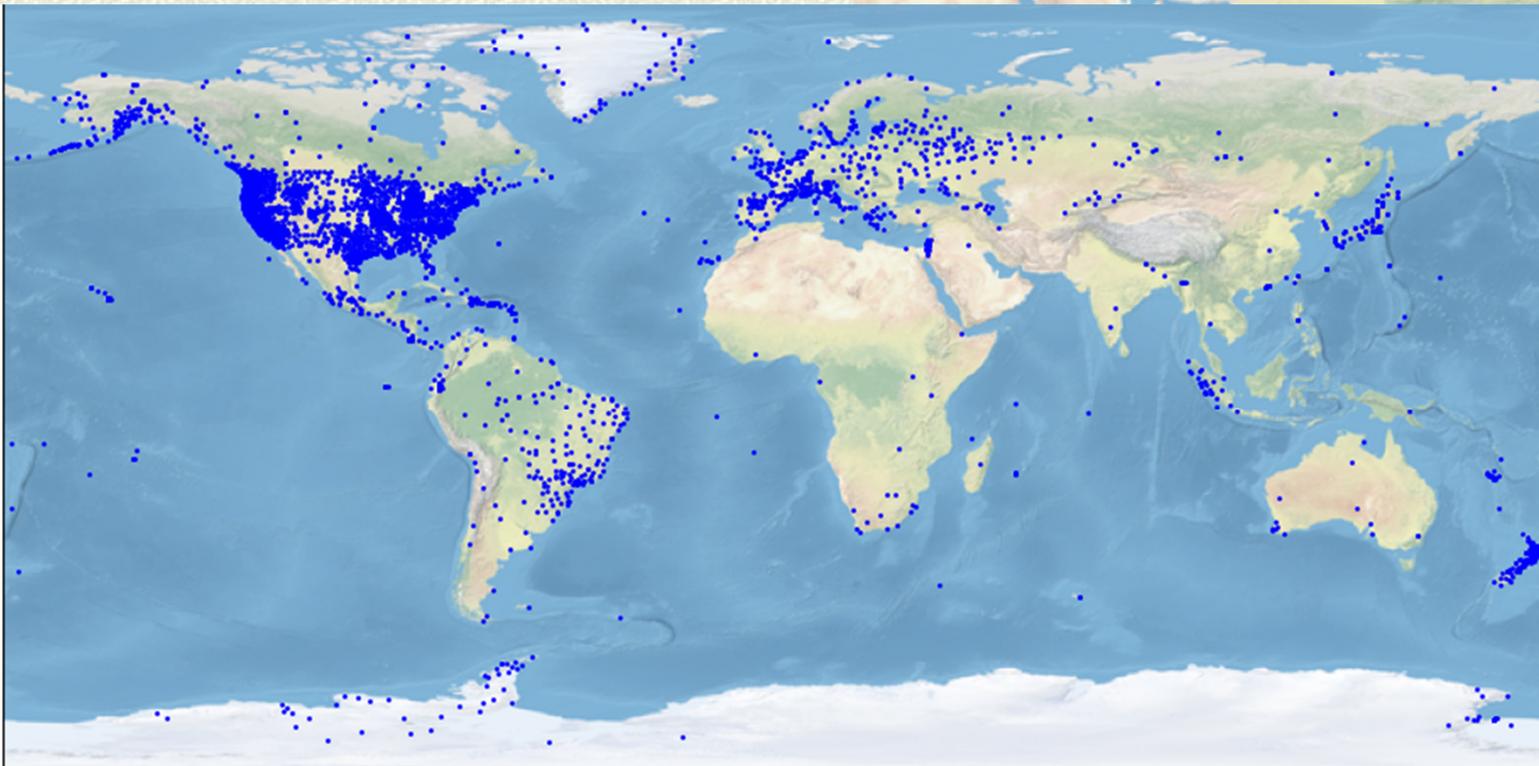
2015-06-22T18:40:00Z (DOY 173)
2-10 minute TEC variations



Falcon Heavy launch



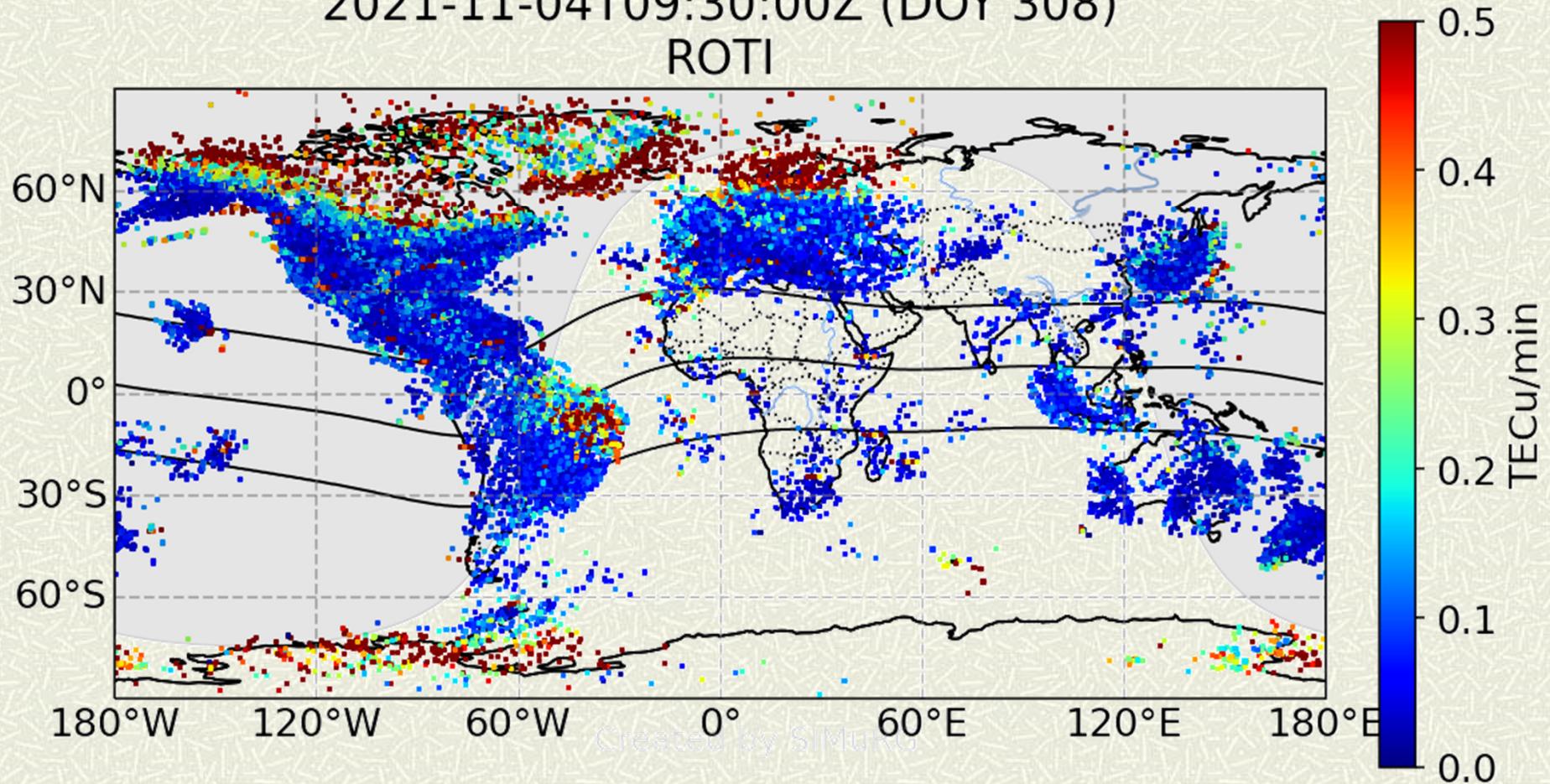
Распределение числа станций



Распределение индекса ROTI

Created by SIMuRG

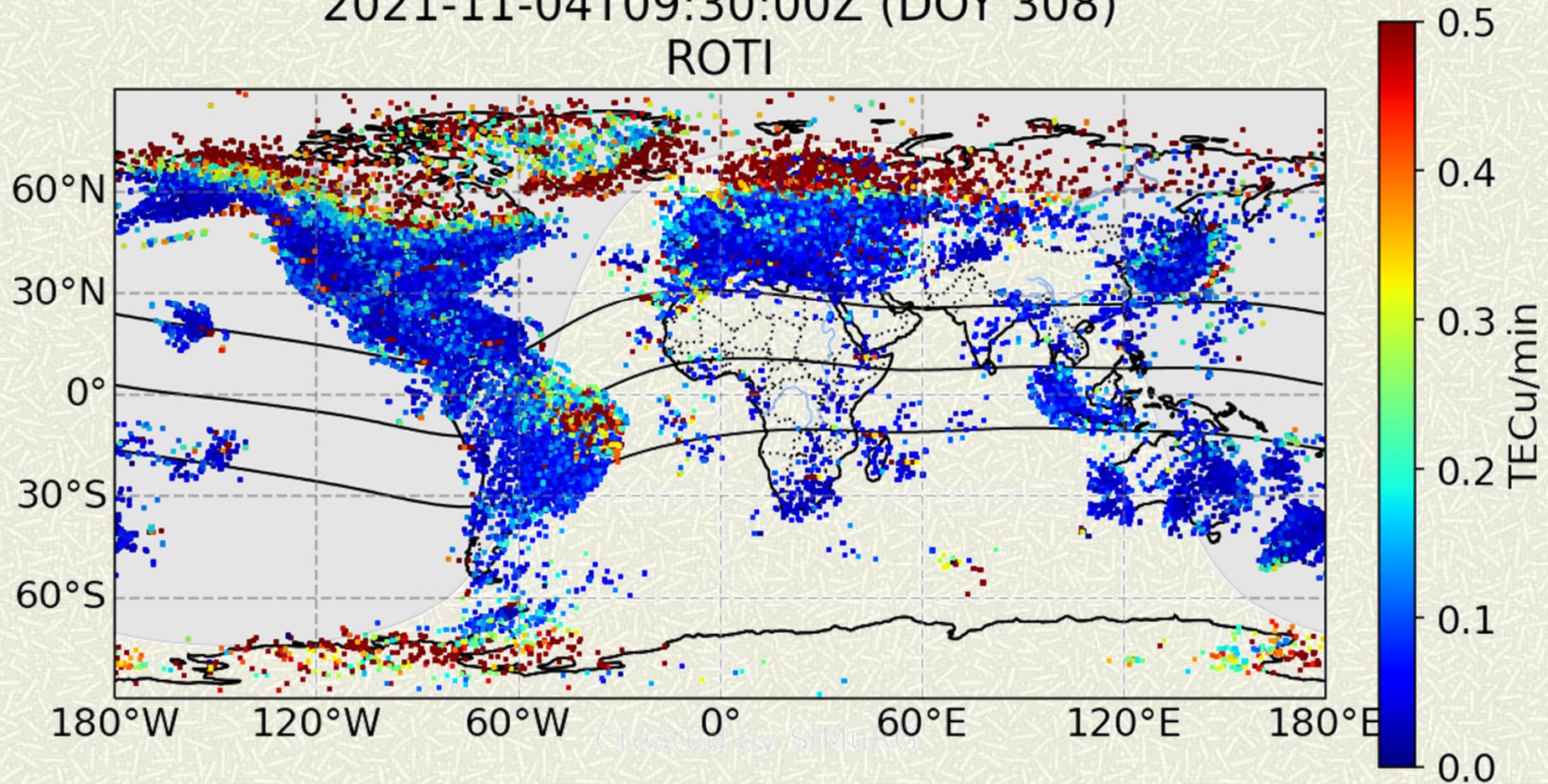
2021-11-04T09:30:00Z (DOY 308)
ROTI



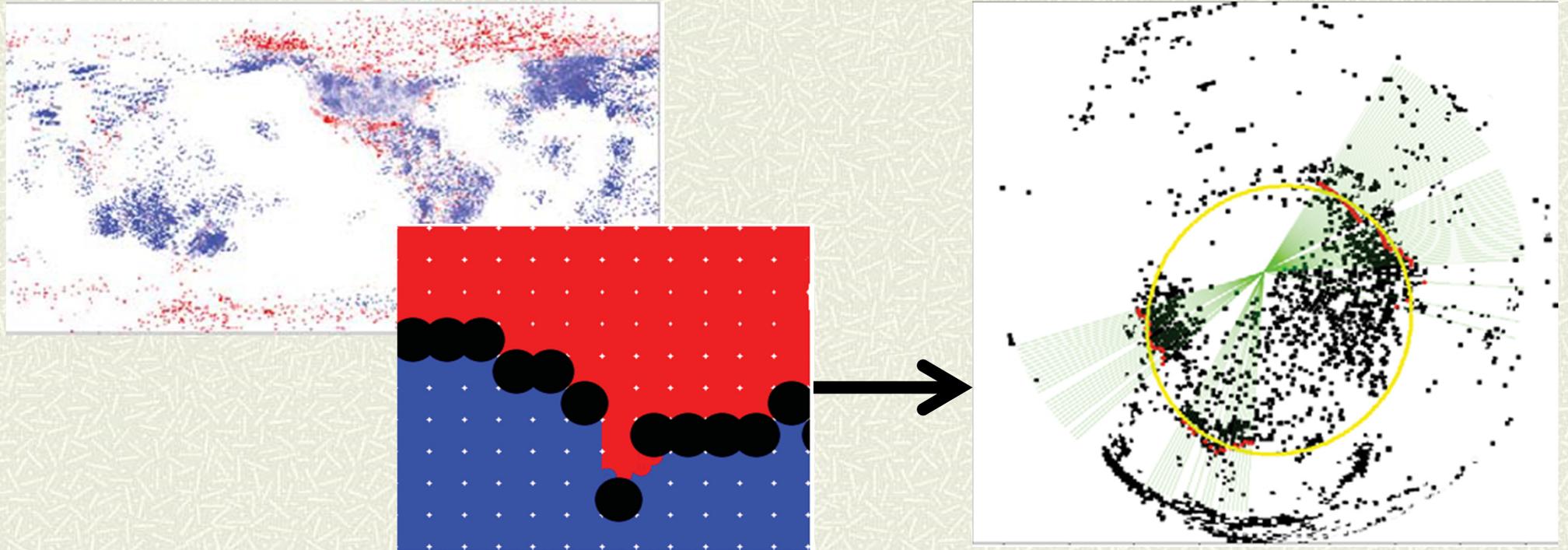
Распределение индекса ROTI

Created by SIMuRG

2021-11-04T09:30:00Z (DOY 308)
ROTI



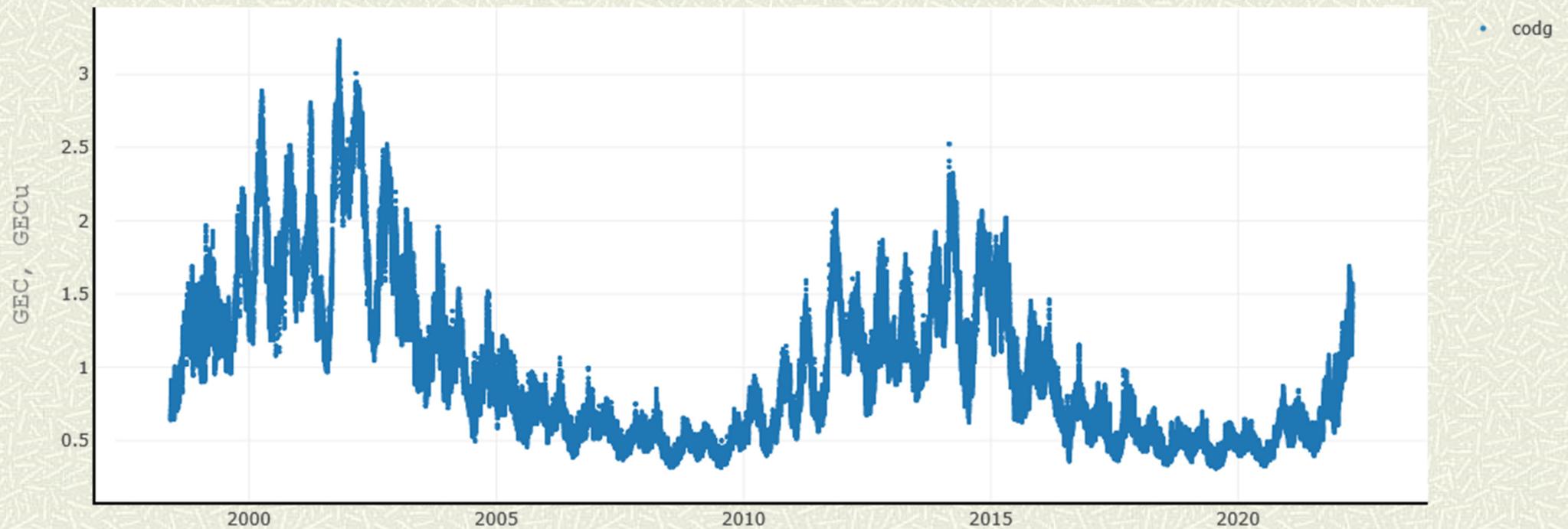
Компьютерное зрение



A. Vasiliev et al. Computer Vision for GNSS-based Detection of the Auroral Oval Boundary // International journal of artificial intelligence. 2021. V 19, N2. P. 132-151.

SIMuRG: Глобальное электронное содержание

Global Electron Content
(integral TEC over the Globe)

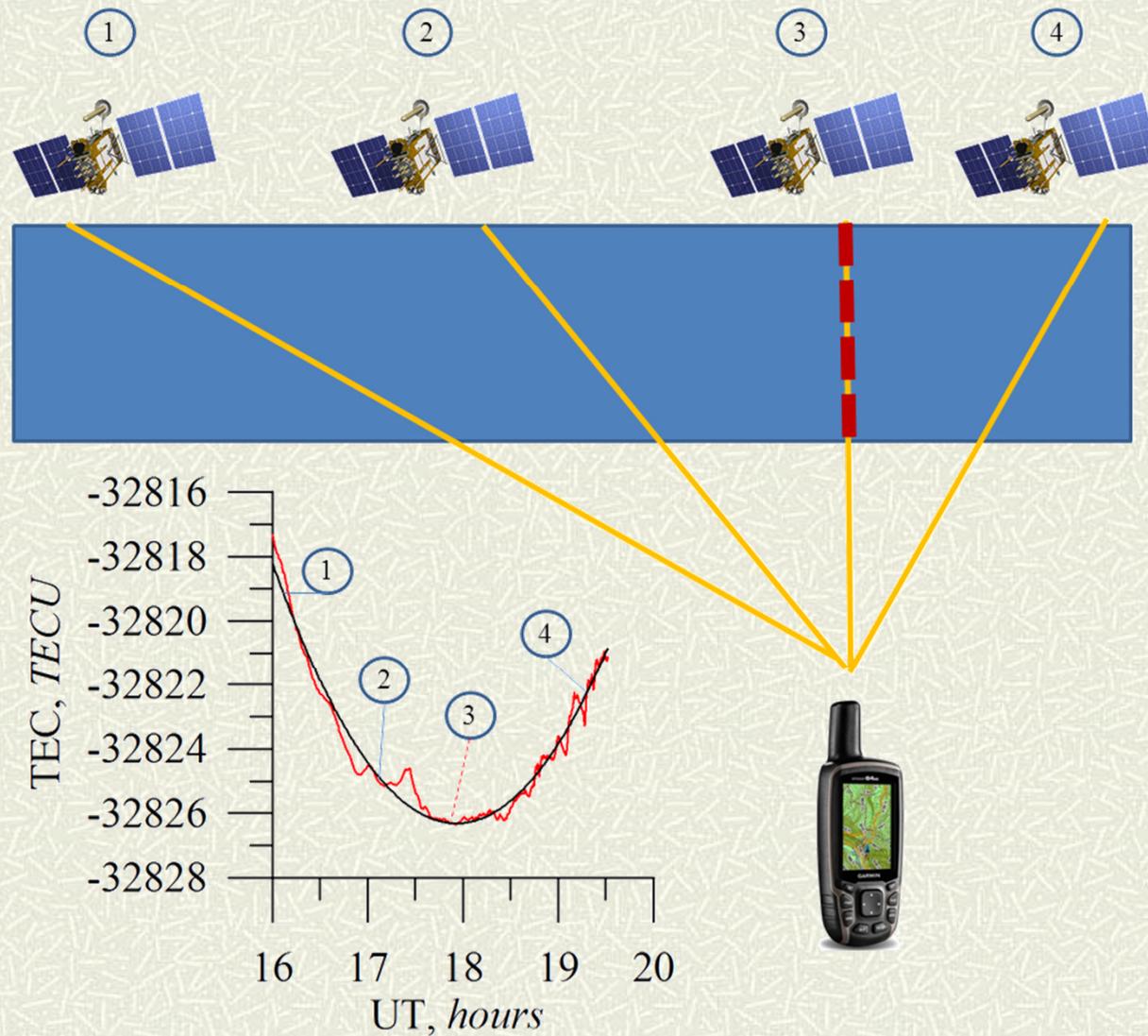


Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Oinats A.V., Yasukevich Yu. V., Zhivetiev I. V. Global electron content: a new conception to track solar activity, *Ann. Geophys.*, 2008, 26, 335–344, DOI: 10.5194/angeo-26-335-2008.

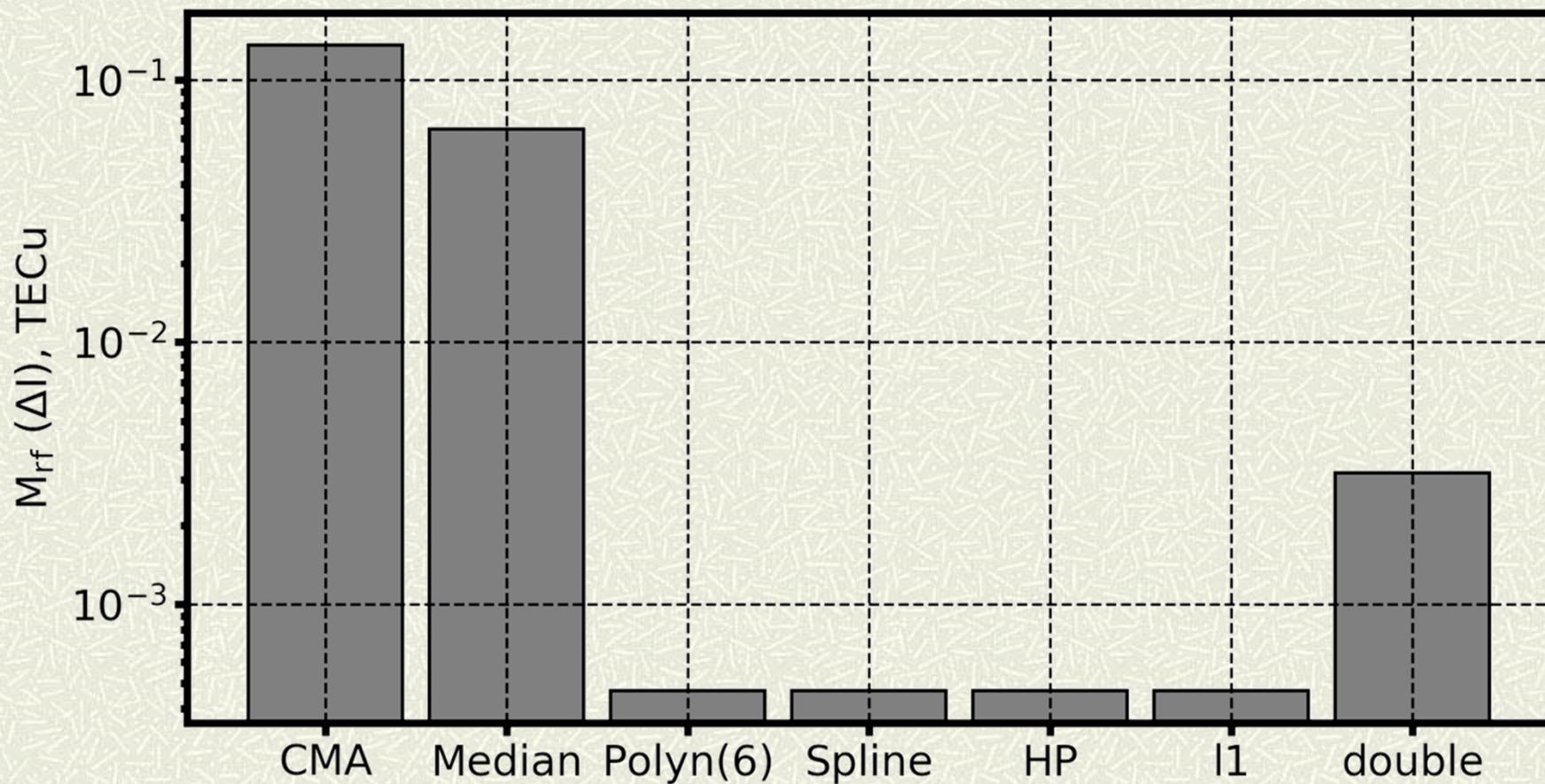
Развитие методов обработки данных ГНСС



Фильтрация вариаций



Средняя ошибка при удалении тренда ПЭС

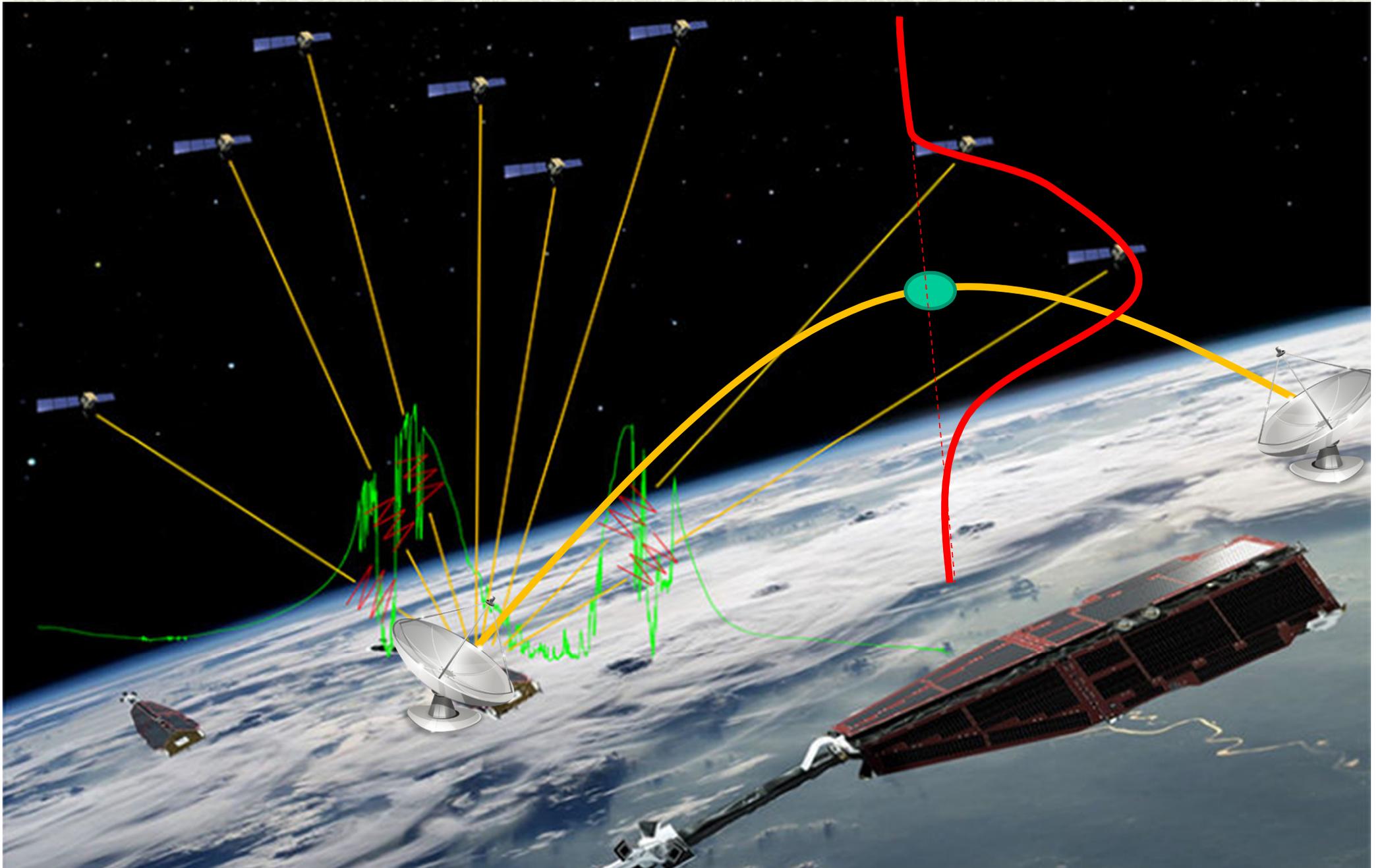


<https://doi.org/10.3390/rs12081340>

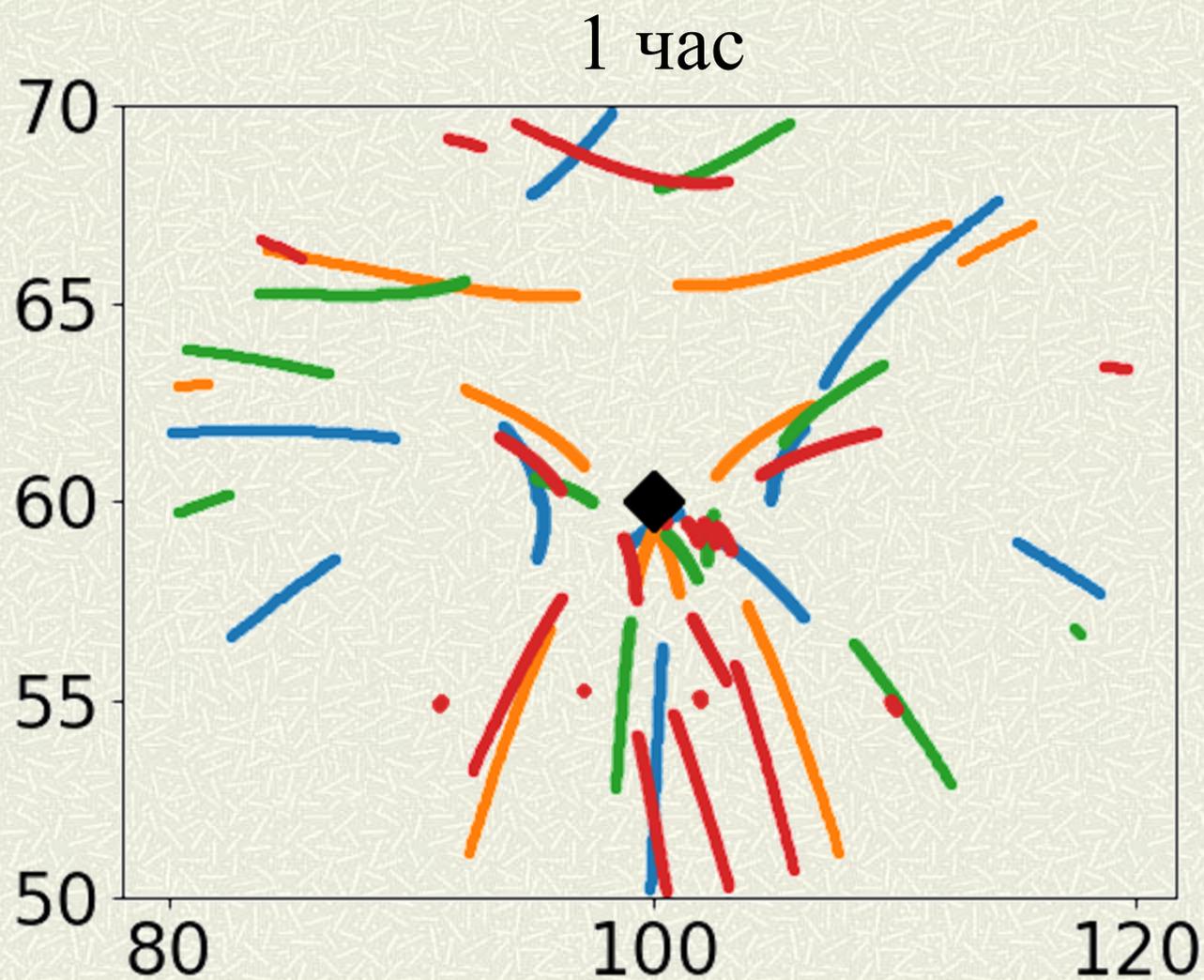
Что делать если есть только одна станция ГНСС в регионе



Проблема: а там ли мы измеряем



Геометрия измерений ПЭС



Оценка параметров радиоканала

Оценка наклонных ПЭС на основе данных ГНСС (GPS, ГЛОНАСС ...)

Оценка вертикального ПЭС и его градиентов, ДКЗ

Абсолютный
вертикальный ПЭС

Абсолютный
наклонный ПЭС

Пространственная интерполяция

Корректировка модели по
глобальным параметрам и
расчет параметров радиоканала

Локальная корректировка модели
и расчет параметров радиоканала.
Оценка МПЧ.

Модель измерений

$$I_M = S_j^i I_V(\phi, l, t) + I_{B,j} + b \cdot UT$$

ПЭС

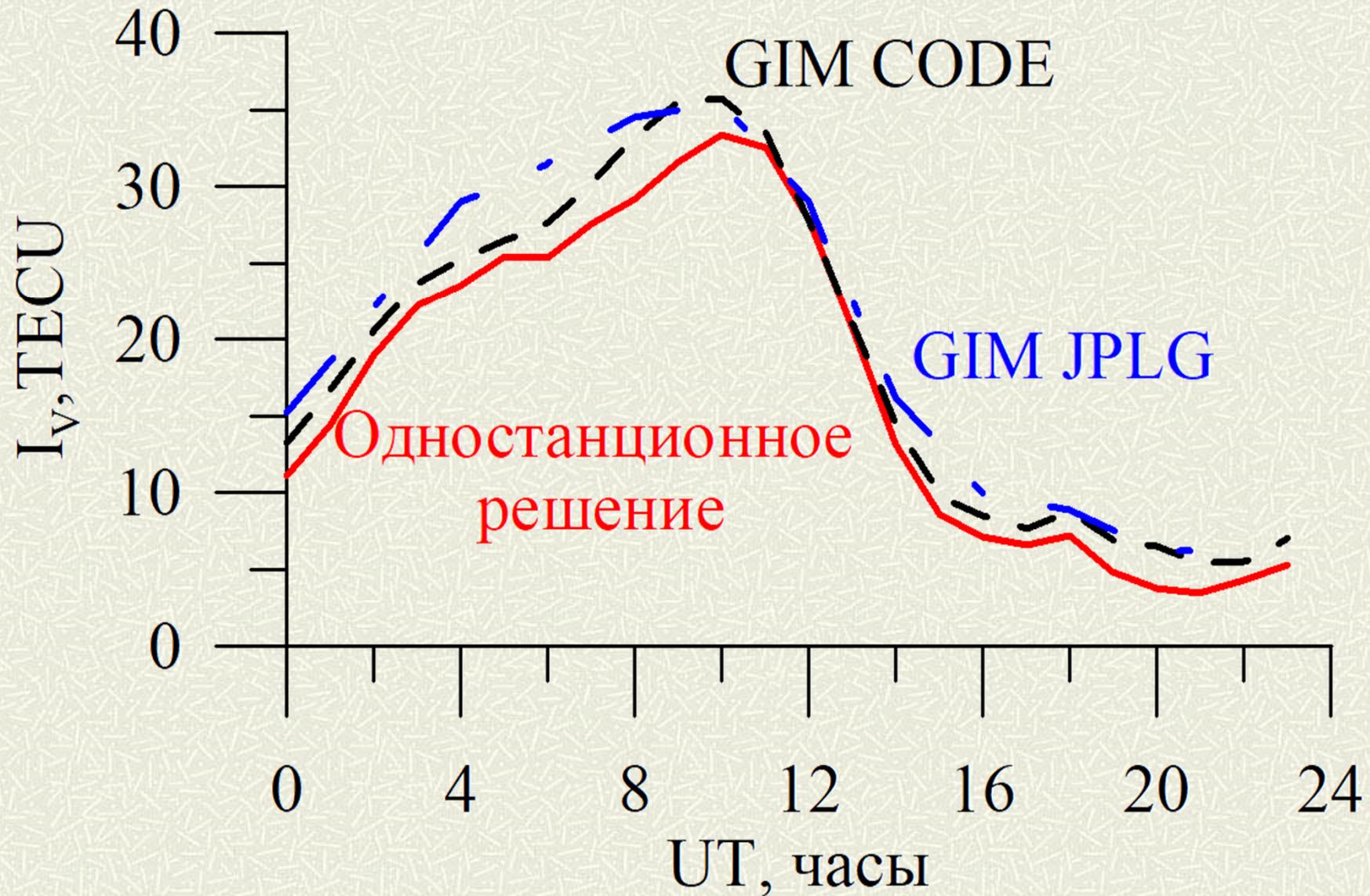
ДКЗ

Часы
приемника

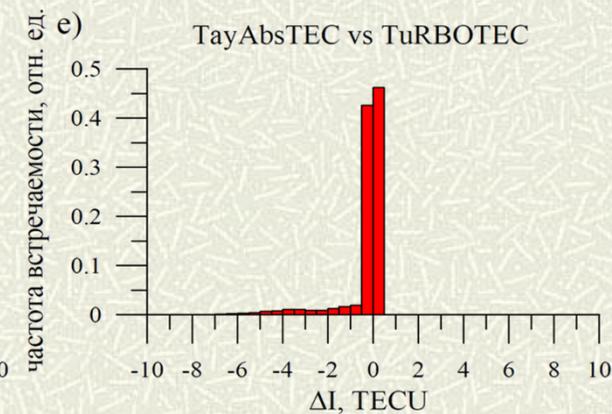
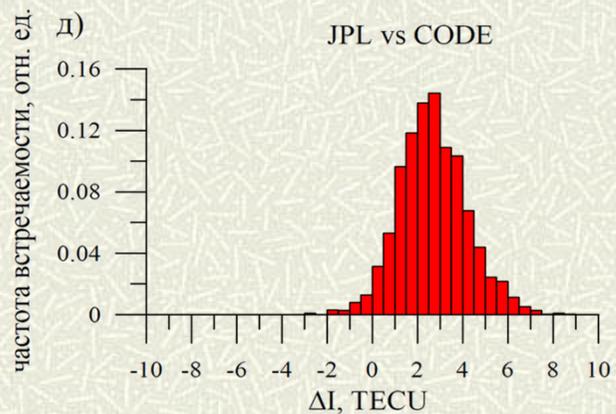
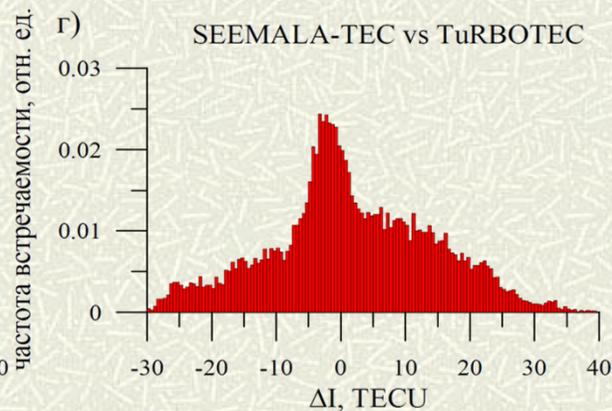
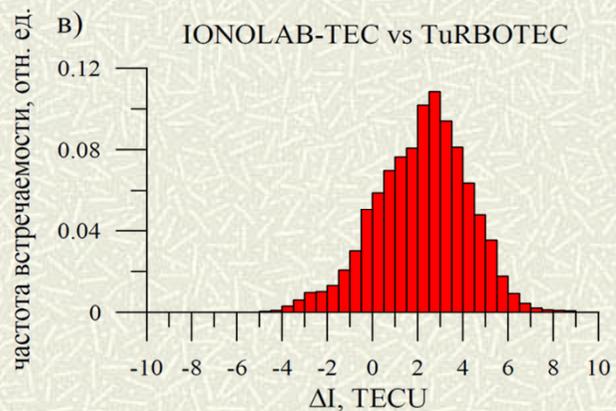
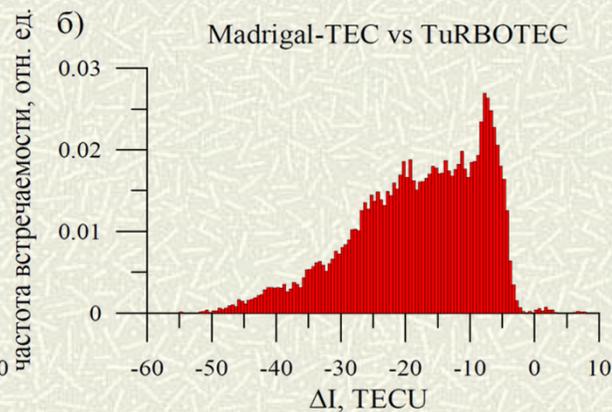
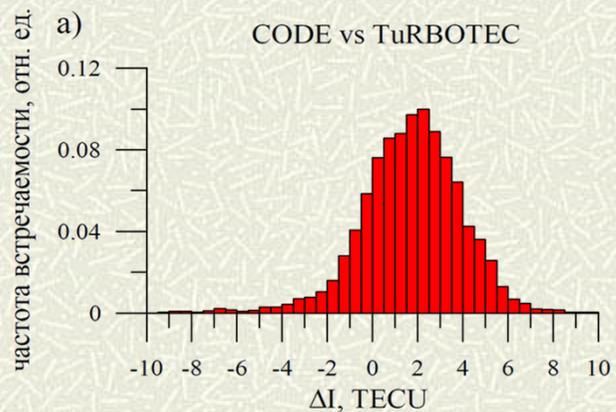
$$S_j^i = \left[\cos \left\{ \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin[\alpha(90 - \theta_i^j)] \right) \right\} \right]^{-1}$$

$$I_V(\phi, l, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} D_{mnk} \frac{\partial^{m+n+k} I_V}{\partial \phi^m \partial l^n \partial t^k} \Bigg|_{\phi_0, l_0, t_0} \quad D_{mnk} = \frac{1}{m!n!k!} (\Delta\phi)^m (\Delta l)^n (\Delta t)^k$$

Абсолютное полное электронное содержание

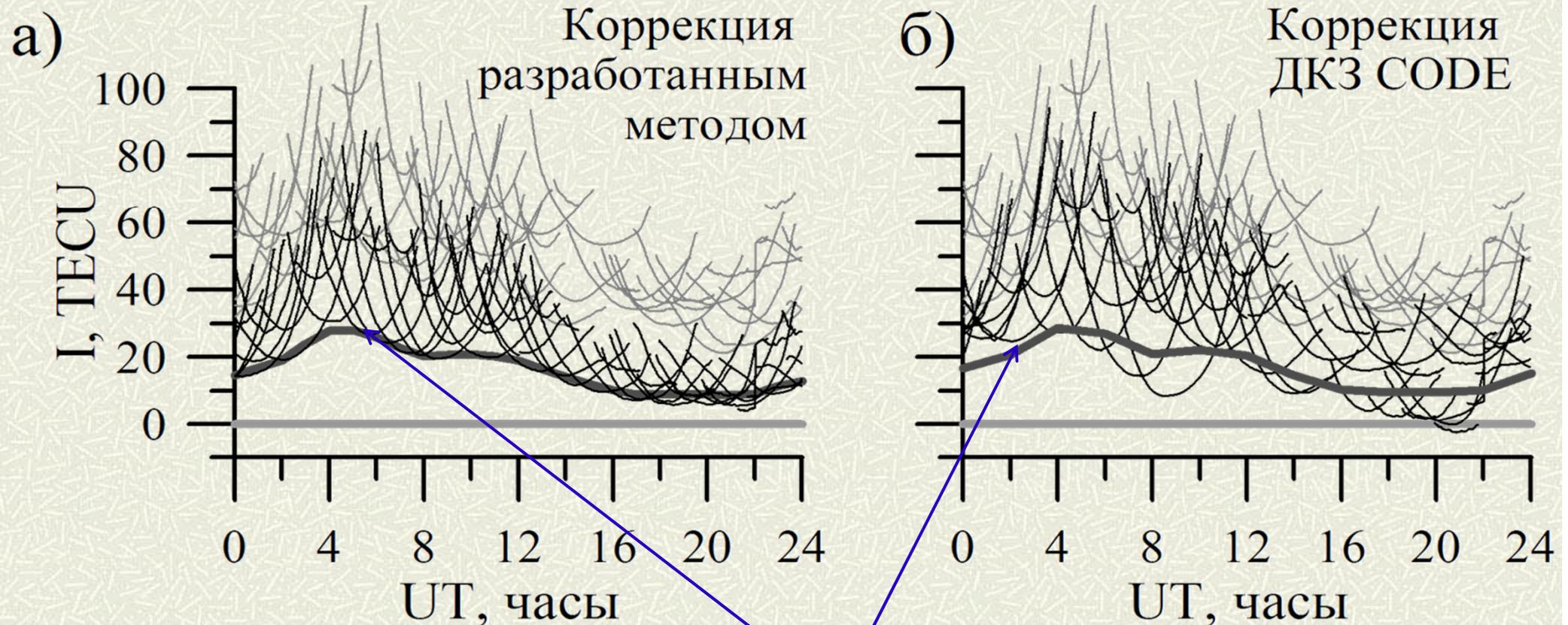


Сравнение различных методов



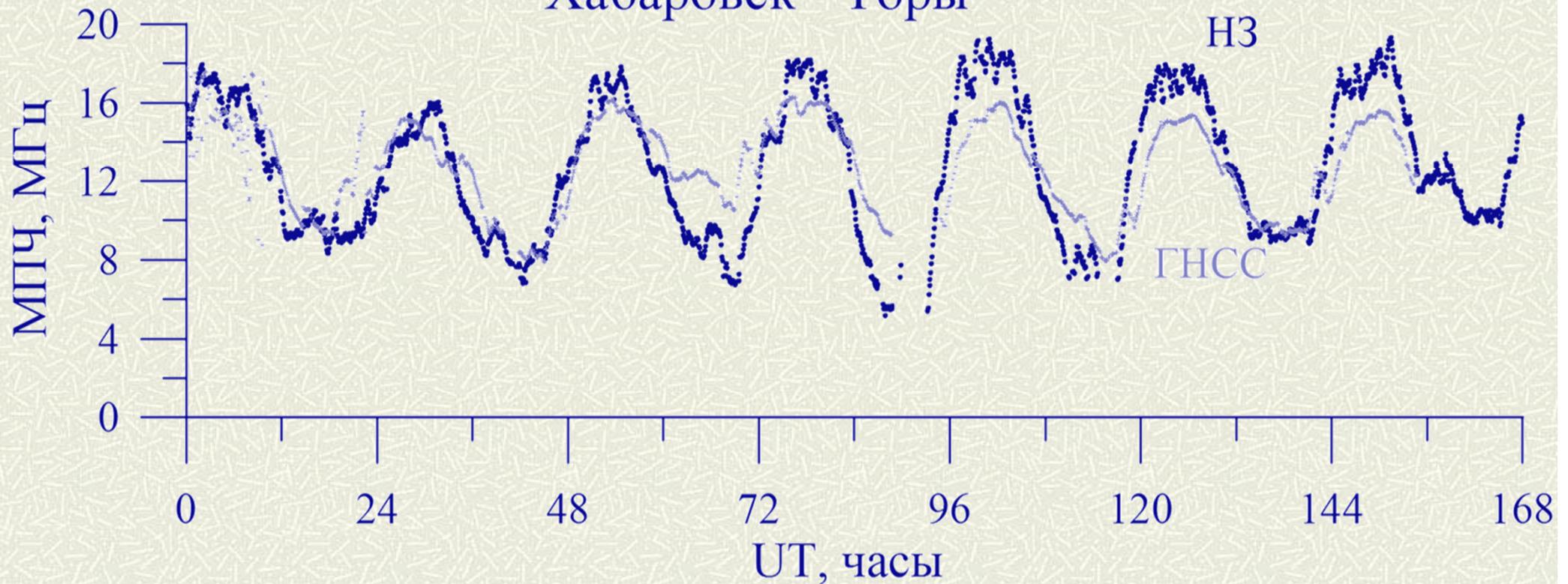
~9% значений ПЭС при использовании ограничений более чем на 1 TECU превышают аналогичное решение без использования ограничений.

Методология при двухчастотных измерениях Наклонное ПЭС



Экспериментальные результаты оценки МПЧ

Хабаровск - Торы

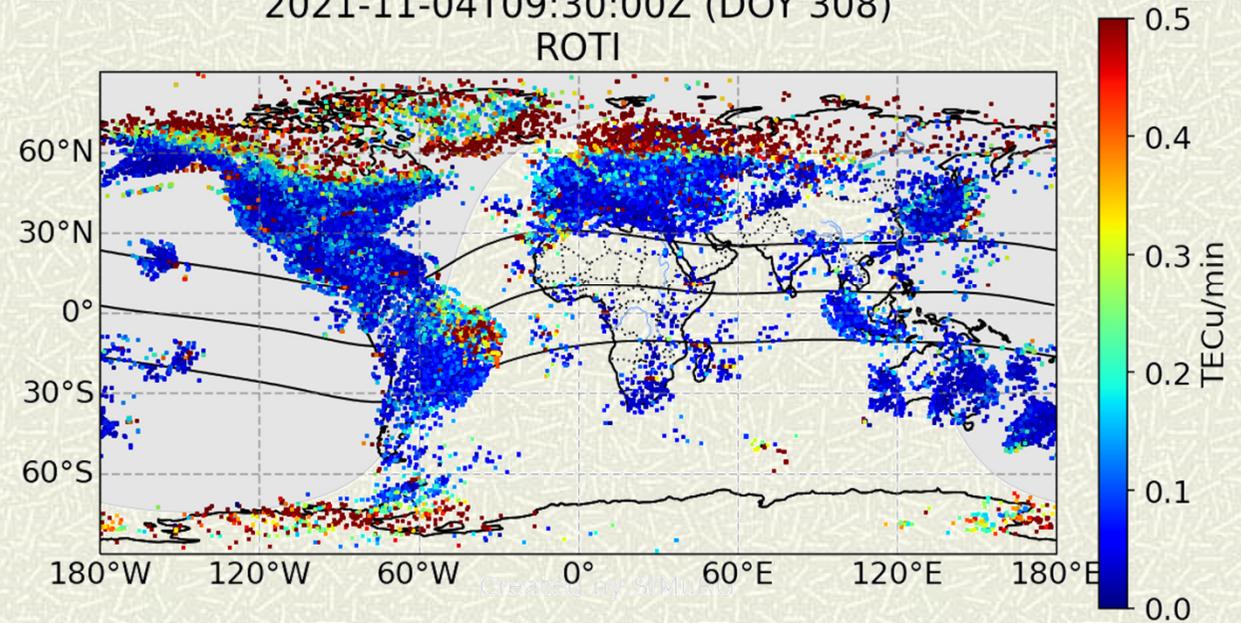


Ошибку <30% имеют ~90% измерений.



Created by SIMuRG

2021-11-04T09:30:00Z (DOY 308)
ROTI



**Спасибо за Ваше
внимание!**