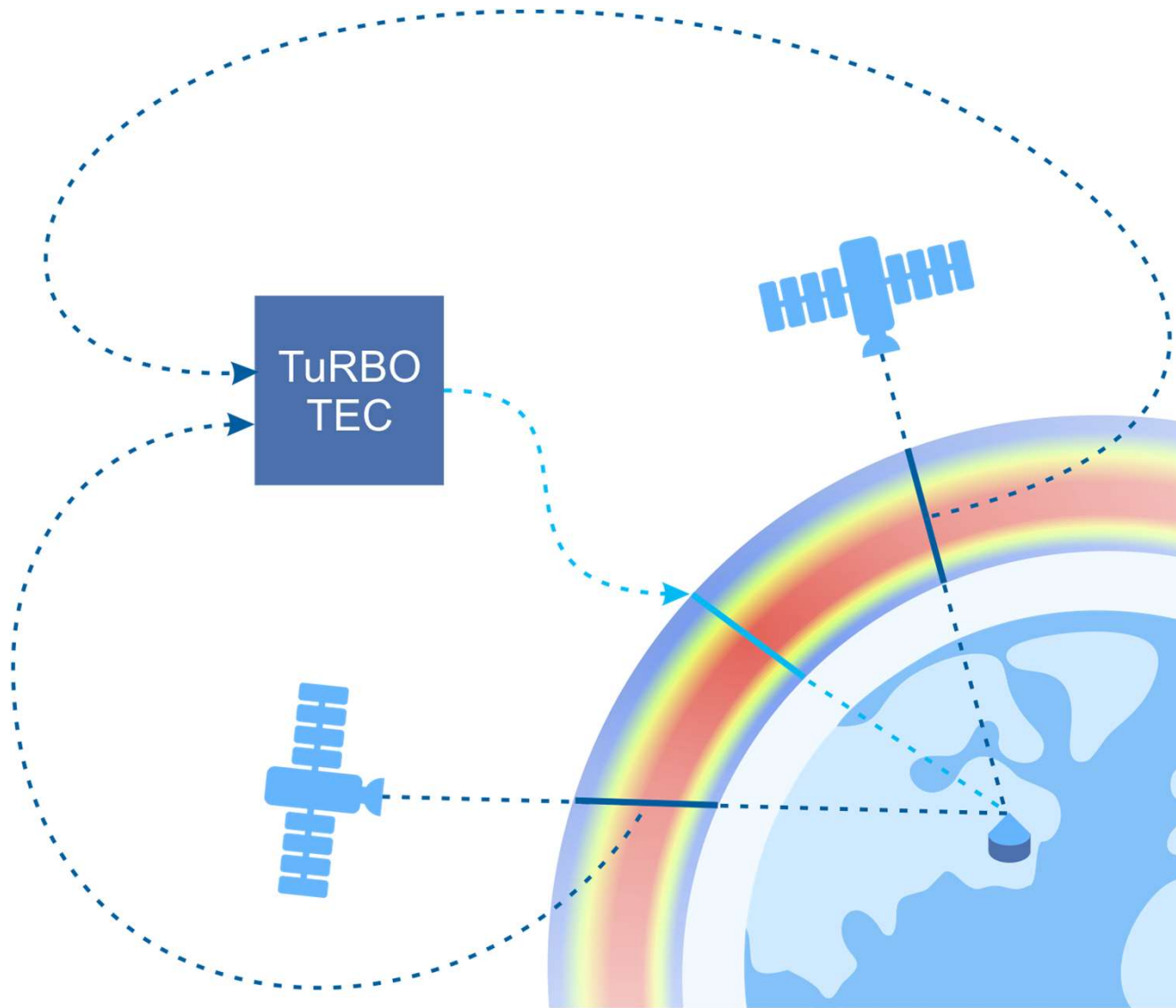


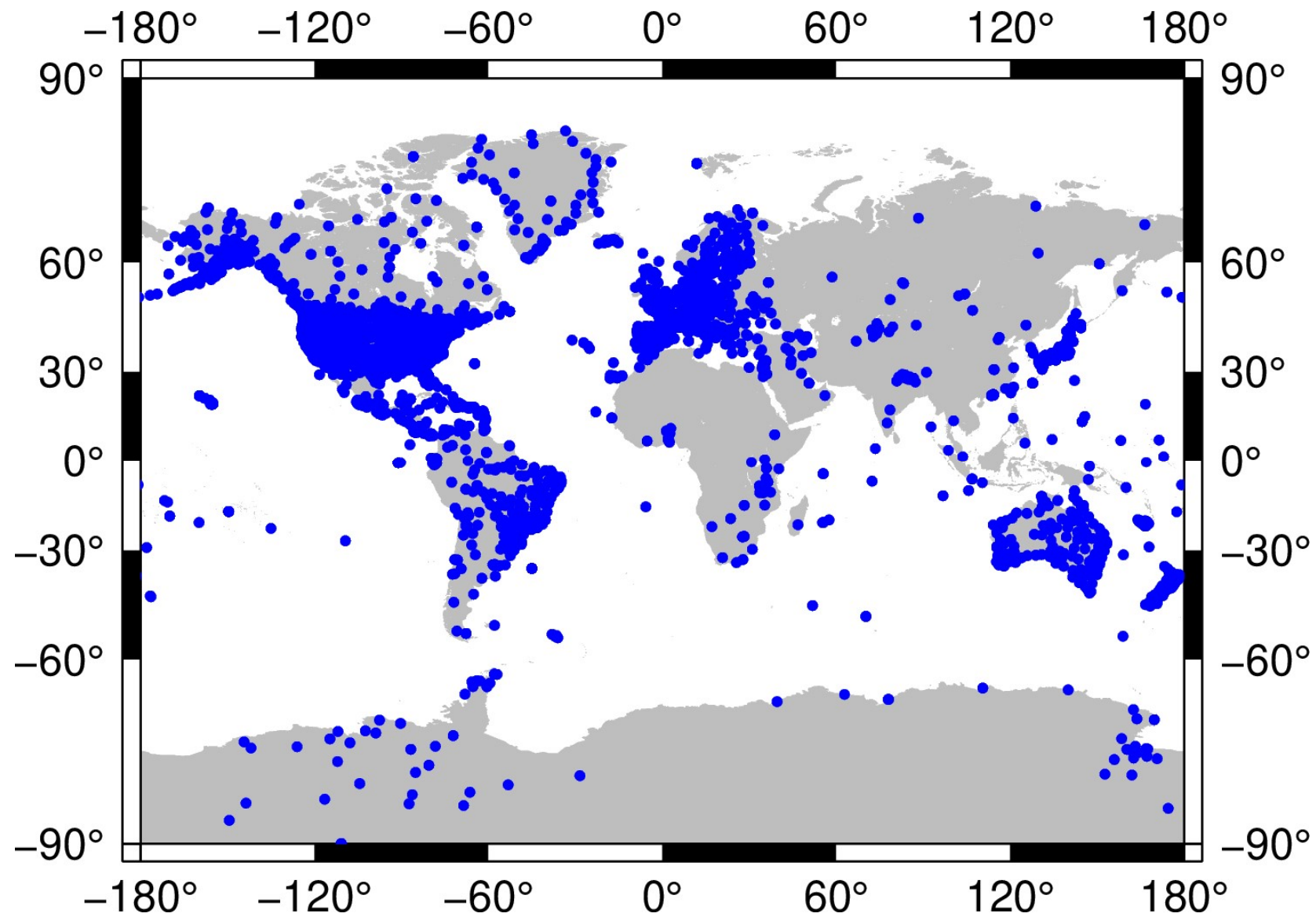
Выполнено при поддержке РФФИ (проект N 18-35-20038)

Неотрицательное абсолютное полное электронное содержание по данным глобальных навигационных спутниковых систем

Юрий Ясюкевич,
Анна Мыльникова, Артем Веснин

ИКИ РАН, 16-20.11.2020 г.





>7000 станций в открытом доступе

Оценка ПЭС на основе данных GPS/ГЛОНАСС/Galileo/BeiDou

Фазовые измерения

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

Групповые измерения

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [P_2 - P_1 + DCB \cdot c + \sigma \varphi]$$

Проблемы

- 1) Фазовые измерения: неизвестная константа
- 2) Групповые измерения: дифференциальные кодовые задержки (разное время распространения различных сигналов в трактах приемника).

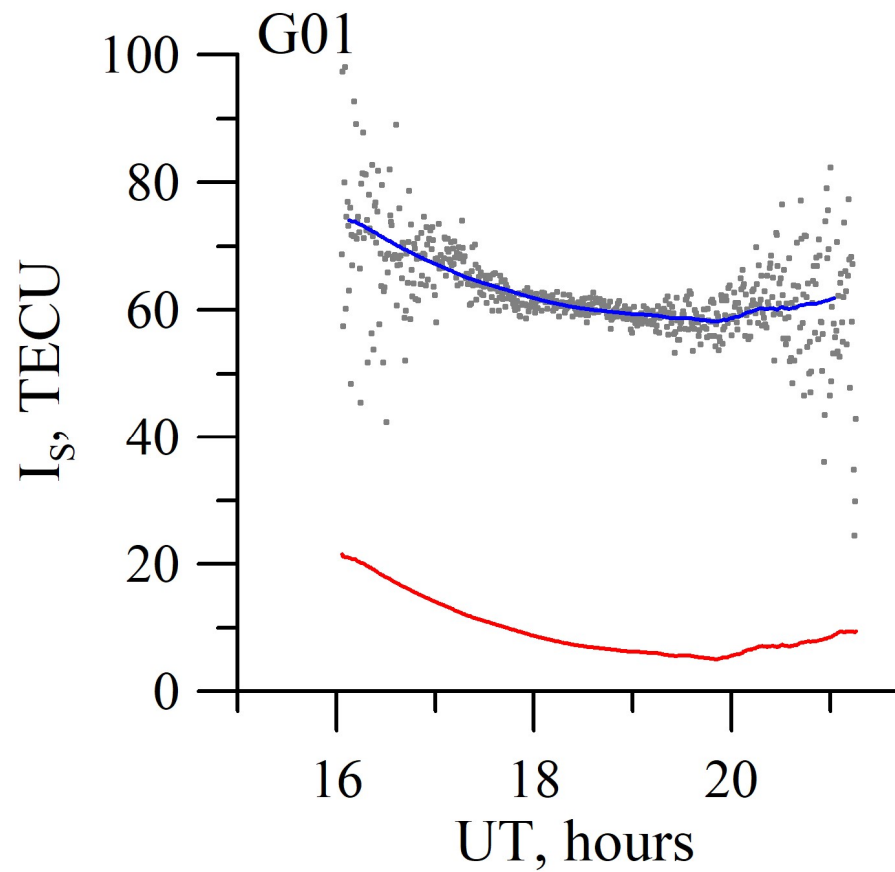
Стандартный подход

- 1) Подготовка данных.
- 2) Задается модель измерений.
- 3) Параметры модели минимизируются на основе метода наименьших квадратов.
- 4) Оценка ДКЗ дает абсолютные значения вертикального ПЭС и наклонного ПЭС.

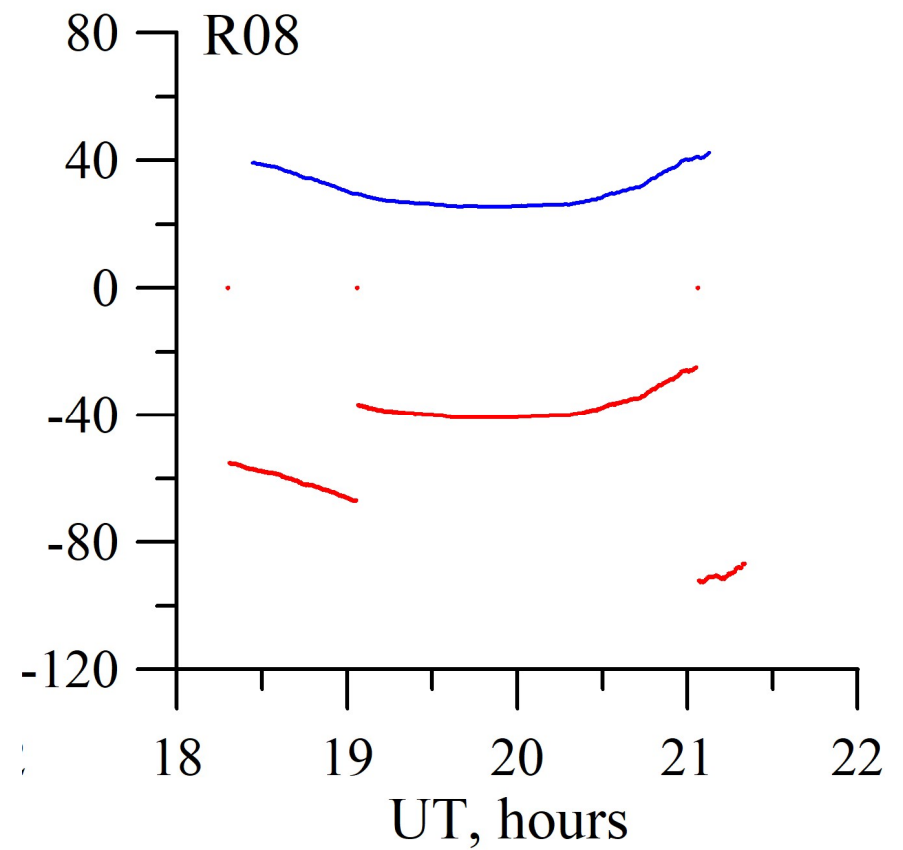
[Ясюкевич и др. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 2015.]

Подготовка данных

Leveling



Устранение срывов фазы



Стандартный подход

Модель измерений

$$I_M = I_S + I_{DCB} = I_V \cdot S + I_{DCB}$$

Ряд Тейлора для поля ПЭС

$$I_V(\phi, l, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta\phi)^m (\Delta l)^n (\Delta t)^k}{m! n! k!} \frac{\partial^{m+n+k} I_V}{\partial \phi^m \partial l^n \partial t^k}$$

Система уравнений на I_V , и остальные параметры

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

Возникающие проблемы

- 1) Отрицательные значения ПЭС на наклонных лучах
- 2) (Реже) Отрицательные значения вертикального ПЭС

Позитроны в ионосфере:)

МНК с ограничениями

- 1) Waterman M.S. A restricted least squares problem. *Technometrics* 1974, 16, 135–136.
- 2) Start P.B., Parker R.L. Bounded-Variable Least-Squares: an Algorithm and Applications. *Comput. Stat.* 1995, 10, 129–141.
- 3) Алгоритм [Start and Parker, 1995] имеет реализацию на Python:

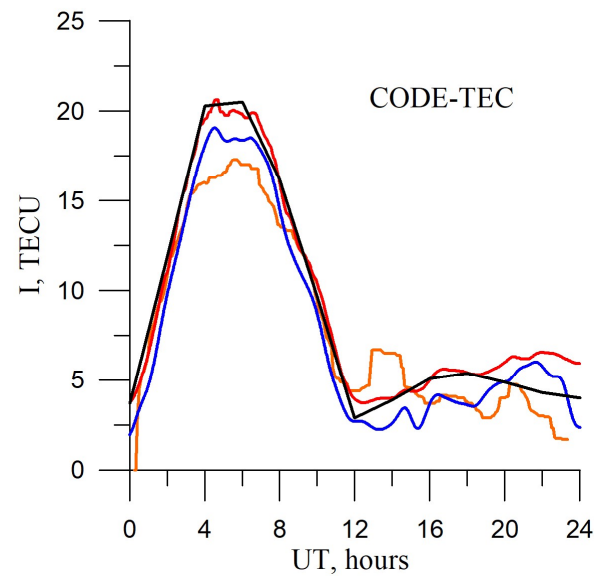
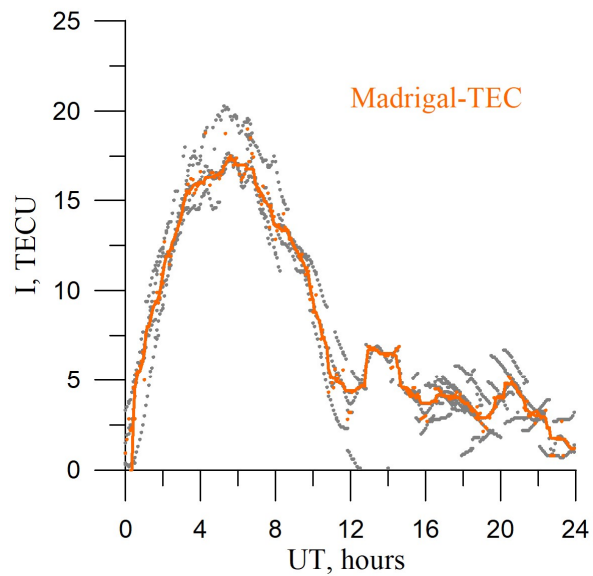
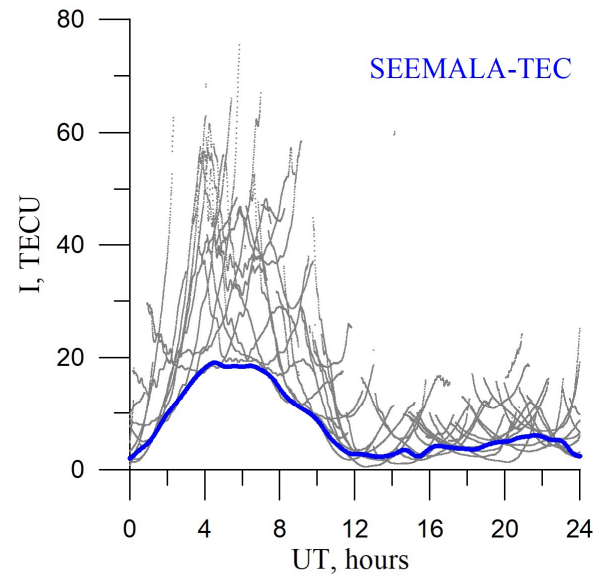
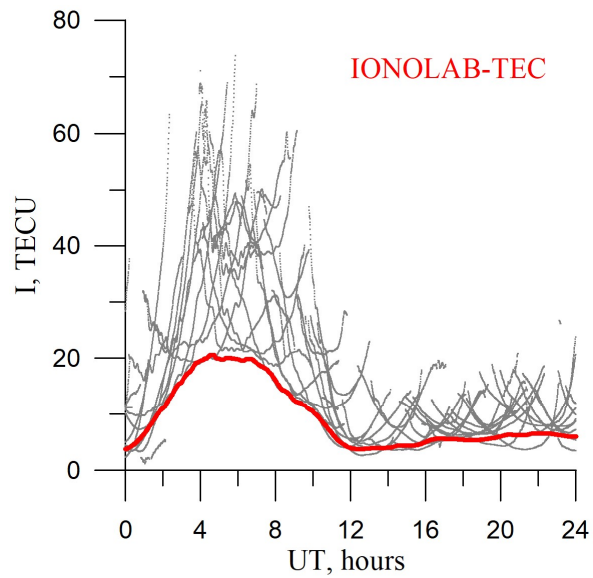
`scipy.optimize.lsq_linear`

Точное решение получается за число шагов не превышающее величину переменных.

МНК с ограничениями

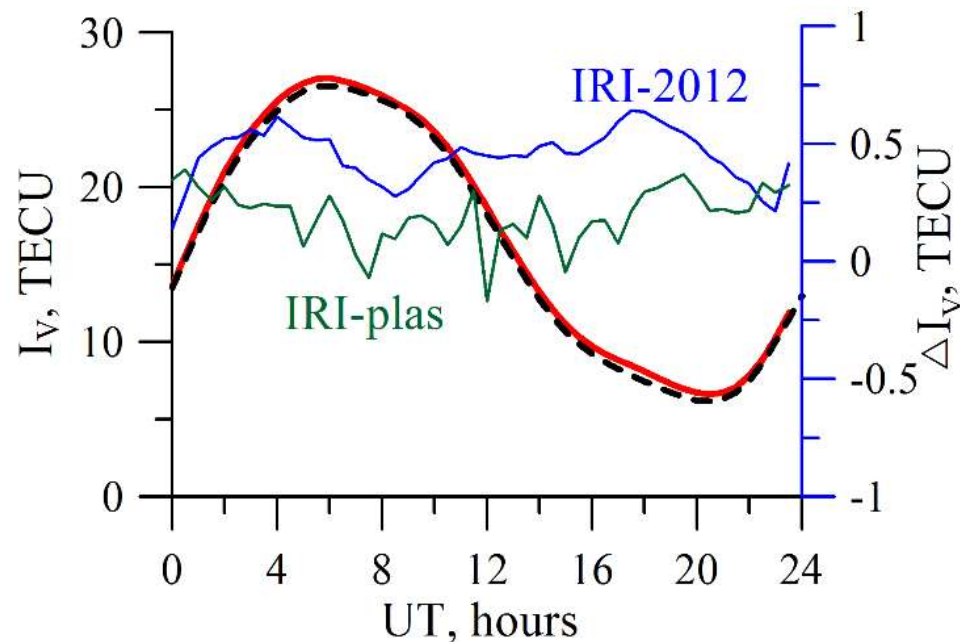
- 1) МНК. Удовлетворяющее решение - останавливаем.
Иначе - два класса переменных: свободный набор (free set) - значения в пределах ограничений, и активный набор (active set).
- 2) Выбирается переменная, имеющая максимальное значение в функции потерь и переносится в активный набор.
- 3) Вектор данных корректируется ($b'_j = b_j - \sum_{k \in \text{active set}} A_{jk} x_j$) и строится урезанная система для свободного набора. МНК.
- 3) Если переменных в свободном наборе за пределами ограничений, то осуществляется градиентная коррекция всего свободного набора.
- 4) Продолжайте пока не получите подходящее решение.

Данные для сопоставления

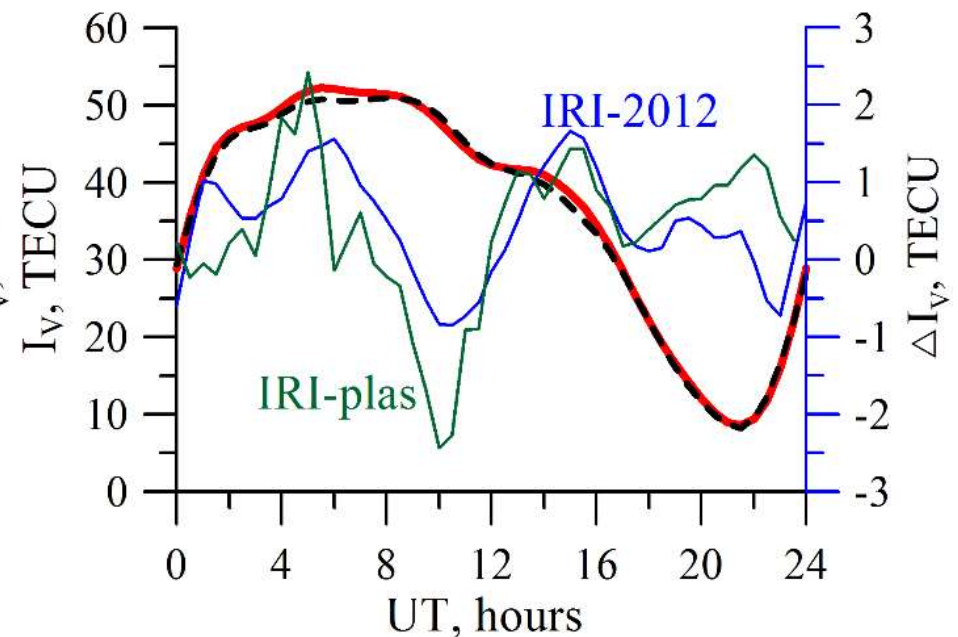


Моделирование на основе IRI

IRKJ

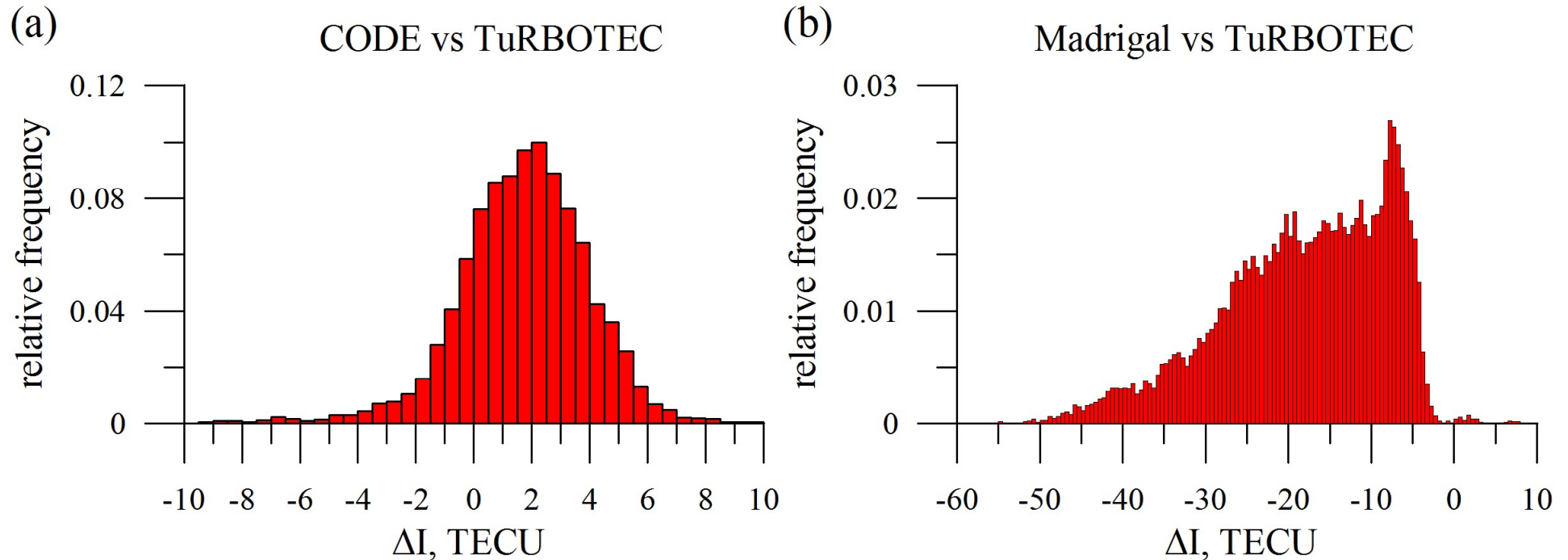


NTUS



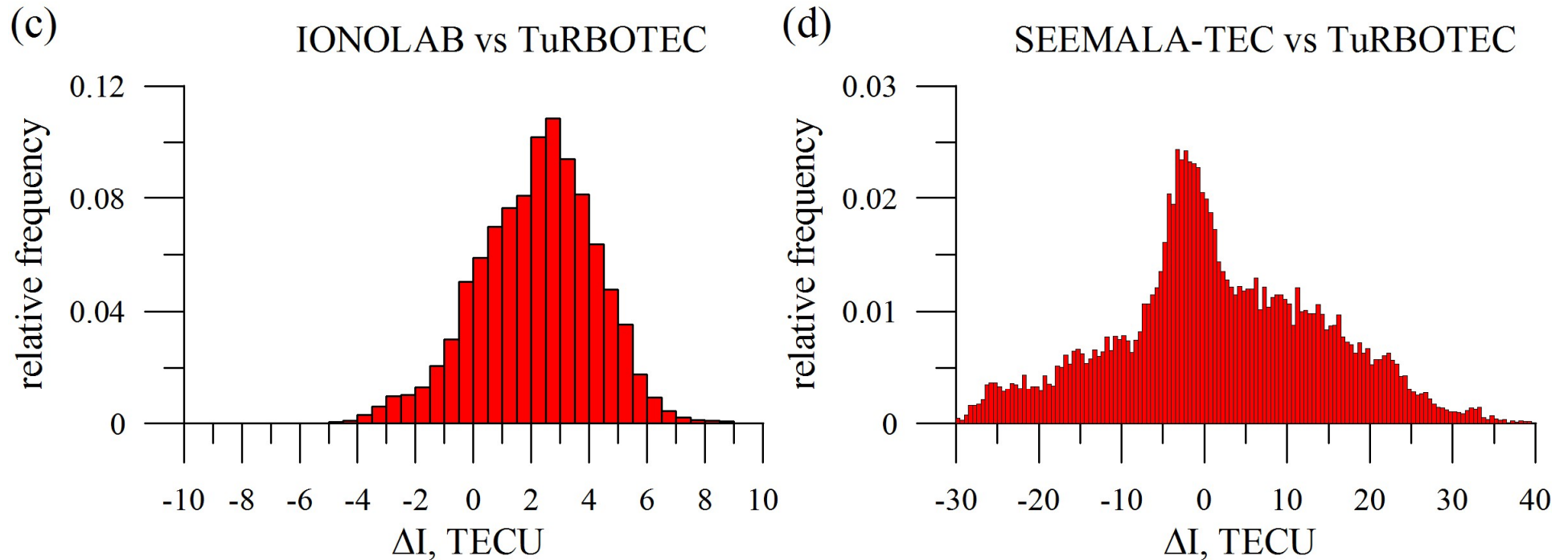
Красная – данные вертикального ПЭС в модели,
пунктир – восстановленное из наклонных данных

Сравнение с другими данными



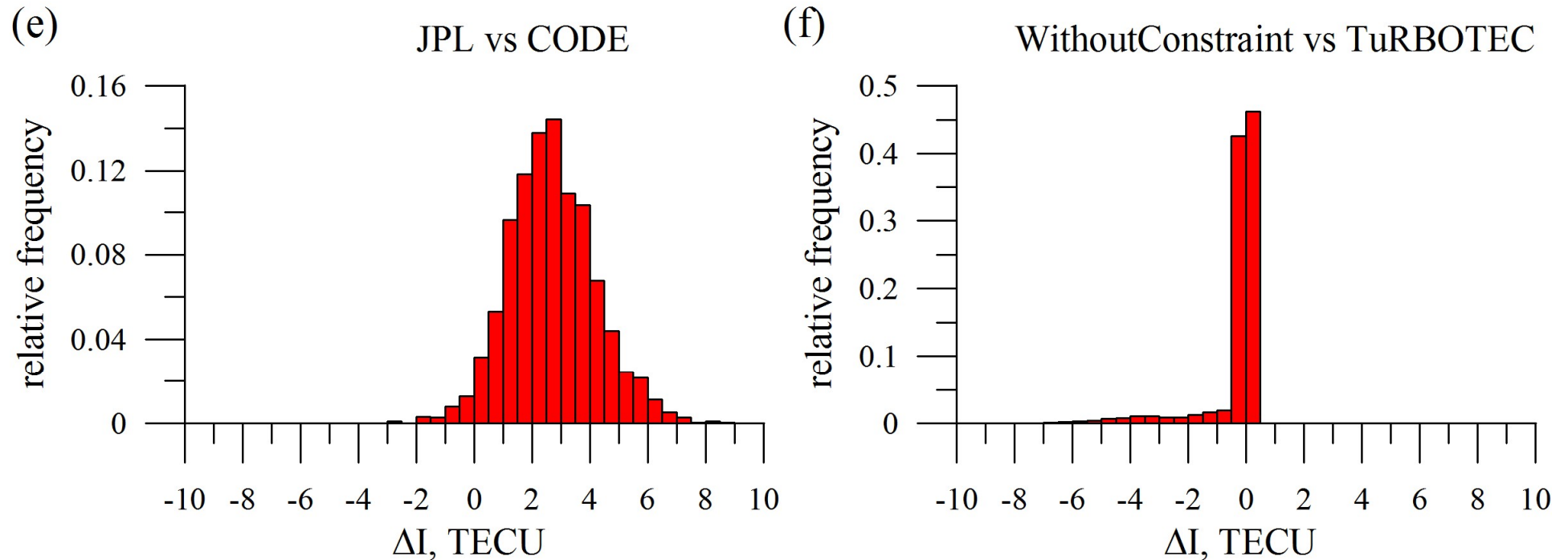
Хорошее согласие с CODE, плохое с Madrigal

Сравнение с другими данными



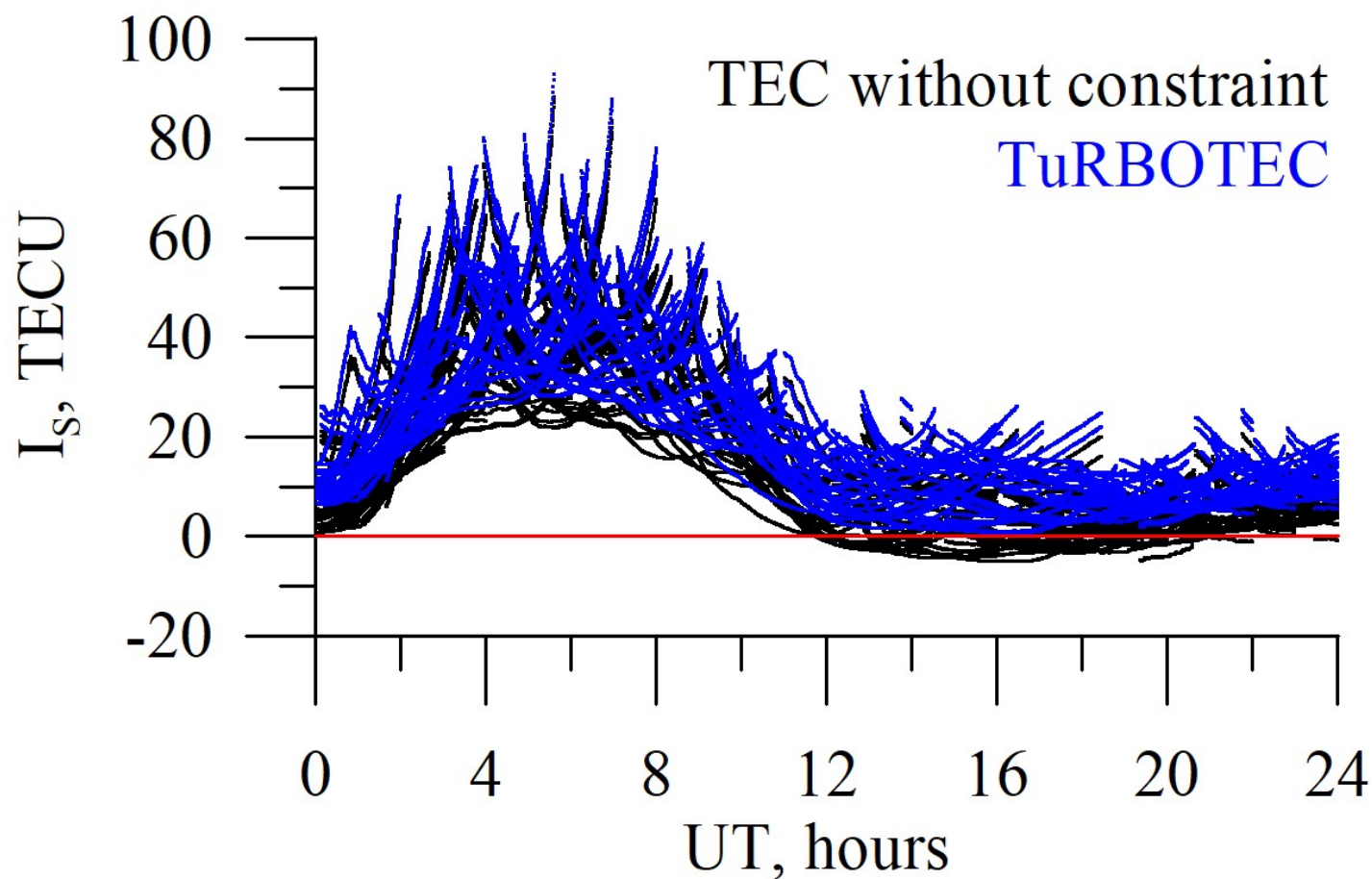
Хорошее согласие с IONOLAB, плохое с Seemala-TEC

Сравнение с другими данными



~9% вертикального ПЭС за счет ограничений
изменяются более чем на 1 TECU.

Наклонное ПЭС



Без ограничений часть значений наклонного ПЭС может оказаться отрицательными. Ограничения обеспечивают положительность значений.

Заключение

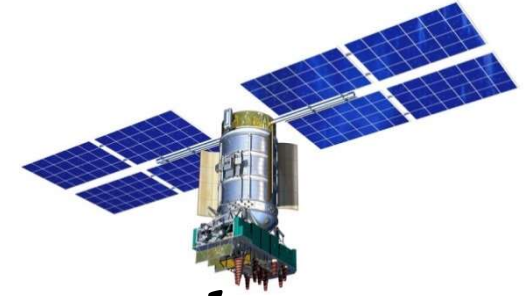
TuRBO TEC (Taylor-series and Bounded-variable-least-squares based ionosphere TEC) гарантированно позволяет получать неотрицательное абсолютное ПЭС как вертикальное, так и на всех наклонных лучах «спутник-приемник».

Наряду с этим TuRBO TEC определяет пространственные и временны производные ПЭС.

yu.yasyukevich@gnss-lab.org



yu.yasyukevich@gnss-lab.org



Спасибо за внимание!

Подробнее в публикации:

Y. Yasyukevich, A. Mylnikova, A. Vesnin. GNSS-Based Non-Negative Absolute Ionosphere Total Electron Content, its Spatial Gradients, Time Derivatives and Differential Code Biases: Bounded-Variable Least-Squares and Taylor Series. *Sensors* 2020, 20 (19), 5702. DOI: 10.3390/s20195702.

Наш проект SIMuRG (<http://simurg.iszf.irk.ru>).

Y. Yasyukevich *et al.* SIMuRG: System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS. *GPS Solutions* 24, 69 (2020). [DOI: 10.1007/s10291-020-00983-2](https://doi.org/10.1007/s10291-020-00983-2).

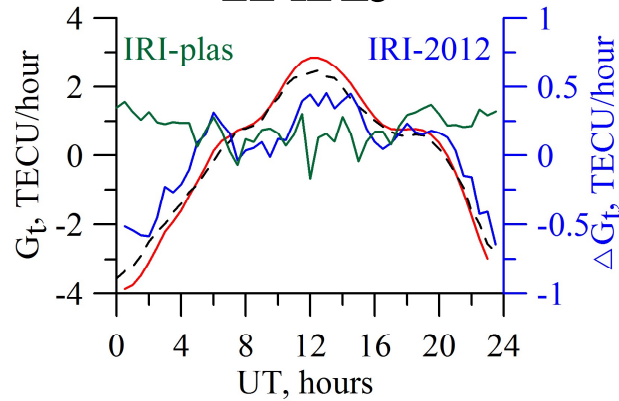
Научно-популярная статья:

Ю.В. Ясюкевич, А.С. Ясюкевич. Взгляд на ионосферу земли через GPS и ГЛОНАСС // Земля и Вселенная. 2020. DOI: 10.7868/S0044394820040064.

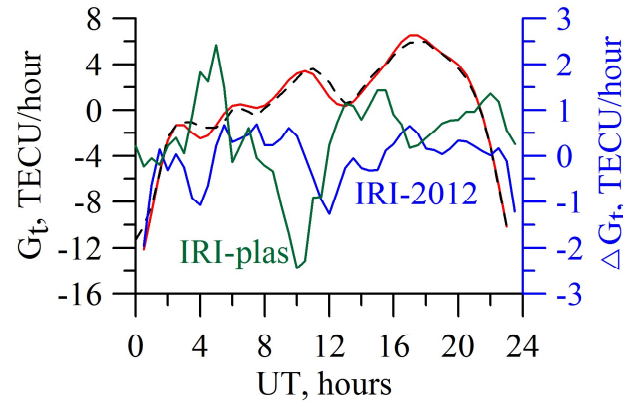
Дополнительные слайды

Производная по времени

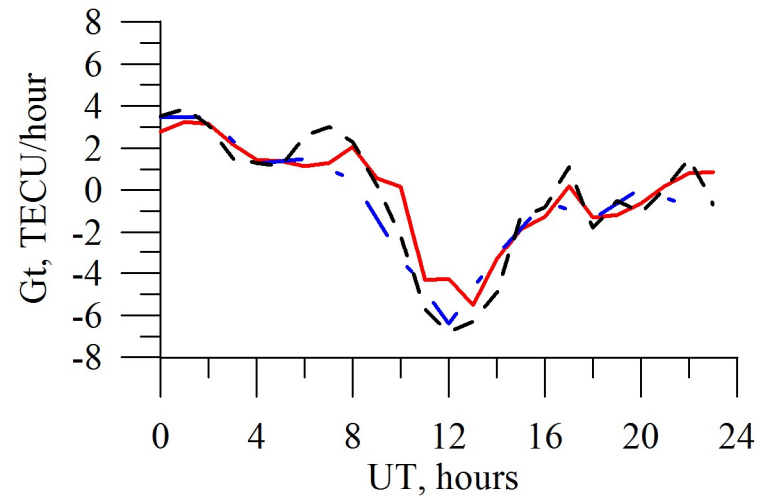
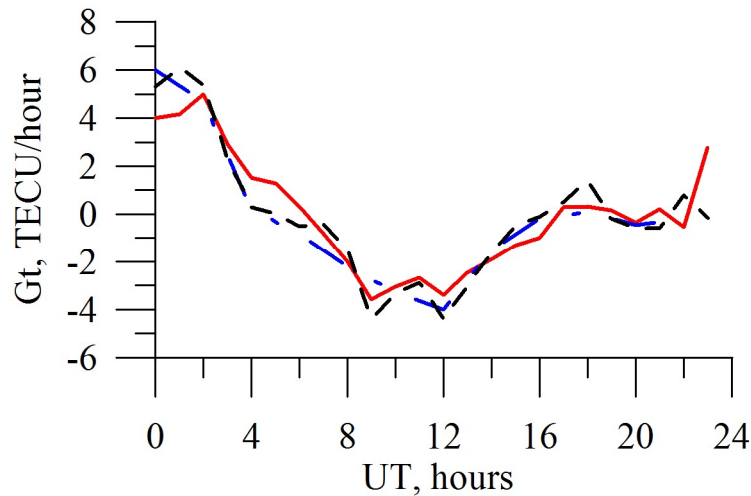
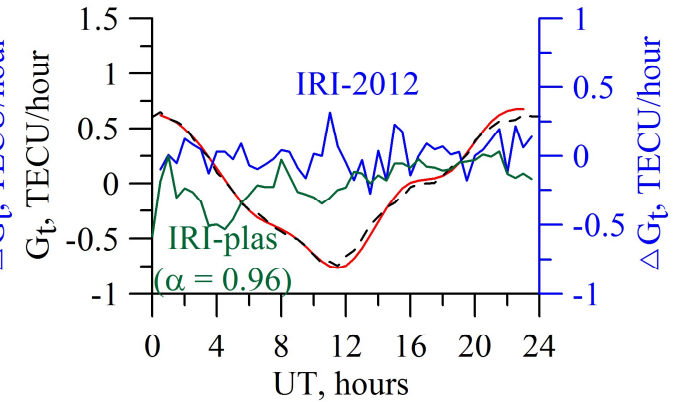
IRKJ



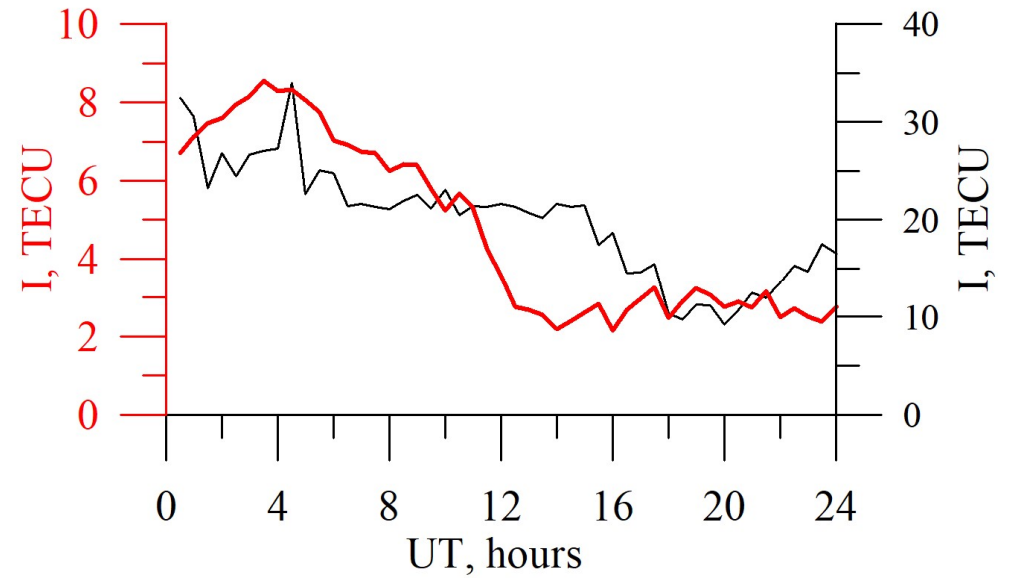
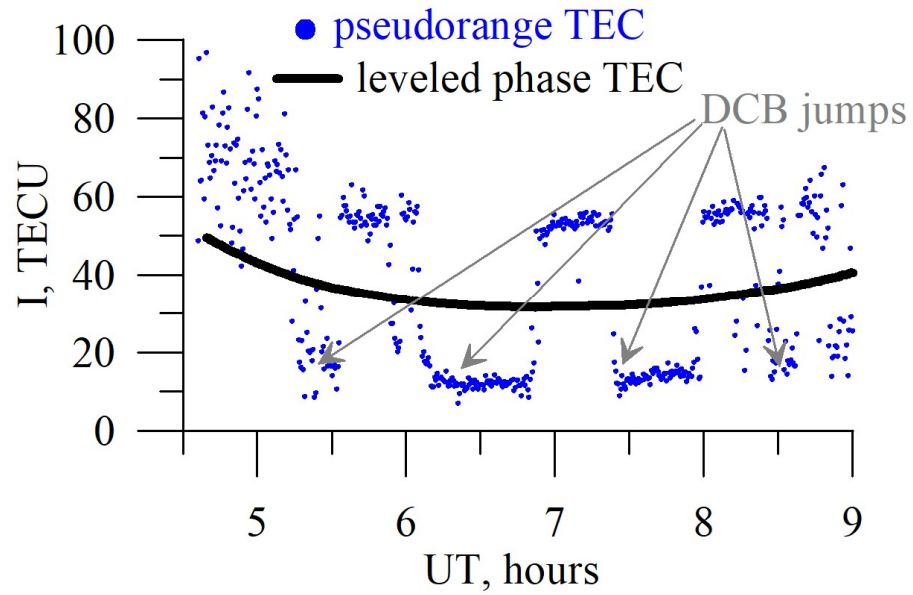
NTUS



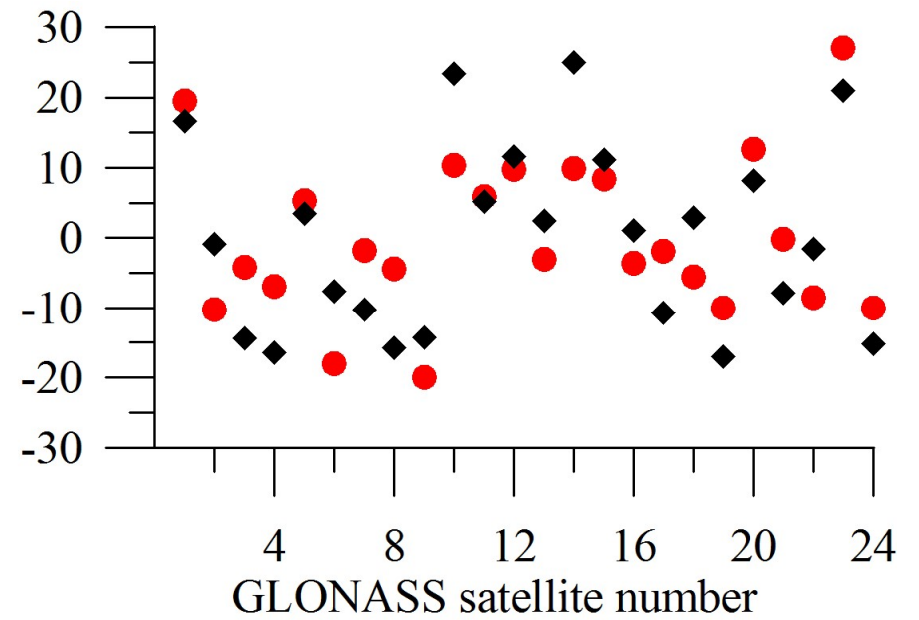
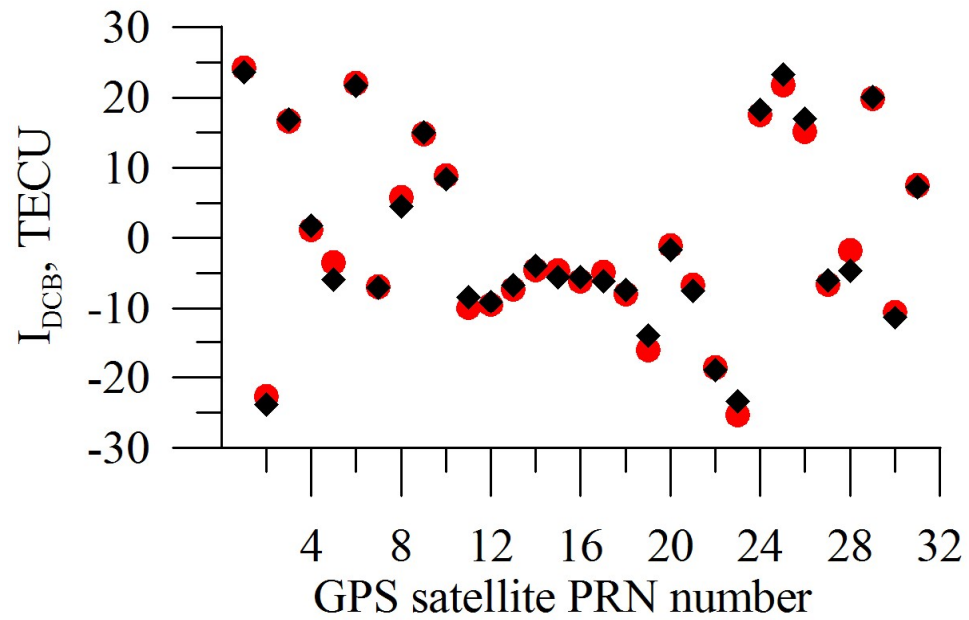
THU2



Проблемы с ДКЗ



ДКЗ ГЛОНАСС



Конвертация наклонного ПЭС в вертикальный

