



Моделирование восстановления по данным ГНСС абсолютного вертикального полного электронного содержания и дифференциальных кодовых задержек

Мыльникова А. А.¹, Ясюкевич Ю. В.^{1 2}

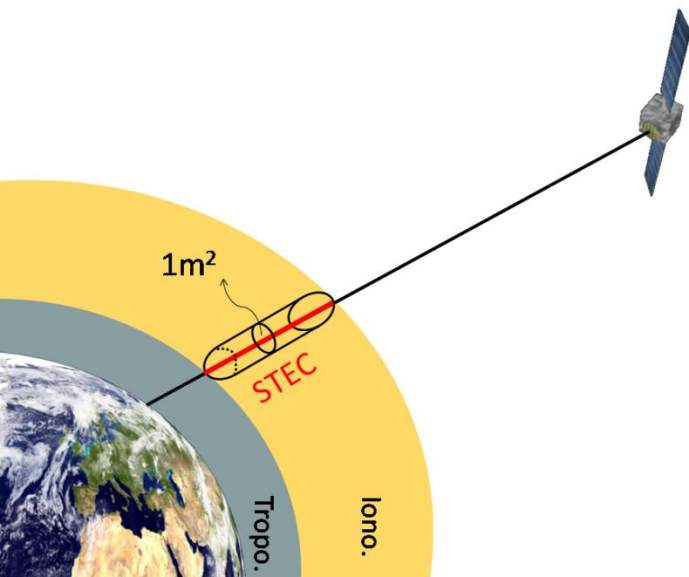
¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН

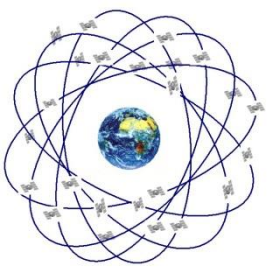
² Иркутский государственный университет

Определение ПЭС

- Глобальные навигационные спутниковые системы позволяют определять полное электронное содержание по кодовым измерениям псевдодальности и измерениям фазы несущей в частотных диапазонах L1 и L2.
- Полное электронное содержание (ПЭС) – число электронов в столбе “спутник-приёмник” с сечением 1 кв. м

$$1\text{TECU} = 10^{16} \text{ эл} / \text{м}^2$$





Дифференциальные кодовые задержки

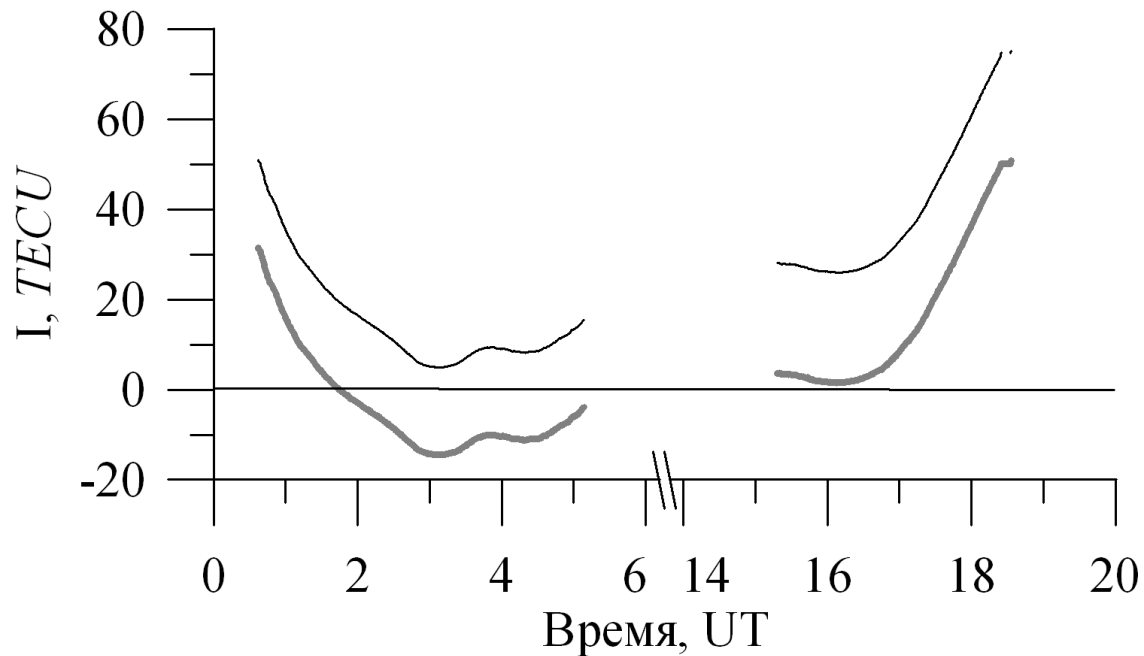
- При определении ПЭС с использованием групповых измерений псевдодальности, существует систематическая ошибка, зависящая и от спутника и от приёмника.
- Ошибка связана с тем что время прохождения сигналов двух диапазонов L1 и L2 в радиочастотных трактах приёмника и спутника различается.
- Такая задержка носит название дифференциальных кодовых задержек - ДКЗ, (Differential code bias).

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) - c \Delta \tau]$$

$$\Delta I_{bias} = - \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{1}{40.308} \cdot c \cdot \Delta \tau$$

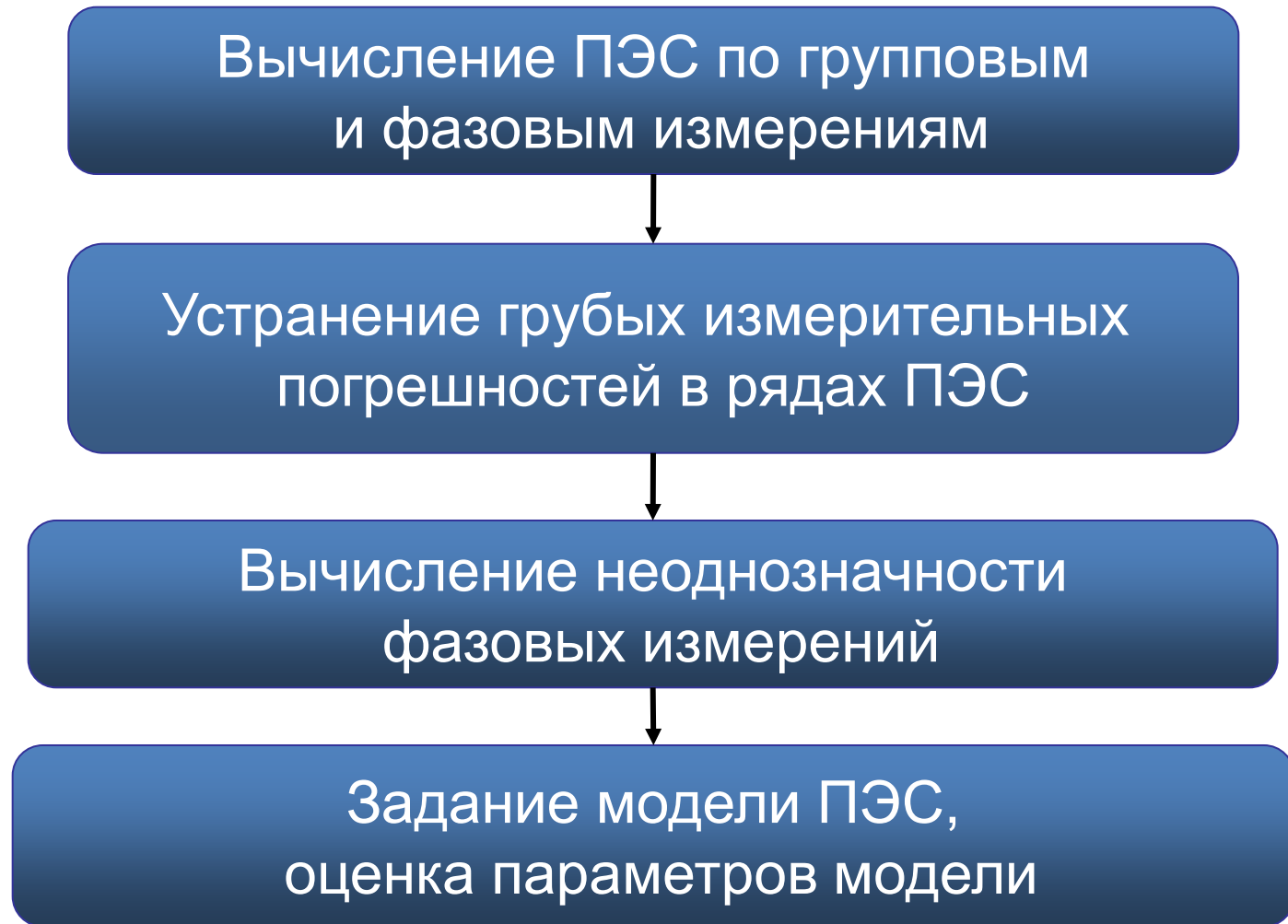
Дифференциальные кодовые задержки

Вследствие погрешности, связанной с ДКЗ, ПЭС может принимать отрицательные нефизические значения.



Абсолютное значение ПЭС с учётом (черная кривая) и без учёта ДКЗ (серая кривая).

Схема алгоритма по определению абсолютного ПЭС и ДКЗ



Вычисление неоднозначности фазовых измерений

$$const = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_p - I_\varphi)_i$$

N – число отдельных измерений

I_p - ПЭС, вычисленное по групповым измерениям

I_φ - ПЭС, вычисленное по фазовым измерениям

Вычисляем ПЭС по фазовым измерениям с учётом фазовой неоднозначности:

$$I_{изм}^i = (I_\varphi + const)_i$$

Модель полного электронного содержания

$$I_M = S_j^i \left\{ I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \cdot \Delta\phi_j^i + G_{q-\phi} \cdot (\Delta\phi_j^i)^2 + G_l \cdot \Delta l_j^i + G_{q-l} \cdot (\Delta l_j^i)^2 + G_t \cdot \Delta t_j^i + G_{q-t} \cdot (\Delta t_j^i)^2 \right\} + I_{BIAS j}$$

где S_j^i – фактор наклона, зависящий от угла пролета спутника:

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

I_V – абсолютное вертикальное ПЭС над приемником;

G_ϕ G_l – линейные пространственные градиенты ПЭС;

$G_{q-\phi}$ G_{q-l} – квадратичные пространственные градиенты ПЭС;

G_t G_{q-t} – временные линейная и квадратичная производные ПЭС;

$\Delta\phi_j^i$ Δl_j^i – разница между координатами подионосферной точки и координатами станции;

I_{BIAS} – неучтённое ПЭС, связанное с ДКЗ.

R_E – средний радиус Земли

$$h_{\max} = 450 \text{ км} \quad \alpha = 0.97$$

Вычисление параметров модели по методу наименьших квадратов

Минимизация функционала

$$U = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{Nj} W_j^i ((I_{uzm}^i)_j - (I_M^i)_j)^2$$

где $W_i^j = \frac{1}{S_i^j} \left[1 + \left(\frac{2 \cdot \Delta t_i^j}{UT_{end} - UT_{beg}} \right)^2 \right]^{-1}$ - Весовой множитель.

$UT_{end} - UT_{beg}$ - Временной интервал в котором производится расчет ПЭС

I_{uzm}^i - ПЭС, рассчитанное по фазовым измерениям с учётом фазовой неоднозначности

полученная система уравнений $Ax=B$ решается численным методом.

Моделирование восстановления абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ

IRI-2012

Коэффициенты – URSI

Включена модель шторма

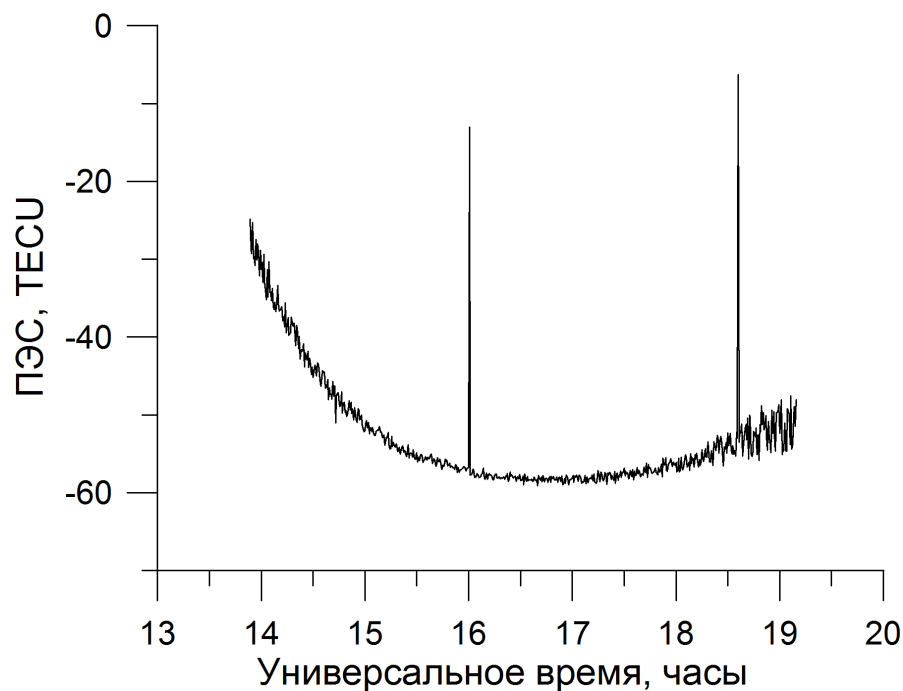
Topside – NeQuick

Уровень шума в ПЭС по групповым измерениям – $0.2 + 0.2 \cdot \cos^2(\theta)$ TECU

Уровень шума в ПЭС по фазовым измерениям – 0.01 TECU

ДКЗ – [-50;50] TECU

Моделировалось наклонное
ПЭС вдоль луча спутник-
приёмник с шагом
интегрирования 10 км



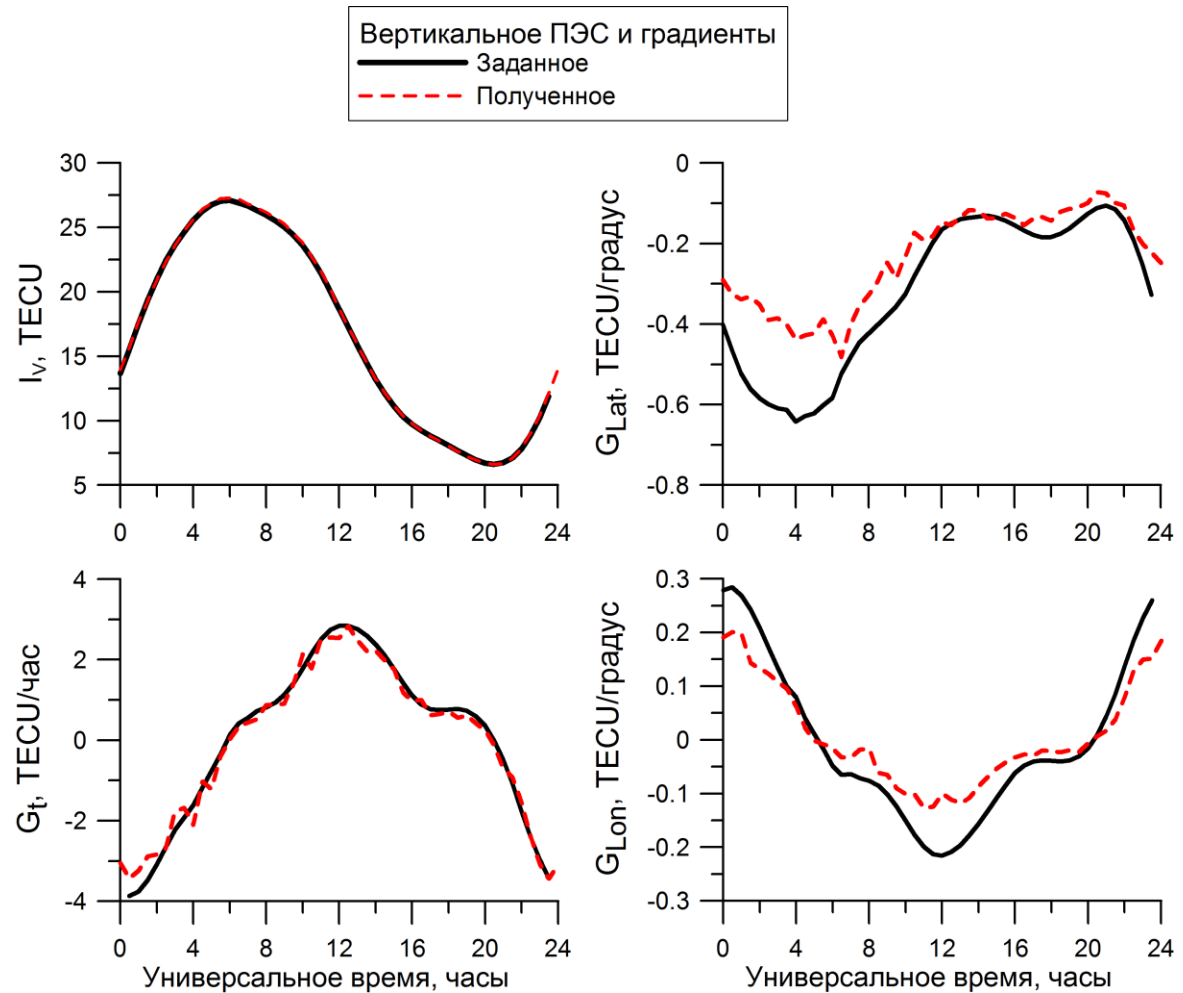
Моделирование восстановления абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ

$$\langle I_V - I_{V_{\text{mod}}} \rangle \approx 0.3 \text{ TECU} / 2.5\%$$

$$\langle G_t - G_{t_{\text{mod}}} \rangle \approx 0.2 \frac{\text{TECU}}{\text{час}} / 15\%$$

$$\langle G_{\text{Lat}} - G_{\text{Lat}_{\text{mod}}} \rangle \approx 0.1 \frac{\text{TECU}}{\text{градус}} / 23\%$$

$$\langle G_{\text{Lon}} - G_{\text{Lon}_{\text{mod}}} \rangle \approx 0.05 \frac{\text{TECU}}{\text{градус}} / 43\%$$



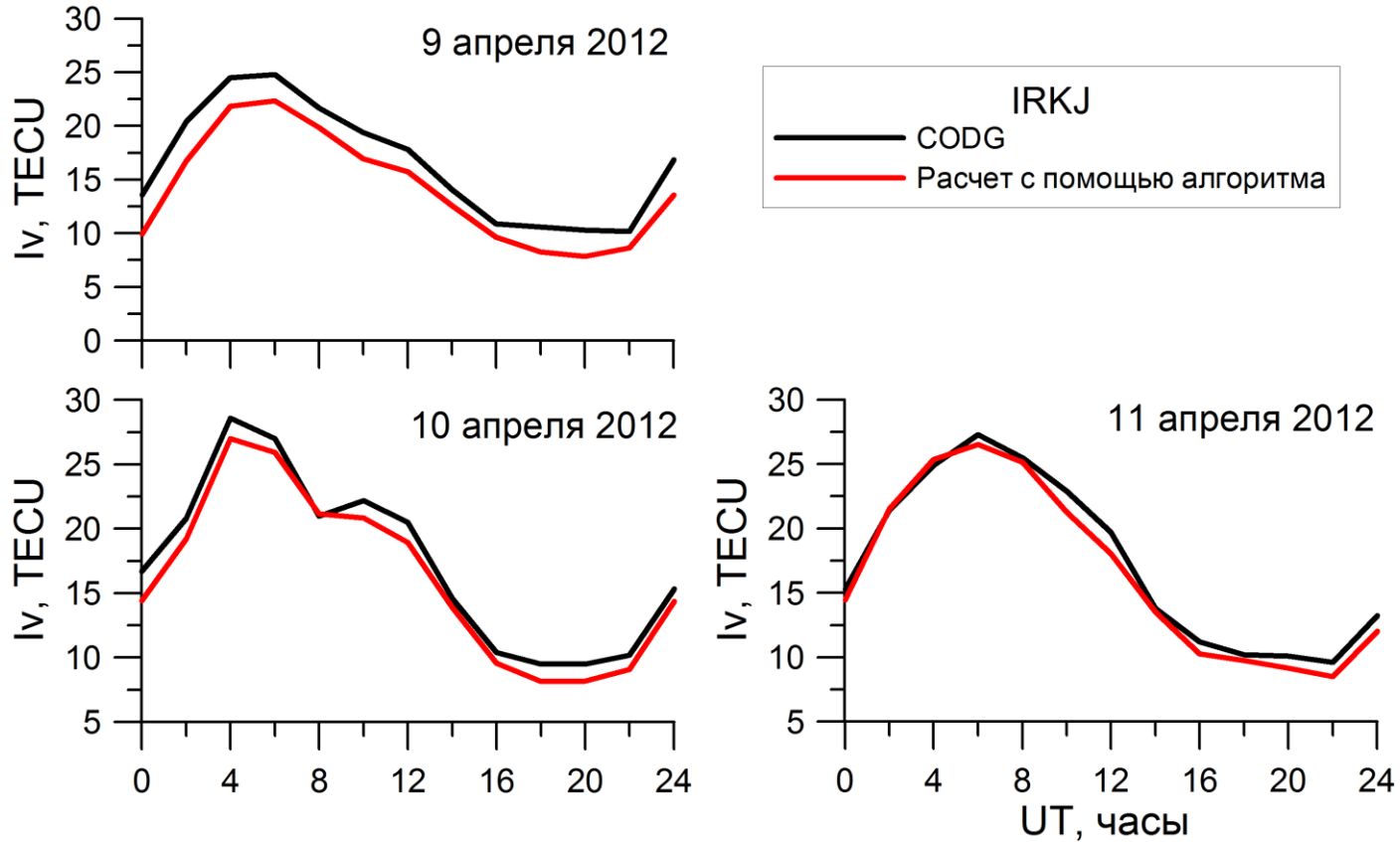
Моделирование восстановления абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ



GPS: $\langle I_{BIAS} - I_{BIAS \text{ mod}} \rangle \approx 0.006 \text{ TECU} / 1.7 \%$

ГЛОНАСС: $\langle I_{BIAS} - I_{BIAS \text{ mod}} \rangle \approx 0.1 \text{ TECU} / 1.5 \%$

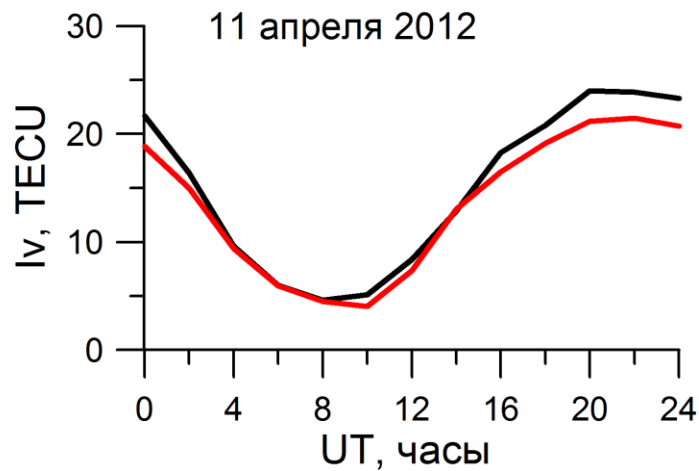
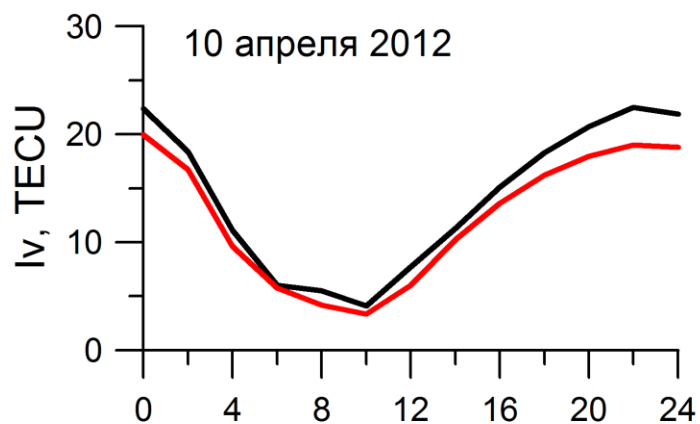
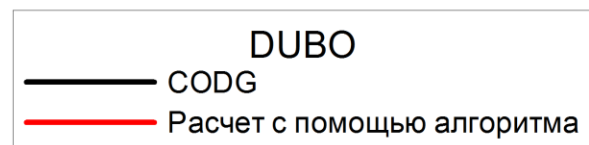
Суточная динамика ПЭС



$$\langle I_v - I_{v_{CODG}} \rangle \approx 1.5 \text{ TECU} / 10\%$$

$$\max I_v - I_{v_{CODG}} \approx 3.5 \text{ TECU} / 17\%$$

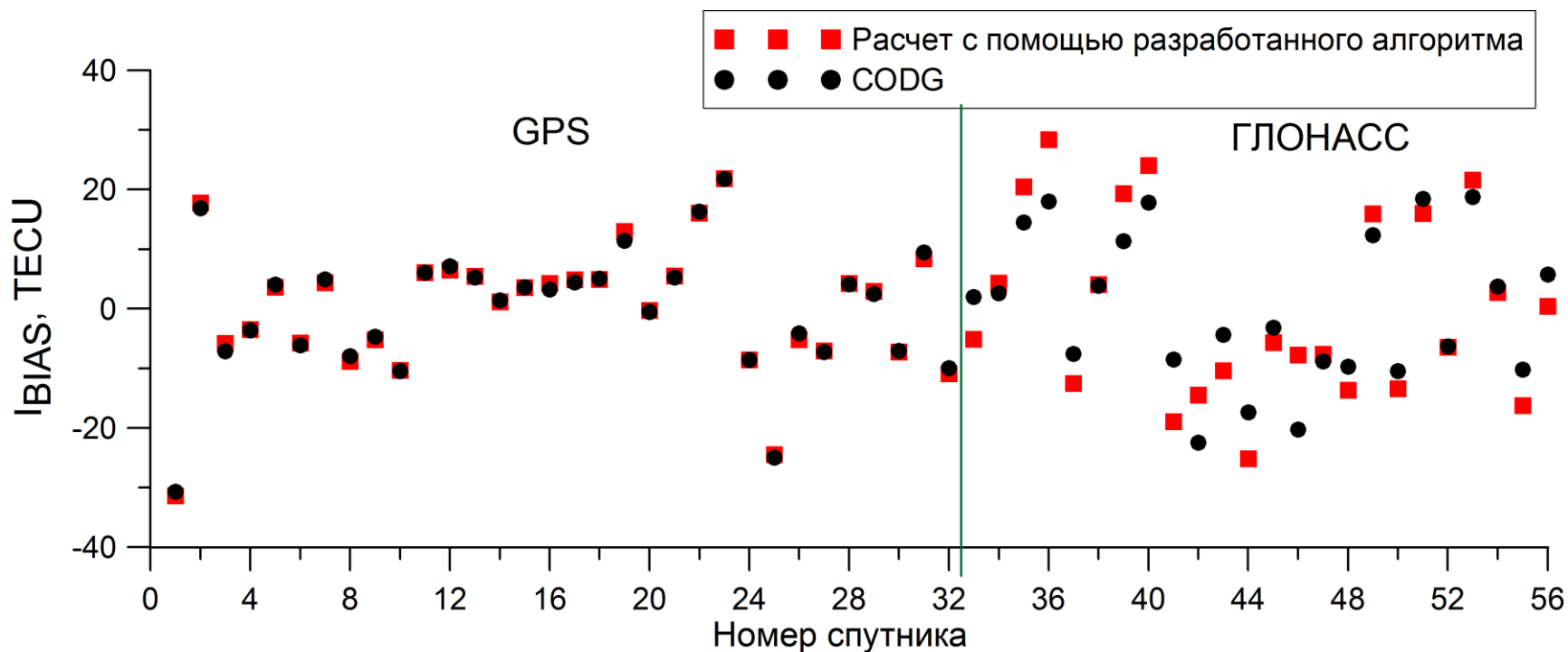
Суточная динамика ПЭС



$$\langle Iv - Iv_{CODG} \rangle \approx 1.6 TECU / 11\%$$

$$\max Iv - Iv_{CODG} \approx 3.5 TECU / 15\%$$

Ошибка в ПЭС, связанная с дифференциальными кодовыми задержками



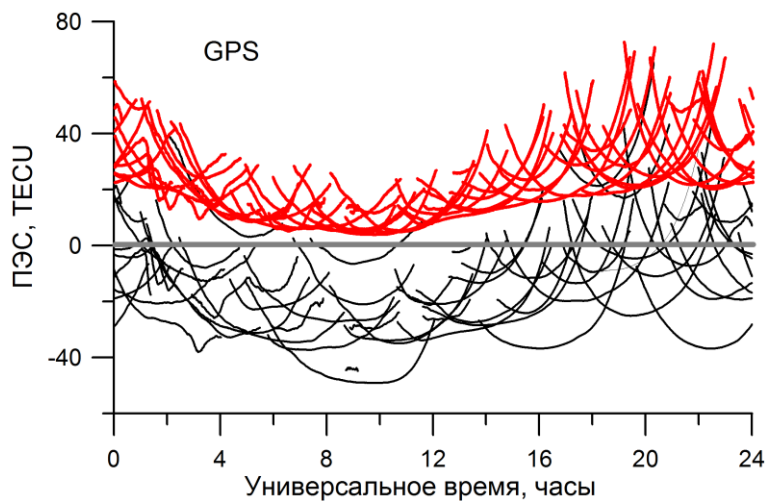
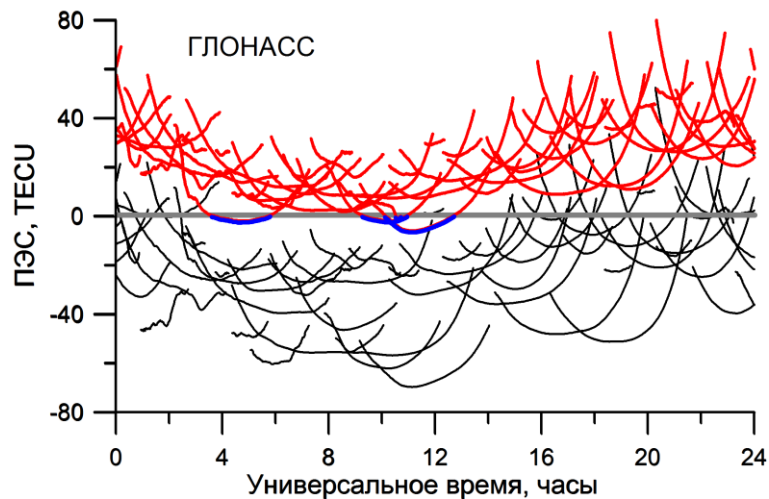
GPS: $\langle I_{BIAS} - I_{BIAS \text{ CODG}} \rangle \approx 0.48 \text{ TECU} / 9.3 \%$

ГЛОНАСС: $\langle I_{BIAS} - I_{BIAS \text{ CODG}} \rangle \approx 5 \text{ TECU} / 62 \%$

Наклонное ПЭС, скорректированное на ДКЗ

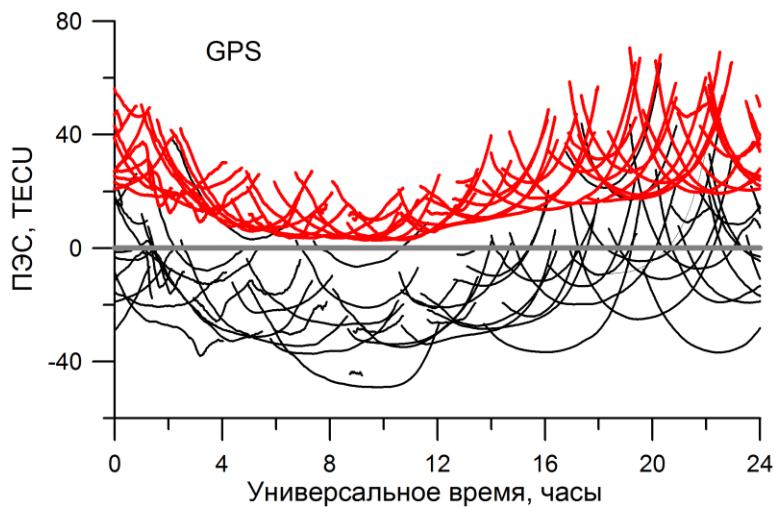
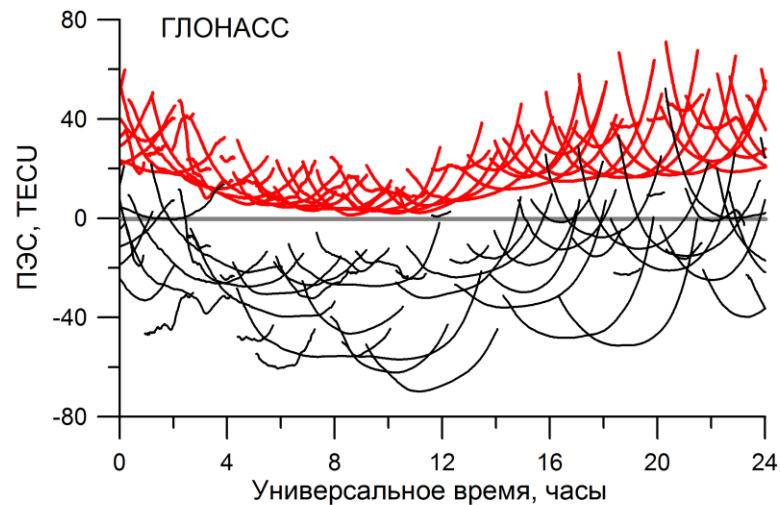
Без коррективки на ДКЗ

С коррективкой на ДКЗ, полученные CODG



Без коррективки на ДКЗ

С коррективкой на ДКЗ, полученные с помощью алгоритма



Заключение

- Разработанная методика позволяет определять абсолютное вертикальное ПЭС по данным отдельных приемников GPS/ГЛОНАСС.
- Смоделированное абсолютное вертикальное ПЭС восстанавливается с большой точностью, относительная погрешность не превышает 2.5% (0.3 TECU).
- Восстановленные пространственные градиенты и временная производная качественно согласуются с заданными моделью значениями.
- Полученная динамика ПЭС качественно и количественно согласуется с динамикой ПЭС по данным лаборатории CODG. Максимальное отклонение от данных лаборатории CODG составляет 3.5 TECU.
- ДКЗ в каналах спутников GPS, восстановленные с помощью алгоритма, хорошо согласуются с данными лаборатории CODG (0.5 TECU).
- ДКЗ в каналах спутников ГЛОНАСС, восстановленные с помощью алгоритма, расходятся с данными CODG в среднем на 5 TECU.



Спасибо за внимание!