

**Определение параметров вращения Земли  
из РСДБ наблюдений с помощью  
программного комплекса «Ариадна»**

**В.Е.Жаров <sup>1</sup>, С.Л.Пасынок <sup>2</sup>, А.Н.Синёв <sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> ГАИШ МГУ, Москва*

*<sup>2</sup> ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево*

**«Фундаментальное и прикладное  
координатно-временное и  
навигационное обеспечение» (КВНО-2017)  
Санкт-Петербург, 17-20 апреля 2017**

# Средства для определения параметров вращения Земли (ПВЗ)

- 1) Глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС): ГЛОНАСС и GPS
- 2) Лазерная локация спутников (ЛЛС)
- 3) Лазерная локация Луны (ЛЛЛ)
- 4) Доплеровская система DORIS
- 5) Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ)
- 6) Системы лазерных гироскопов

# Определение ПВЗ

Параметры вращения Земли (ПВЗ) – углы, определяющие ориентацию земной системы координат (ЗСК) относительно небесной системы координат (НСК):

$x_p, y_p$ -координаты полюса,

UT1-всемирное время,

$\Delta\varepsilon, \Delta\psi$ -нутація в наклоне и долготе или

$X, Y$ -координаты небесного промежуточного полюса в НСК

## Вклад указанных средств в определение ПВЗ и определение систем координат

	ГНСС	ЛЛС	ЛЛЛ	DORIS	РСДБ
Реализация НСК					***
Реализация ЗСК	***	**		***	**
Прецессия, нутация	*	*	**		***
Всемирное время UT1			*		***
Координаты полюса	***	*		*	***

1. Вклад систем в определение ПВЗ различный
2. Каждая система имеет достоинства и недостатки, вносит в оценки ПВЗ присущие ей систематические ошибки
3. Это приводит к смещению оценок ПВЗ; при использовании только одной системы это смещение трудно определить, так как истинные значения ПВЗ не известны.
4. Комбинированное решение



объединение решений  
различных систем

(использование общих параметров)



объединение решений  
отдельной системы

# Цель работы

1. Разработка алгоритмов и методов уравнивания отдельных суточных и часовых сеансов РСДБ-наблюдений и генерирование SINEX-файлов (Solution INdependent EXchange format)
2. Разработка алгоритмов и методов уравнивания нескольких суточных сеансов РСДБ-наблюдений для оперативной оценки ПВЗ и улучшения стабильности решения
3. Использование SINEX-файлов для построения комбинированного решения
4. Преимущество этого метода состоит в использовании нормальных уравнений, полученных для отдельных сеансов, и полной статистической информации (ковариационной матрицы) об отдельном решении

# База данных Международной службы РСДБ (IVS)

- 1) Наблюдения с 1984 по 2016 г.
- 2) Суточные сеансы – продолжительность 24 часа, работали не менее трех телескопов, наблюдались 10-70 источников, около 200 наблюдений на каждом телескопе (программы IVS-R1, IVS-R2)
- 3) Часовые сеансы – продолжительность 1 час, 2-5 телескопов (программы Intensive)

# Алгоритм обработки

Каждый сеанс обрабатывается независимо от других.

Используется стандартный подход: система условных уравнений преобразуется к системе нормальных уравнений относительно устойчивых параметров (т.е. параметров, которые можно считать постоянными во время отдельного сеанса)

Определяются: ПВЗ, (дополнительно: поправки к координатам источников, координатам телескопов) или только UT1 (для Intensive)  
рассинхронизация и ход часов,  
поправки к тропосферной задержке

Результат записывается в SINEX-файл



# Основные этапы обработки РСДБ наблюдений:

1. Вычисление с максимальной точностью расчётного значения задержки:

$$\tau_c = \frac{1}{c} \vec{B} \cdot \vec{s} + \Delta \tau$$

$$\tau_c(t) = F(t, X_i, Y_i, Z_i, \dot{X}_i, \dot{Y}_i, \dot{Z}_i, \Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \alpha_j, \delta_j, UT, x_p, y_p, \Delta \psi, \Delta \varepsilon, \dots)$$

2. Оценивание параметров линеаризованной модели:

$$\tau_o - \tau_c|_t = \sum_k \left. \frac{\partial \tau_c}{\partial P_k} \right|_t \Delta P_k(t) + \varepsilon$$

$$\vec{l} = A\vec{x} + \varepsilon$$

Основной цикл вычислений

Объявление путей к каталогам

Объявление структур: source, station, scan

Выбор файла (файлов) данных

Чтение констант

Чтение каталогов

Чтение файла данных и анализ: определение числа телескопов, источников, числа наблюдений, сортировка наблюдений по базам, телескопам, времени, отбраковка плохих наблюдений

Определение среднего момента наблюдений ( $T_{mean}$ )

Интерполяция параметров вращения Земли на время  $T_{mean}$

Вычисление координат телескопов: находятся декартовы, геодезические, геоцентрические координаты, матрицы поворота из локальной системы VEN к ITRF

Блок редукции наблюдений на момент времени  $t$

Формирование 1-го, 2-го, ... K-го условного уравнения: правая часть равна  $(\tau_{obs} - \tau_{calc})(t)$  или  $(f_{obs} - f_{calc})(t)$  левая часть - матрица производных  $\tau_{calc}(t)$  по параметрам или матрица производных  $f_{calc}(t)$  по параметрам

Преобразование момента времени  $t$ : UTC - TAI - JD -  $T_{ehp}$

Интерполяция параметров вращения Земли на момент  $t$

Вычисление эфемерид Солнца, Луны, планет

Вычисление фундаментальных аргументов:  $I, I', F, D, \Omega$

Вычисление прецессионных и нутационных углов, матриц прецессии и нутации, частных производных матриц по различным углам

Основной цикл вычислений

Вычисление звездного времени момента наблюдений  $t$ , матрицы поворота Земли, производных матрицы по времени

Вычисление матрицы поворота из-за движения полюса, частных производных матрицы по времени

Вычисление матрицы поворота  $W$  от ITRF к GCRS, первых двух производных по времени

Вычисление поправок к радиус-вектору телескопа: из-за твердотельных приливов, из-за океанических приливов, из-за полюсного прилива, из-за термических деформаций, из-за атмосферной нагрузки, учет смещения опорной точки от точки пересечения осей

Вычисление вектора базы на эпоху J2000.0

Вычисление задержки в тропосфере и частных производных задержки по влажной тропосферной задержке в зените

Вычисление геометрической задержки  $\tau_{calc}(t)$

Блок вычисления частных производных задержки по: координатам телескопов, координатам источников, параметрам вращения Земли, по прецессионным параметрам, по числам Лява, по параметрам атмосферной нагрузки.

Сохранение в памяти полной строки матрицы частных производных задержки

Блок анализа

Выбор интересующих нас параметров модели и генерирование урезанной матрицы частных производных

Решение системы условных уравнений

Вывод результатов вычислений

# Решение системы

Параметры, входящие в уравнение, имеют разную физическую природу и должны оцениваться отдельно:

- 1) «Глобальные» (постоянные или почти постоянные на протяжении всего цикла наблюдений):  
координаты источников, телескопов, числа Лява, постоянные прецессии и др.
- 2) «Локальные» (средние значения на протяжении сеанса наблюдений): ПВЗ
- 3) Стохастические: задержка в тропосфере, ход часов

# Схема уравнивания отдельного сеанса

Для отдельного сеанса систему можно записать в двухгрупповом виде относительно локальных ( $x_1$ ) и стохастических параметров ( $x_2$ ):

$$\begin{aligned} A\vec{x} + \vec{\varepsilon} &= \vec{l} && \rightarrow && A\vec{x}_1 + B\vec{x}_2 + \vec{\varepsilon} = \vec{l} \\ \tilde{x} = (A'PA)^{-1}A'P\vec{l} &&& \rightarrow && \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & H \\ H' & G \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \\ &&& && (F - HG^{-1}H')\tilde{x}_1 = l_1 - HG^{-1}l_2 \\ &&& && \tilde{A}\tilde{x}_1 = \tilde{l} \end{aligned}$$

# Варианты обработки

1) Для оперативной обработки каждый сеанс обрабатывается независимо от других

Определяются: ПВЗ, ход часов, тропосферные поправки (поправки к координатам источников, ....)

Сеанс разбивается на сегменты, в каждом из них ход часов, тропосферные поправки представляются полиномами

Матрица имеет размер: 1000 – 20000 уравнений,  
200 – 500 неизвестных

## Intensive

Определяются: UT1, ход часов, тропосферные поправки

Матрица имеет размер: 100 – 200 уравнений, 10 – 15 неизвестных

Используется МНК с ограничениями

# Проблемы обработки

Отсутствие метеоданных для одной (нескольких) станций РСДБ

Вклад тропосферы во «влажную» задержку составляет в расстоянии от 15-20 см в зените до нескольких метров вблизи горизонта.

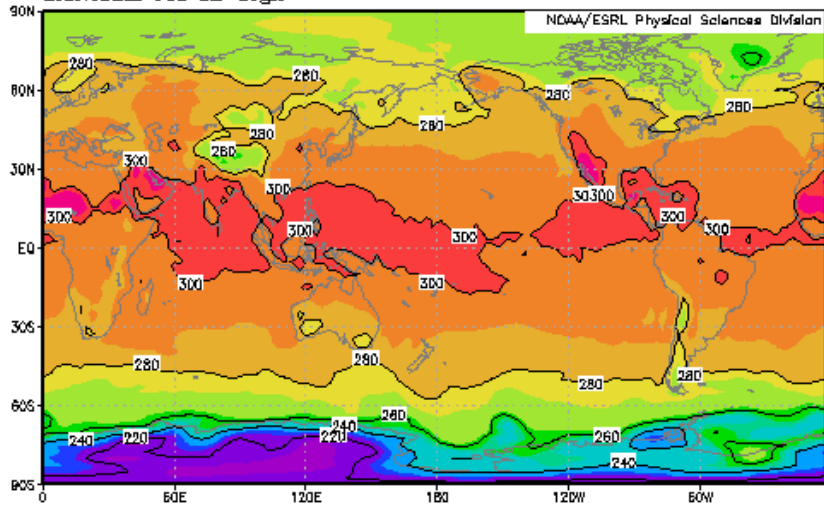
Модель + уравнивание при решении системы позволяет оценить вклад тропосферы с ошибкой  $\sim 1$  см (т.е. при длине базы 5000 км позиционная ошибка  $\sim 0.4$  мс дуги).

Метеоданные интерполируются на основе глобальных полей давления, температуры и влажности (4 раза/сутки)

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

lon: plotted from 0.00 to 357.50  
lat: plotted from -90 to 90.00  
t: Jun 1 2015 00 Z  
lev: 0

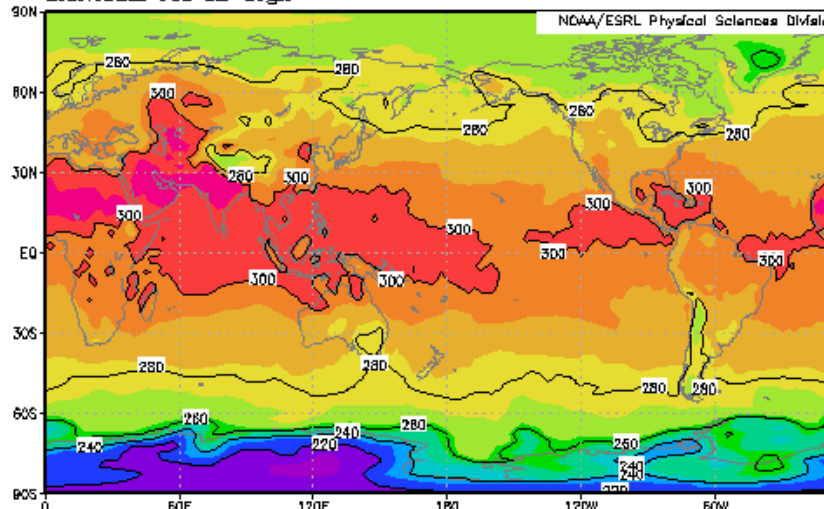
Individual Obs air degK



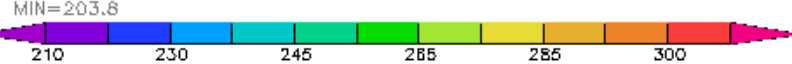
MAX=312.5 NCEP Reanalysis Surface Level GrADS image

lon: plotted from 0.00 to 357.50  
lat: plotted from -90 to 90.00  
t: Jun 1 2015 12 Z  
lev: 0

Individual Obs air degK

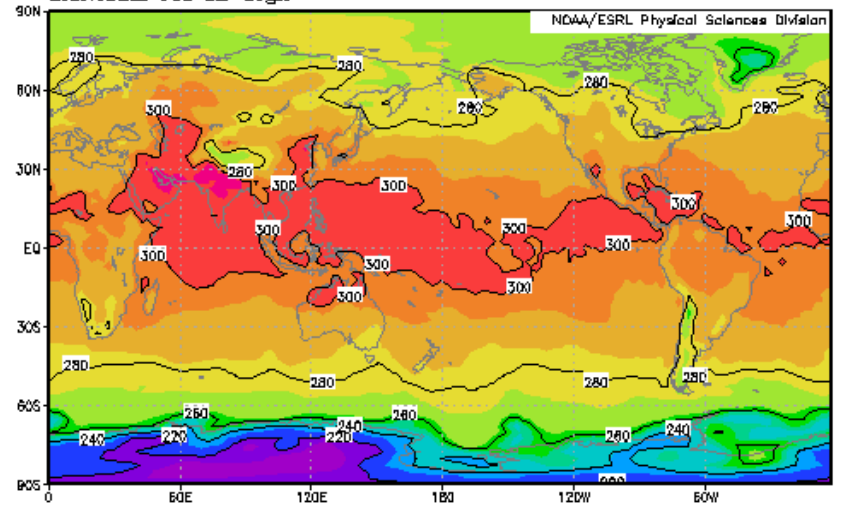


MAX=318.2 MIN=203.8 NCEP Reanalysis Surface Level GrADS image



lon: plotted from 0.00 to 357.50  
lat: plotted from -90 to 90.00  
t: Jun 1 2015 06 Z  
lev: 0

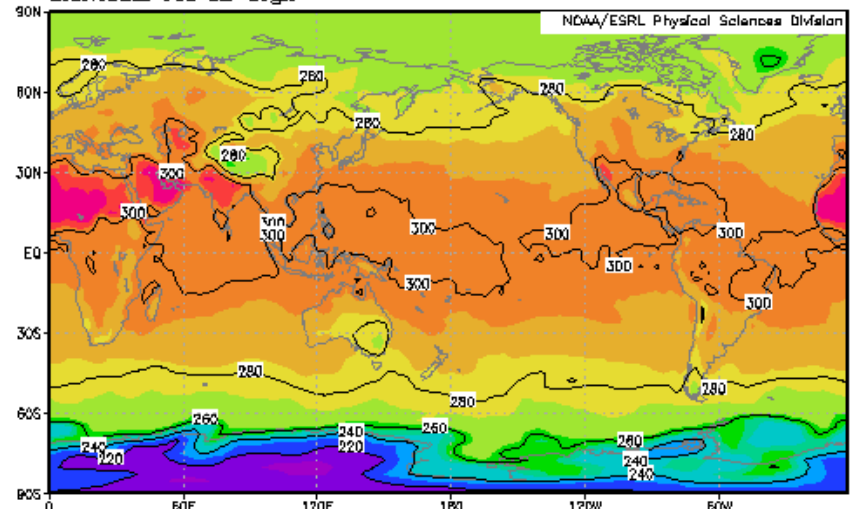
Individual Obs air degK



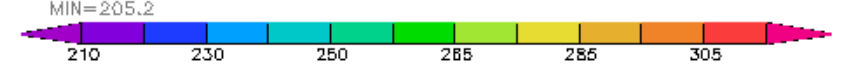
MAX=316.7 NCEP Reanalysis Surface Level GrADS image

lon: plotted from 0.00 to 357.50  
lat: plotted from -90 to 90.00  
t: Jun 1 2015 18 Z  
lev: 0

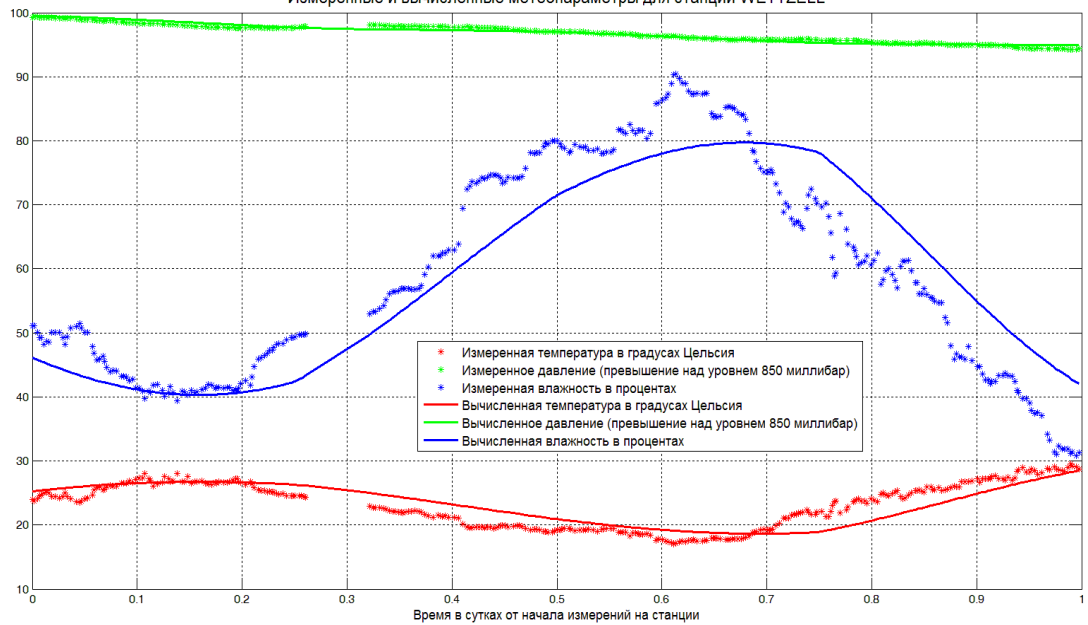
Individual Obs air degK



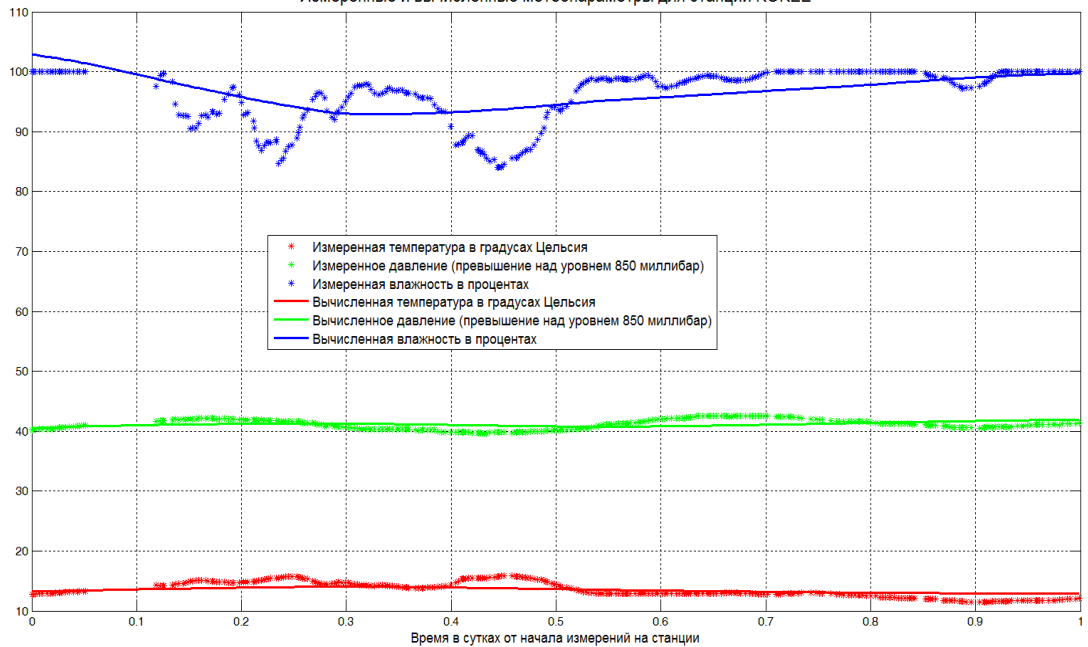
MAX=318.5 MIN=205.2 NCEP Reanalysis Surface Level GrADS image



Измеренные и вычисленные метеопараметры для станции WETTZELE



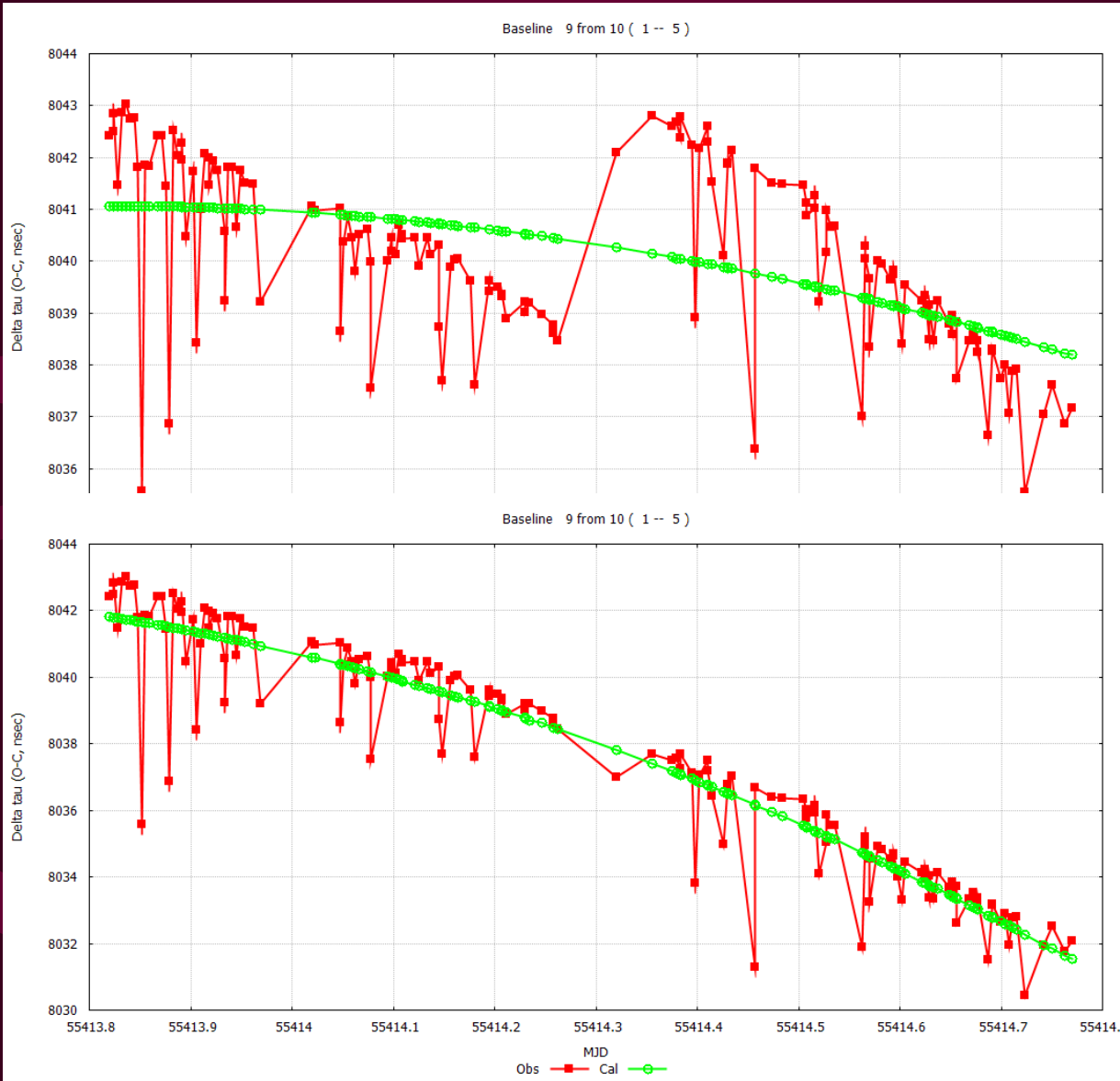
Измеренные и вычисленные метеопараметры для станции КОКЕЕ

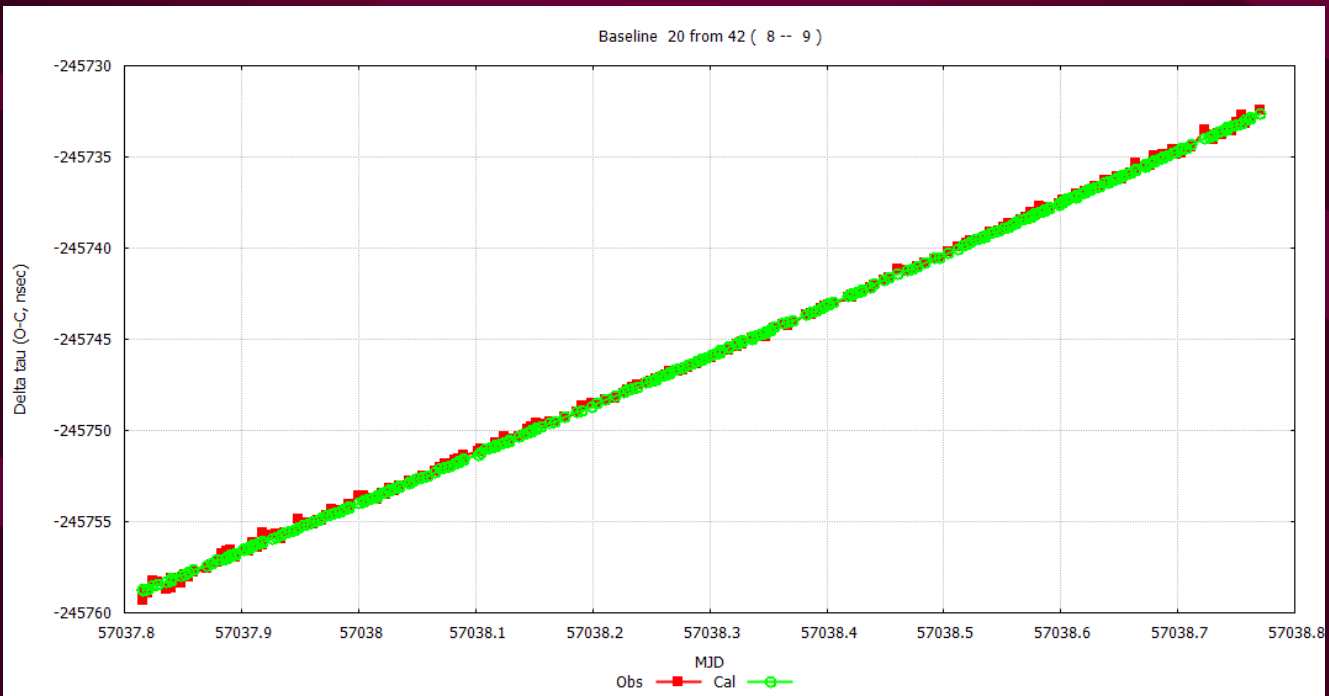
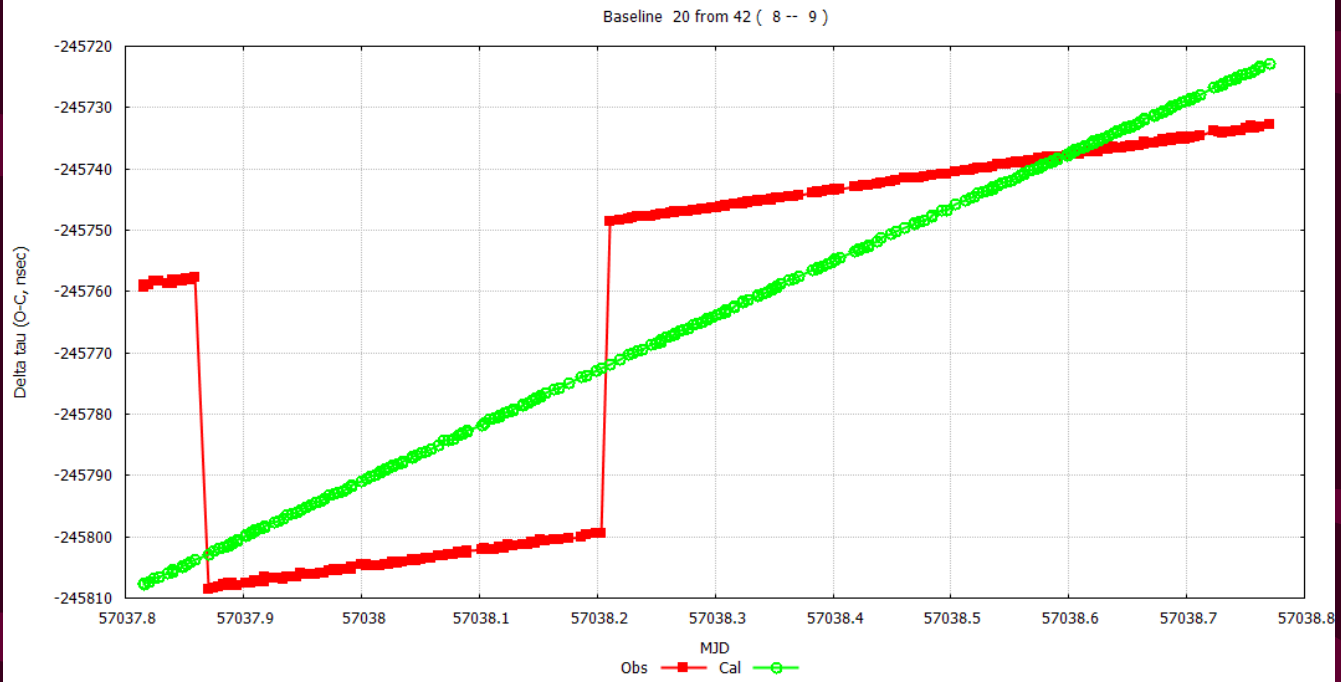




# Проблемы обработки

## Скачки часов на одной (нескольких) станциях РСДБ





# Варианты обработки

## 2) Комбинированное решение

Выбранные сеансы обрабатываются совместно.

Определяются:

глобальные параметры: поправки к координатам источников, телескопов;

локальные параметры: ПВЗ

стохастические параметры (ход часов, тропосферные поправки и др.) уже исключены

# Уравнения связи

1. Если  $m$  – число уравнений,  $n$  – число неизвестных параметров ( $m > n$ ), то ранг матрицы  $A(m \times n)$  неполный:

$$\text{rang } A < n.$$

2. Матрица  $A$  имеет неполный ранг:

- а) произвольный перенос начала и поворот НСК
- б) произвольный перенос начала и поворот ЗСК
- в) относительность хода часов на станциях

# Комбинированное решение и уравнения связи

Условие NNR (суммарный поворот телескопов относительно ЗСК)

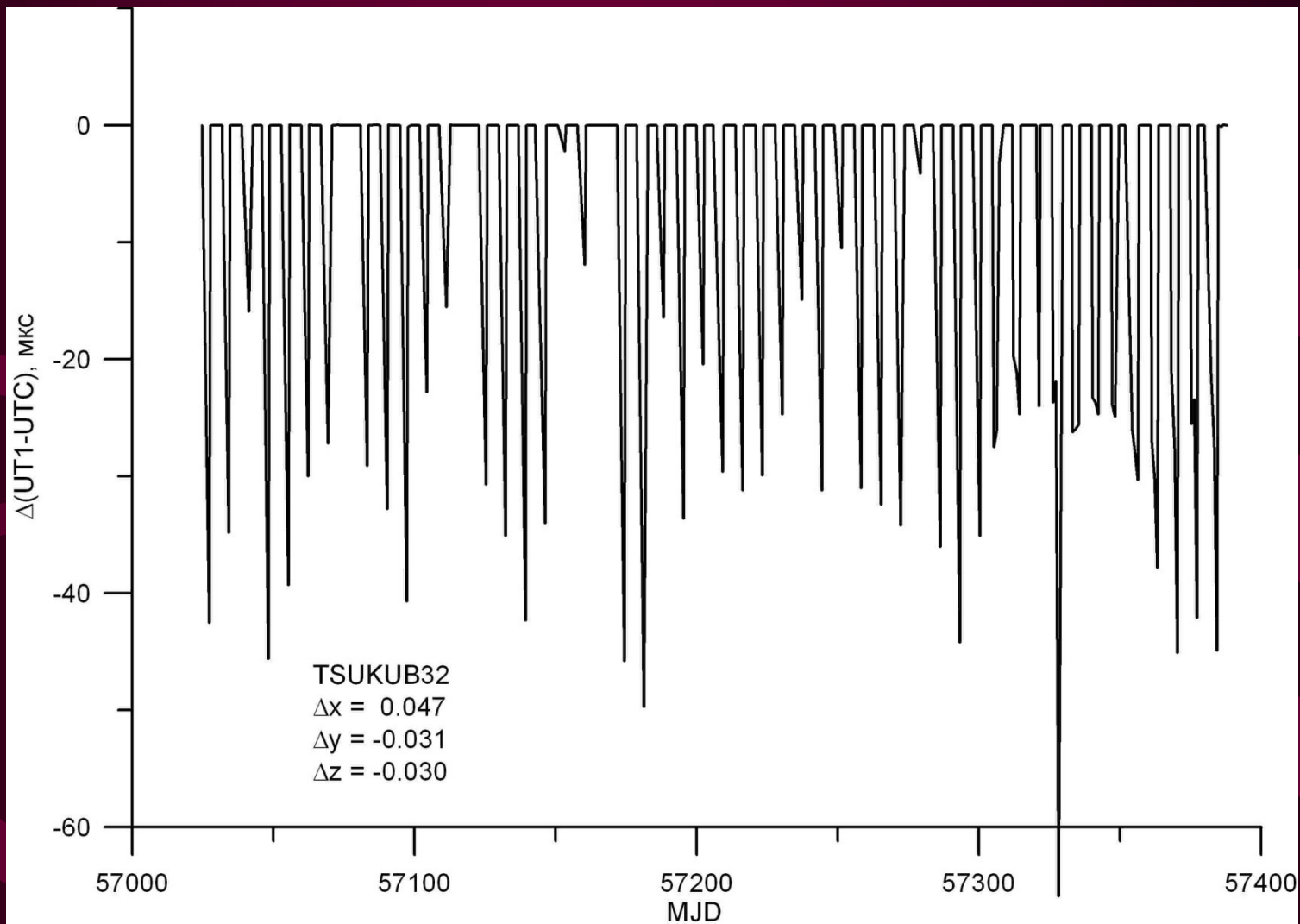
$$\sum_{i=1}^L \frac{\vec{R}_i \times \Delta \vec{R}_i}{|\vec{R}_i|^2} = 0$$

Требуется или нет вычислять поправки  $\Delta R_i$  для каждого сеанса ?

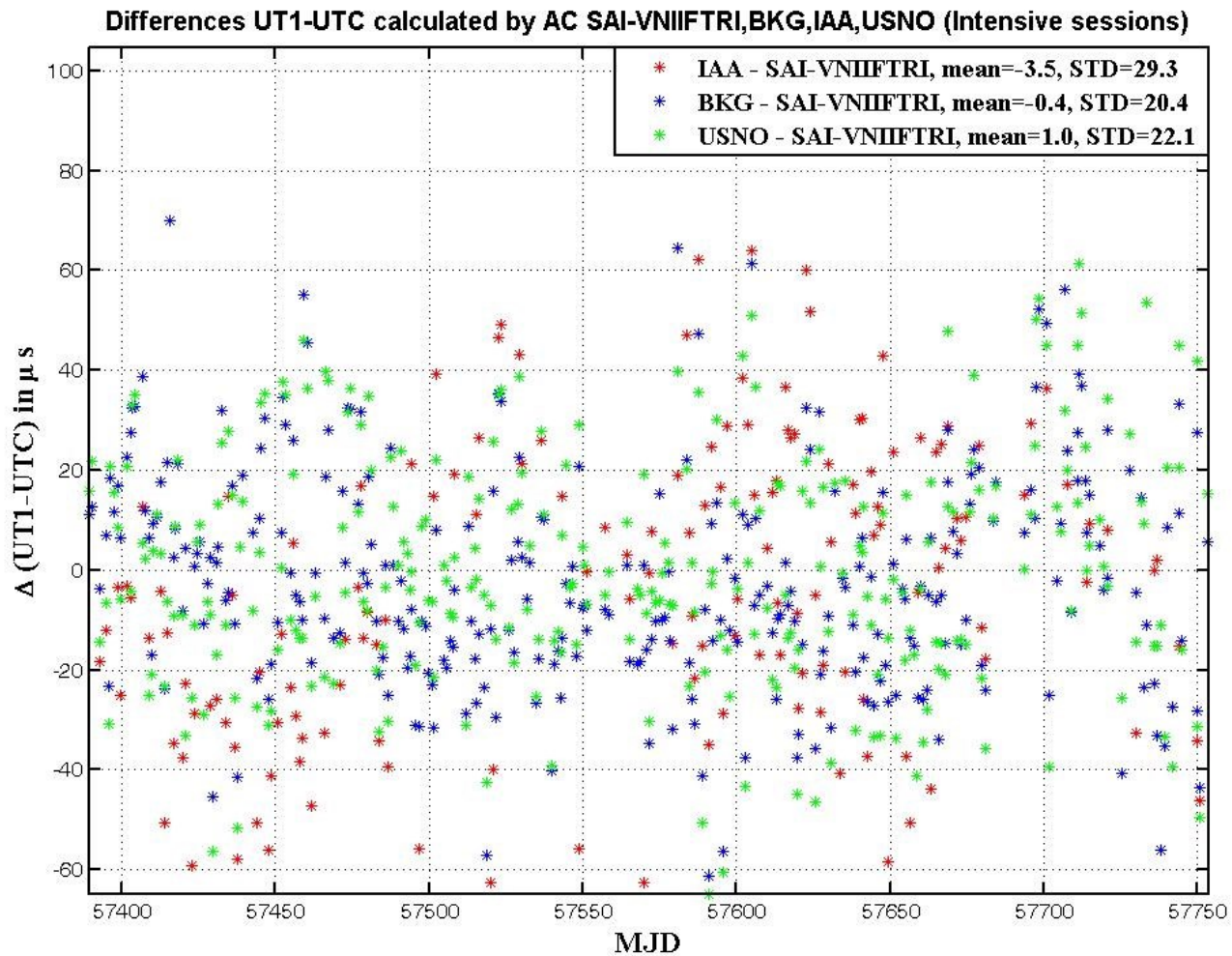
Да: используется условие NNR

Нет: предполагается, что координаты и скорости известны **точно**.

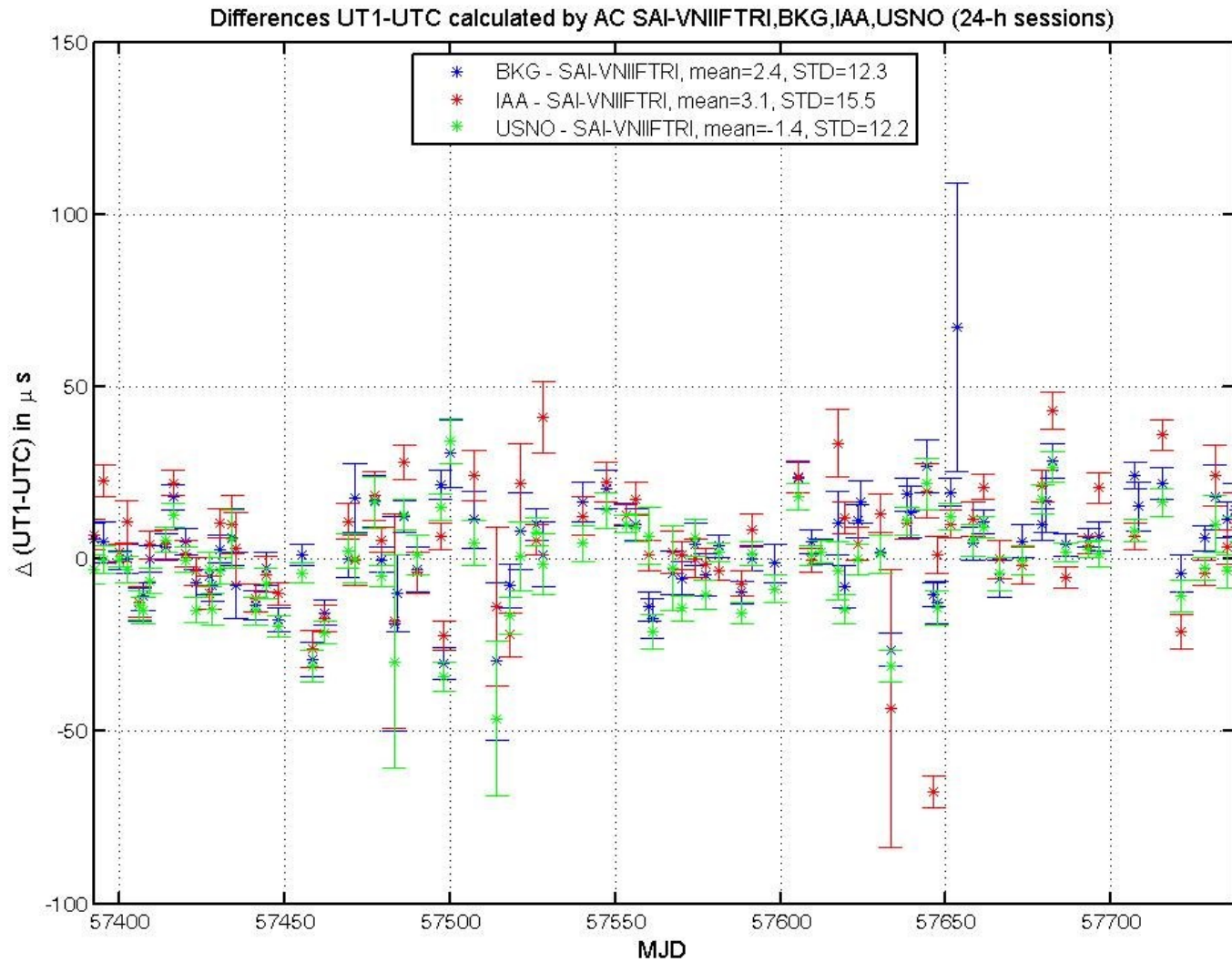
# Учет координат телескопов при решении



# Вычисление UT1-UTC (Intensive)

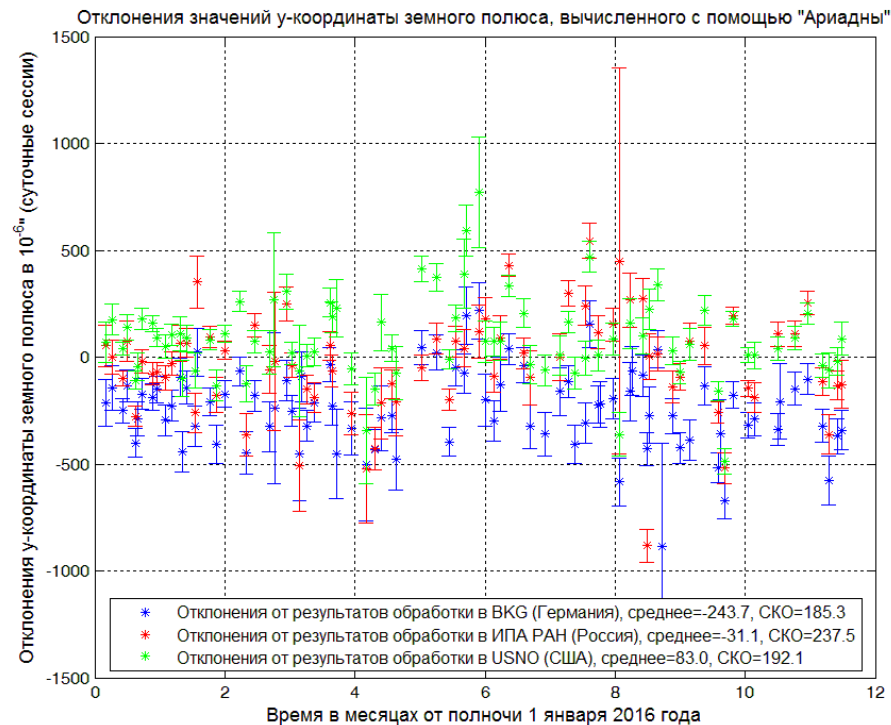
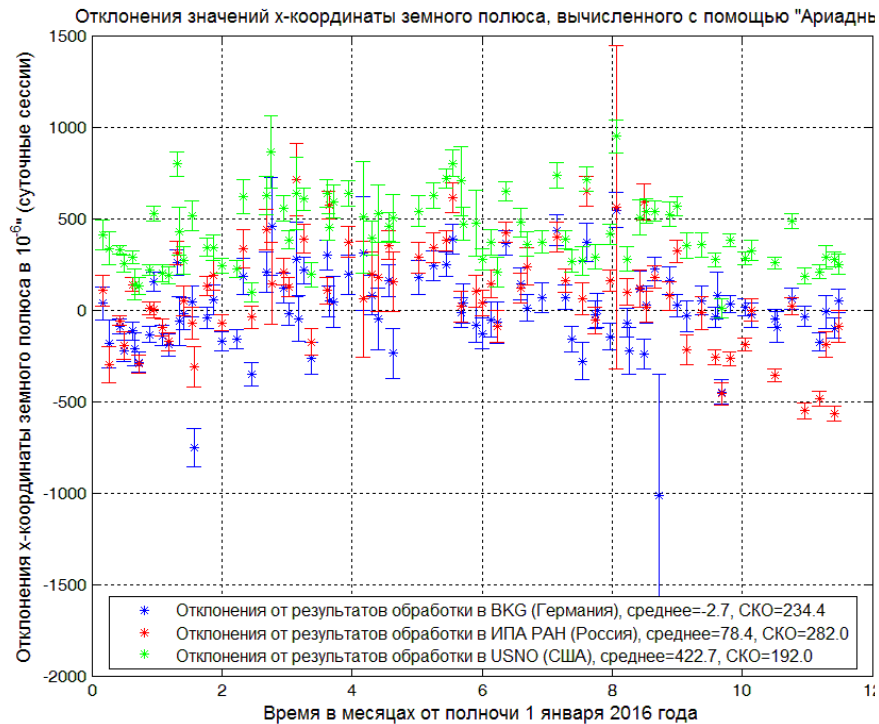


# Вычисление UT1-UTC (24-h)





# Вычисление координат полюса (24-h)



# Заключение

1. Разработан пакет обработки РСДБ-наблюдений «Ариадна»
2. Получены ряды параметров вращения Земли (решения для интенсивных и 24-ч сеансов)
3. Разработан алгоритм комбинированного решения нескольких сеансов наблюдений на РСДБ с использованием SINEX-файлов

**Спасибо за внимание!**