



# Связь радио и оптической небесных систем отсчета

**З. М. Малкин**

***malkin@gao.spb.ru***

# Мотивация

Через несколько лет ожидается появление оптической небесной системы отсчета, полученной по наблюдениям космического аппарата Gaia в 2014-2019+ гг., **GCRF (Gaia Celestial Reference Frame)** положений звезд и внегалактических объектов, внутренне согласованный на микросекундном уровне точности.

К этому же времени запланирован выход новой версии небесной радио-системы отсчета **ICRF (International Celestial Reference Frame)** близкой точности, создаваемой на основе обработки РСДБ-наблюдений с 1979 г.

Обе системы отсчета ICRF и GCRF должны быть реализациями единой небесной системы координат **ICRS**.

Поэтому стоит вопрос о согласовании систем ICRF и GCRF на микросекундном уровне точности.

# Радио - ICRF-3

- ~4000 радиоисточников с суб-мсд ошибкой (от ~20 мксд).
- Каталоги в разных диапазонах:
  - X/S (2.2/8.2 ГГц, 4000+ р/и),
  - K (24 ГГц , 500+ р/и),
  - X/Ka (8/32 ГГц , 600+ р/и),
  - (?) Q (43 ГГц).
- Стабильность ориентации: 10 мксд.

## Проблемы

- Структура радиоисточников (часто переменная!); зависит от длины волны, включая несовпадение центроидов радиояркости на разных длинах волн (core-shift effect, до 100 мксд).
- Атмосферные ошибки (тропосфера, ионосфера).
- Нелинейное движение станций.
- (=> ?) Систематические разности между каталогами в разных диапазонах.
  - (обсуждались на Journées 2014)

- Запущен 19.12.2013
- Старт научной программы 18.07.2014
- Программа рассчитана на 5 лет, возможно продление
- $225 \times 10^9$  астрометрических наблюдений,  $2 < G < 20.7$
- координаты  $\sim 10^9$  объектов, в т.ч.  $\sim 500,000$  квазаров и АЯГ
- ожидаемая точность координат (точечных!) объектов:  
8 мксд ( $m=13$ ), 100 мксд ( $m=18$ ), 470 мксд ( $m=20$ )

*(Prusti, 2015; Mignard, 2015; Bruijne, 2015)*

## Проблемы

- структура оптических изображений квазаров (host galaxy) и радиогалактик
- яркие галактики ( $m < \sim 16$ ) не могут эффективно наблюдаться

# Задачи

1. Определение ориентации ICRF-GCRF на определенную эпоху, например J2000.0 или средняя эпоха наблюдений GCRF.
2. Определение взаимного вращения ICRF-GCRF.

**HIPPARCOS** (Kovalevsky et al., 1997):

*"the coordinate axes defined by the published catalogue are believed to be aligned with the extragalactic radio frame to within  $\pm 0.6$  mas at the epoch 1991.25, and non-rotating with respect to distant extragalactic objects to within  $\pm 0.25$  mas/yr".*

Стоит задача улучшить эти точности в несколько раз (на порядок?!) для связи ICRF-GCRF.

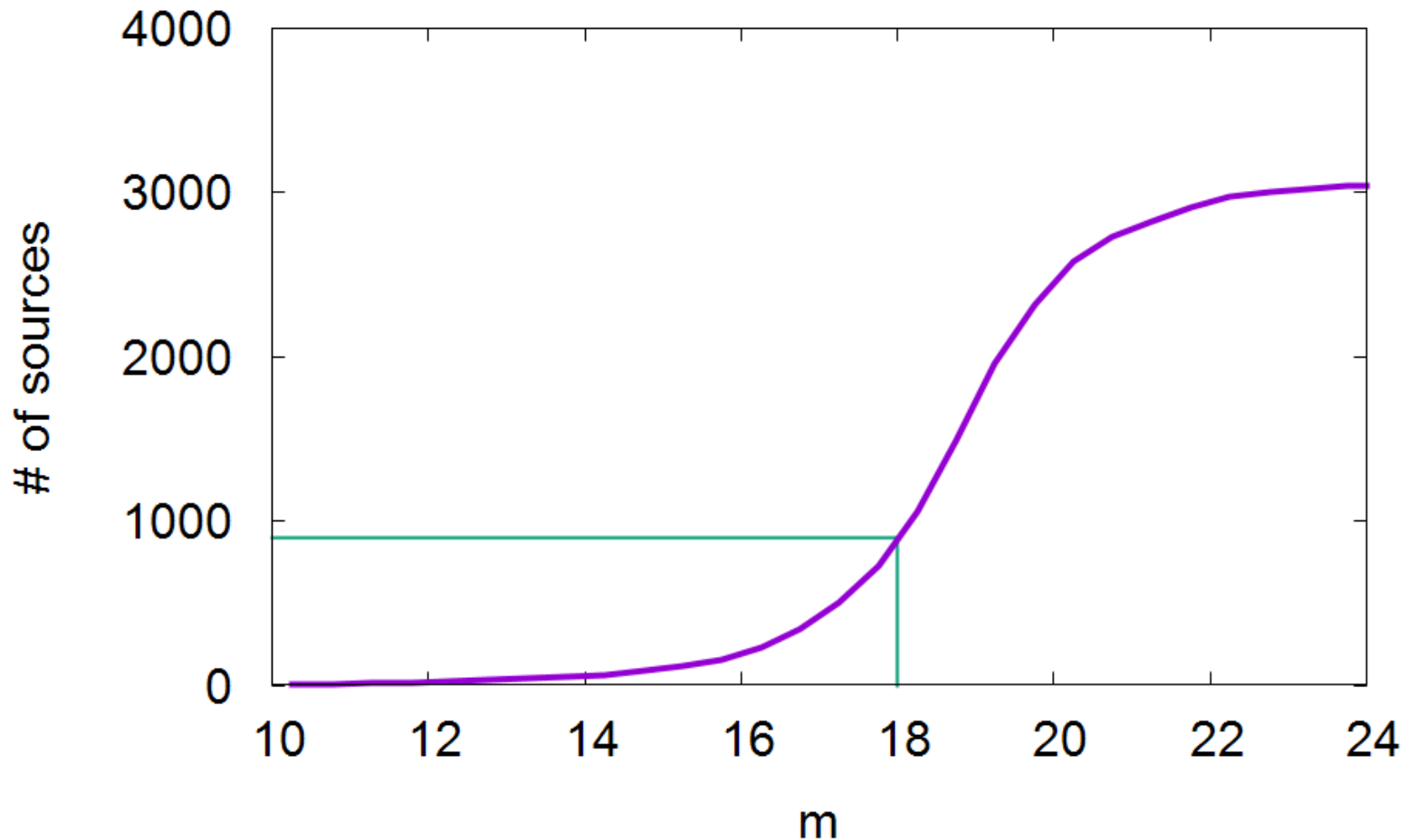
# Направления работы

1. Позиционные оптические наблюдения радиоисточников ICRF.
2. Фотометрические оптические наблюдения радиоисточников ICRF.
3. Усиленные РСДБ-наблюдения избранных оптически-ярких и компактных радиоисточников.
4. Банки данных оптических и радио изображений.

# Исходные данные

1. Наблюдения в оптике и радио избранных общих объектов. Критерии выбора: оптическая и радио яркость, отсутствие значительной структуры в радио диапазоне.
2. Дополнительные данные больших каталогов для уточнения собственных движений общих объектов.

# Распределение источников ICRF2 по $m$



Общее число астрометрических радиоисточников в несколько раз больше, чем содержится в ICRF (см. Петров, каталог RFC), так же в несколько раз больше число оптически ярких радиоисточников (см. Малкин, каталог OCARS). Но применение дополнительных критериев (структура) снижает выбор также в несколько раз (*Bourda, et al., 2008-2015*).



# Оптические позиционные наблюдения

В первую очередь, известны работы USNO:

Несколько наблюдательных программ в 1997-2004 гг.; определены оптические положения 413 объектов (АЯГ) по всему небу; исследованы ошибки и их влияние на параметры ориентации радио-оптика; сделан пессимистический вывод, что параметры связи не могут быть определены лучше 0.5 мсд без существенного увеличения числа общих объектов (Zacharias & Zacharias, AJ, 2014)

**URAT1:** 228 млн объектов,  $R=3-18.5$ , типичная ошибка координат 10-30 мсд, ошибка собственных движений 5-7 мсд/год для 188+ млн объектов (Zacharias et al., 2015)

**НО:** только северное небо  $\delta > -15$

# Оптические фотометрические наблюдения

*Taris et al., 2013, 2015*

Четыре телескопа: Франция (2), Чили, Австралия

*V* и *R* фотометрия

Изображения:

оценка компактности, морфологический индекс

Начата программа наблюдений источников OCARS

## **Bourda et al., 2008-2015**

- Выбор оптически ярких радиоисточников (в т.ч. дополнительно к ICRF.
- Тестовые РСДБ-наблюдения (EVN) для определения их пригодности для астрометрии.
- Изучение структуры источников, включая специальные наблюдения и отсеивание объектов со сложной структурой.
- Астрометрические РСДБ-наблюдения (IVS и др.) для определения точных координат и включения в ICRF.

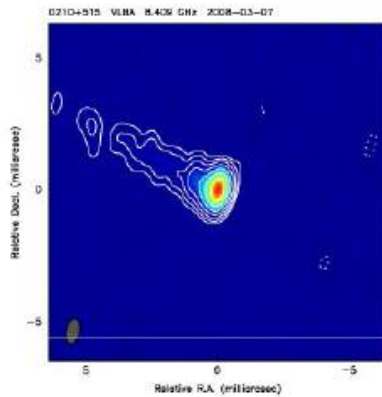
**Цель:** получить несколько сотен источников равномерно распределенных по небу и пригодных для высокоточных позиционных наблюдений в радио и оптике.

На сегодня отобрано ~400 источников для связи ICRF-GCRF.

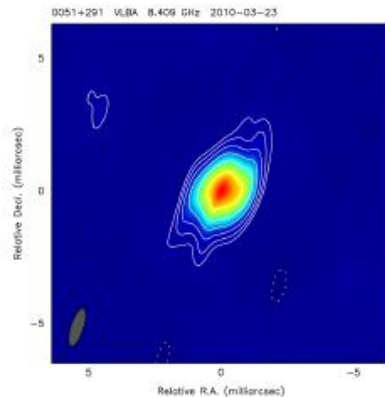
# РСДБ-наблюдения избранных р/и

## Examples of VLBI maps for « bad » sources

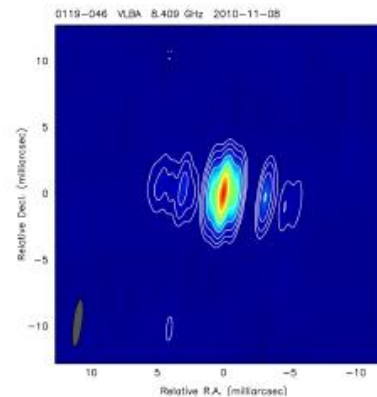
GC030



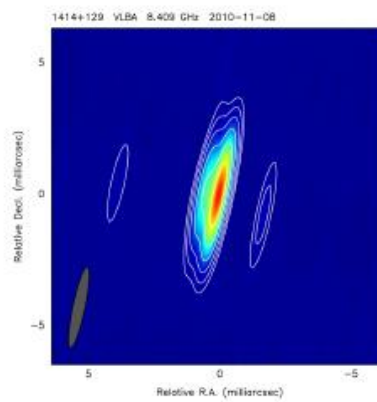
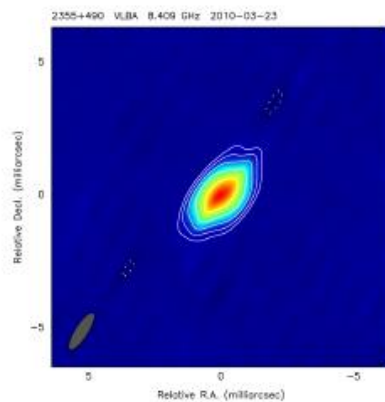
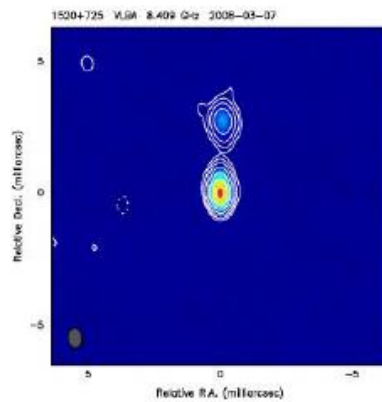
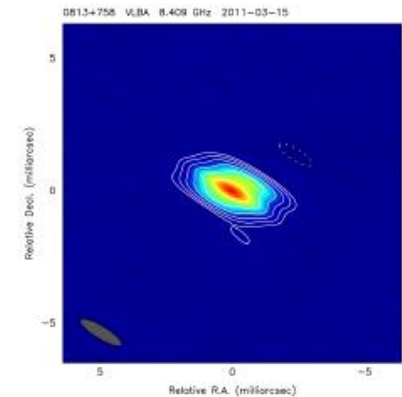
GC034A



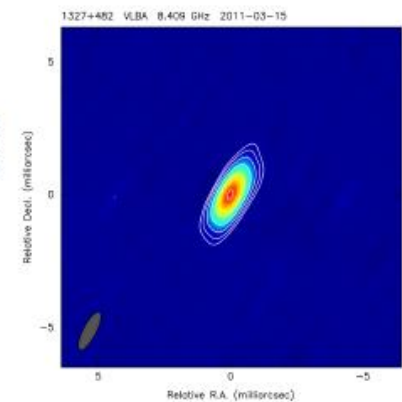
GC034BCD



GC034EF



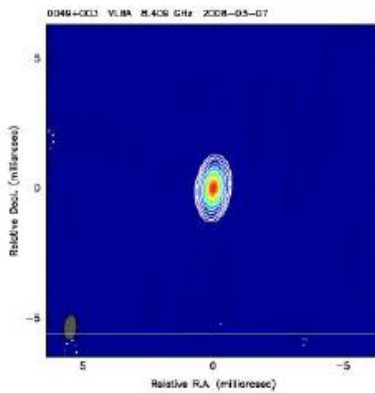
~10 mas



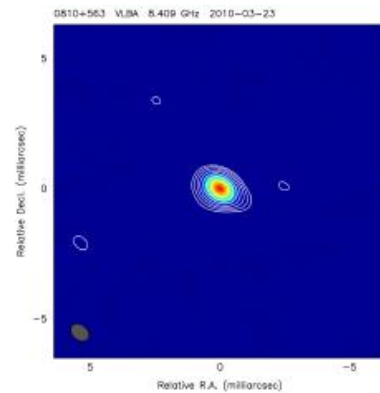
# РСДБ-наблюдения избранных р/и

## Examples of VLBI maps for « good » sources

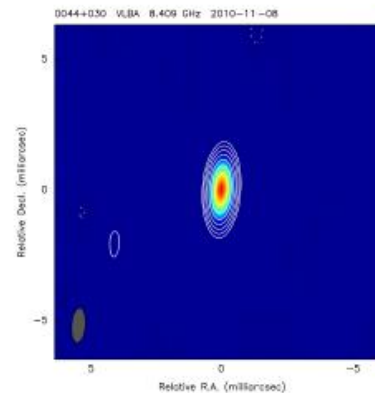
GC030



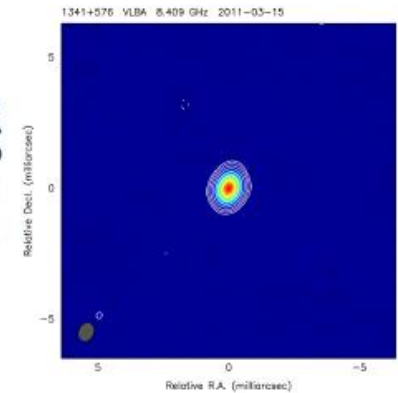
GC034A



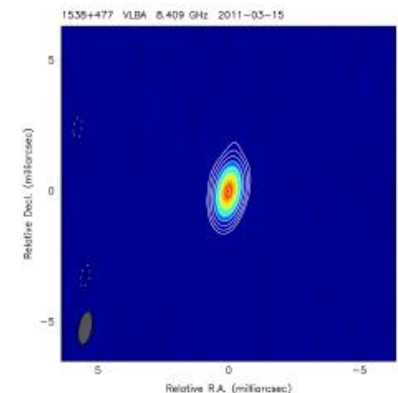
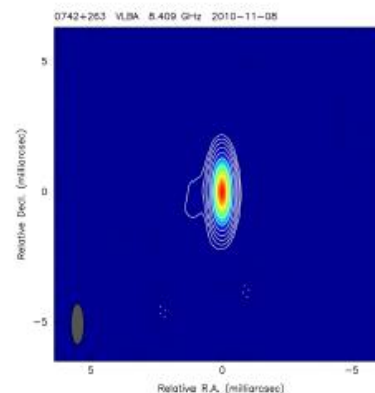
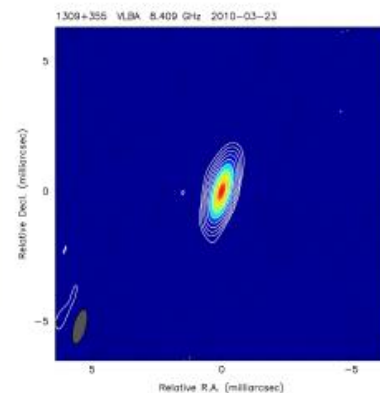
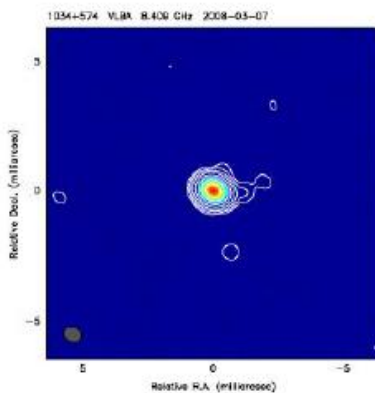
GC034BCD



GC034EF



~10 mas



## ■ Радио:

**RRFID** (Radio Reference Frame Image Database), USNO, *Fey et al.*  
(~ 1400 карт 400 p/и ?)

**BVID** (Bordeaux VLBI Image Database), *Charlot et al*  
(~ 4500 карт 1200 p/и)

**RFC**, *Petrov*  
(~ 40,000 карт 6500 p/и)

## ■ Оптика:

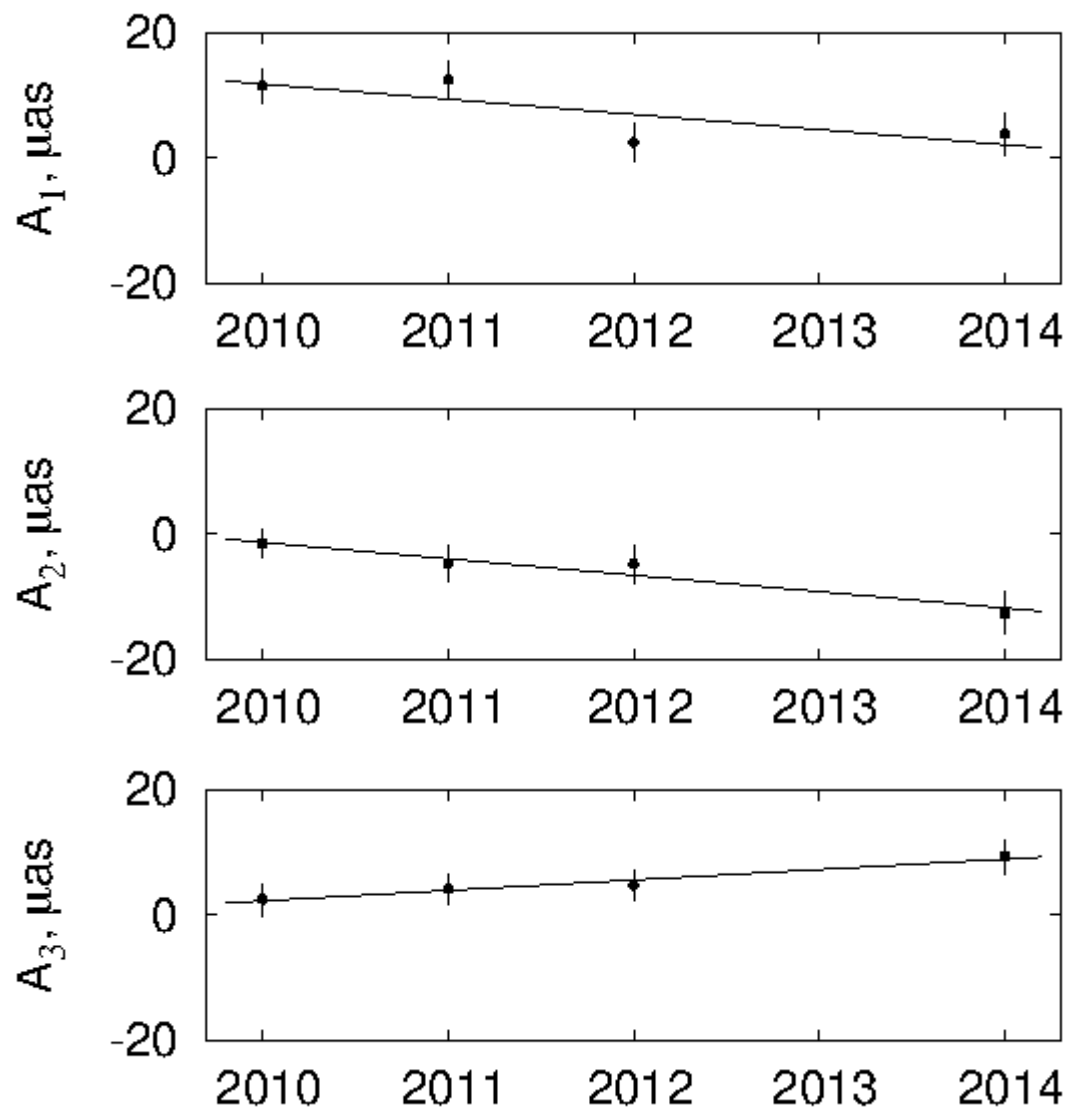
Complete Bank of Optical Images of the ICRF, *Andrei et al. 2015*  
(300,000+ карт)

# Известные проблемы связи радио-оптика

- Взаимная идентификация объектов в ICRF и GCRF.
- Кратные радиоисточники, ВВН (binary black hole).
- Гравитационные линзы.
- Несовпадение центров излучения в радио и оптике; до 10 мсд (Zacharias & Zacharias, 2014); Orosz & Frey (2013) приводят примеры разности положений в радио и оптике до 170 мсд; Camargo et al. 2011) дают 80 мсд.
- Систематика радиокаталогов; зональные ошибки.
- Вращение ICRF.

*(см. также Makarov, 2015; Roland & Lambert, 2015)*

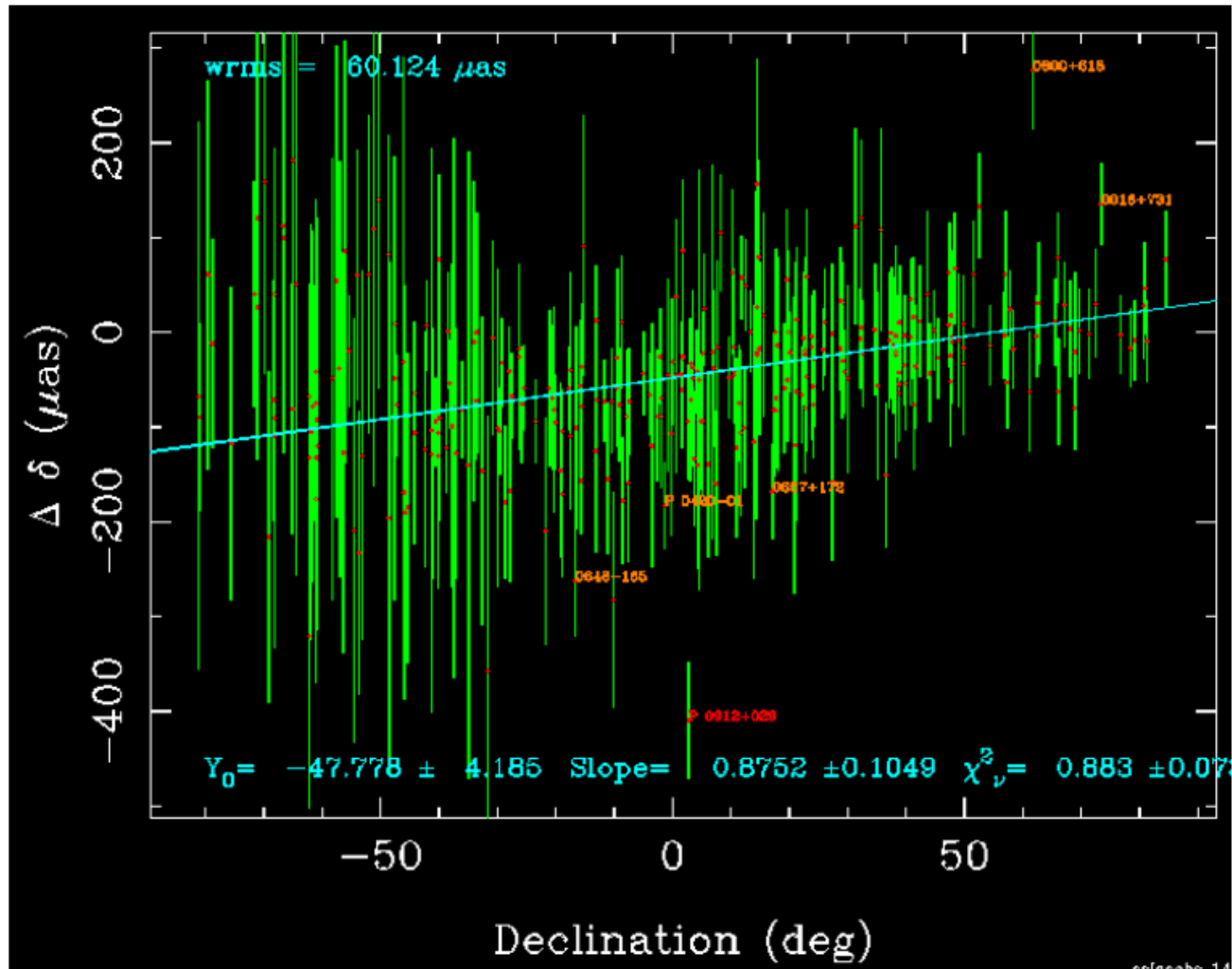
## Вращение каталогов GSFC относительно ICRF2





# Ошибки ICRF

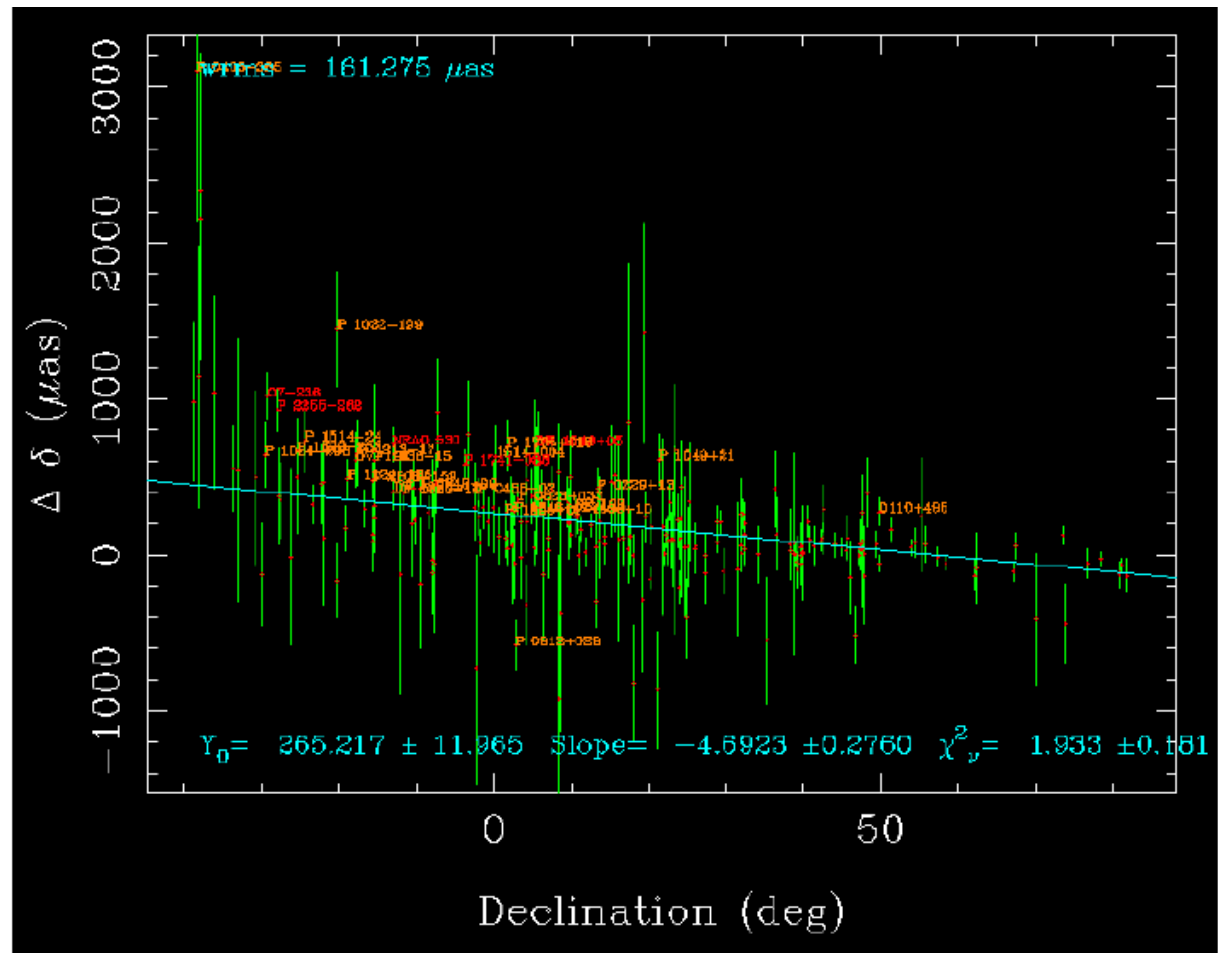
S/X zonal errors: ICRF2-Def vs. Recent S/X



# Ошибки ICRF

Lack of direct  
Dual-band ion  
Calibrations  
*and*  
Lack of any  
Station in south

Leads to poor  
 $\Delta\text{Dec}$  vs. Dec  
Zonal stability:  
500  $\mu\text{as}$  tilt

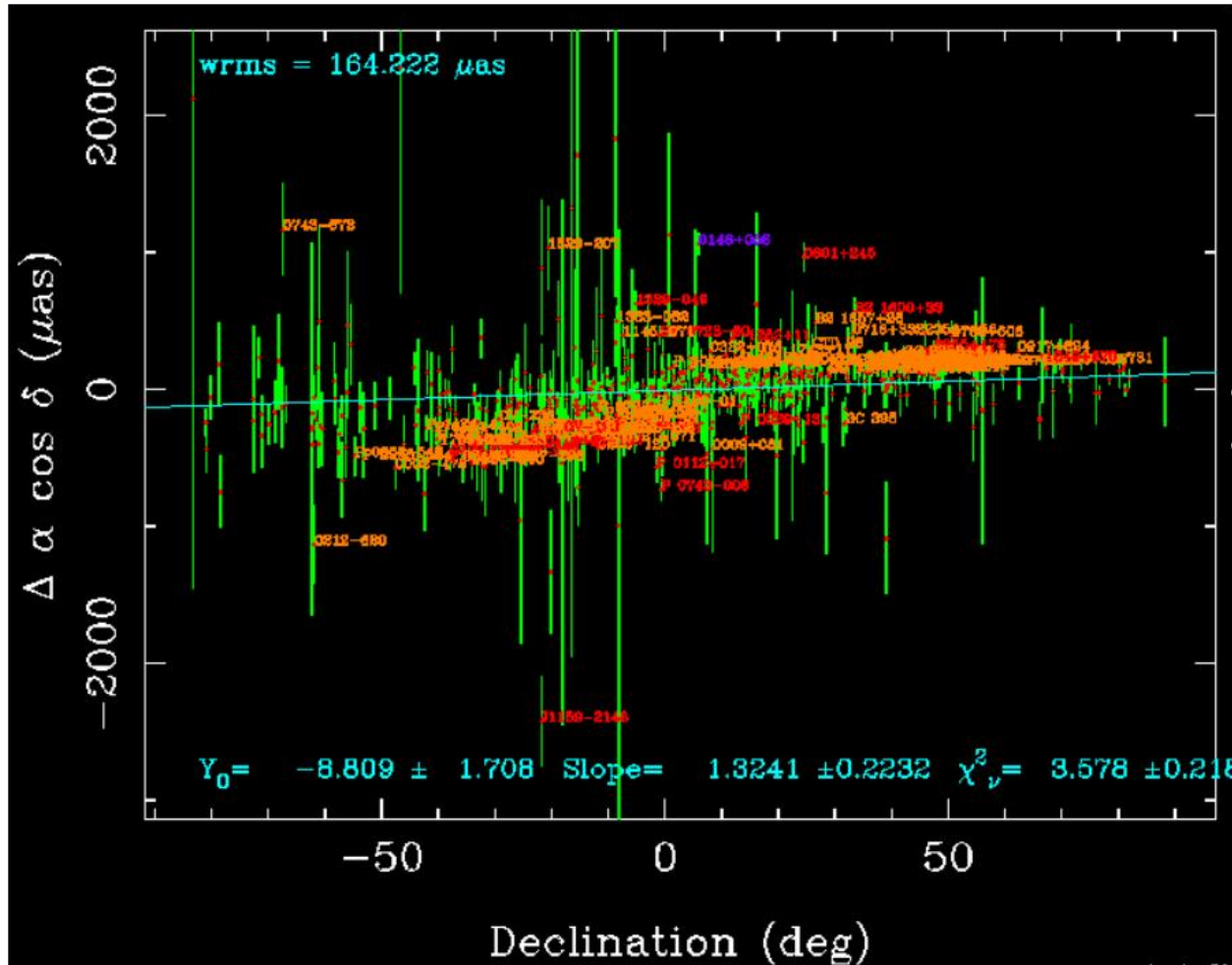


**K(1.2cm) Declinations vs. S/X ICRF2 (current IAU standard)**

# Ошибки ICRF



## XKa vs. SX: Zonal errors



## **Zacharias et al., ...-2015**

URAT - VLBI

SDSS - VLBI

DARN (detrimental, astrophysical, random noise) study

## **Makarov et al., ...-2015**

PanSTARRS - WISE - VLBI

# Заключение

- Сочетание различных методов связи ICRF и GCRF должно обеспечить наиболее точно их взаимную ориентацию и вращение. Принимая во внимание намного более высокую точность ожидаемых радио и оптической систем, можно надеяться достигнуть точности параметров связи ICRF-GCRF в 5-10 раз лучше, чем в случае ICRF-HIPPARCOS. Но для реализации этого потенциала необходимы большие дополнительные теоретические и наблюдательные усилия.
- С точки зрения фундаментальной астрометрии нужна единая многодиапазонная ICRF, реализующая ICRS на (суб-)мсд уровне точности в оптике, радио (разные диапазоны), ИК, ...

Спасибо за внимание!