

# Современные проблемы астрометрии

**В.Е. Жаров**

*Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова  
Физический факультет*

# Глобальная геодезическая система наблюдений (Global Geodetic Observing System - GGOS)

The screenshot shows the website [www.ggos.org/en/](http://www.ggos.org/en/) in a browser window. The browser tabs include "Яндекс", "Основания баялин - цены", "Элементы орнамента, венз...", "GGOS - Поиск в Google", and "GGOS - Global Geodetic Obs...".

The website header features the IUGG logo and the GGOS logo (a globe with "IAG" and "GGOS" text). The text "Global Geodetic Observing System" is displayed. The navigation menu includes: About, Bureaus, Focus Areas, GGOS Affiliates, Data & Products, and GGOS Meetings.

The main banner image shows a large geodesic dome structure. The text "GGOS Global Geodetic Observing System" is overlaid on the left side of the banner.

Below the banner are three content cards:

- Bureau of Networks and Observations**: Features a bar chart icon and a "Learn more" button.
- Bureau of Products and Standards**: Features a document icon and a "Learn more" button.
- Tweets by @IAG\_GGOS**: A social media feed showing a tweet from @IAG\_GGOS: "The first successful GGOS Working Group Meeting on 'DOIs for Geodetic Data Sets' took place during AGU Fall Meeting. Contributors to this Working Group are highly welcome #AGU2019 #iag\_ggos".

The browser's address bar shows the URL [www.ggos.org/en/#carouselExampleControls](http://www.ggos.org/en/#carouselExampleControls).

**GGOS предназначена для сбора, архивирования и обеспечения доступности геодезических и астрономических наблюдений, результатов и моделей в трех связанных между собой областях астрономии и геодезии:**

- - кинематика поверхности Земли;**
- - ориентация и вращение Земли;**
- - гравитационное поле Земли (ГПЗ) и его вариации во времени и пространстве.**

В системе GGOS выдвигается общее требование высокоточного наблюдения и вычисления астрономо-геодезических параметров и их вариаций во времени с относительной погрешностью около  $10^{-9}$  -  $10^{-10}$ .

Эти требования конкретизируются в виде погрешностей определения основных координатно-временных данных в реальном масштабе времени:

- при определении трехмерных координат точек на поверхности Земли и глобальных расстояний, включая расстояния между континентами, - единицы миллиметров;
- при определении скорости движения точек земной коры, в том числе глобальных тектонических движений - доли миллиметра в год;
- при определении параметров вращения Земли (координат полюса, всемирного времени, длительности суток, прецессии и нутации) - не более миллиметров и десятков микросекунд, соответственно;

- - при определении координат естественных и искусственных космических радиоисточников - десятых долей миллисекунды дуги и микросекунд дуги при построении их изображений;
- - при определении параметров Солнечной системы, в том числе фундаментальных астрономических постоянных – единицы микросекунд дуги;
- - при синхронизации атомных шкал времени, разнесенных на глобальные расстояния, измеренные с погрешностью несколько миллиметров – единицы-десятки пикосекунд .

# Службы GGOS

Bureau Gravimétrique International (BGI)

IAG Bibliographic Service (IBS)

International Digital Elevation Model Service (IDEMS)

International GNSS Service (IGS)

International Center for Earth Tides (ICET)

International Centre for Global Earth Models (ICGEM)

International Doris Service (IDS)

International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)

International Service for the Geoid (ISG)

International Gravity Field Service (IGFS)

International Laser Ranging Service (ILRS)

International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)

Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) – Time Department

# Методы и средства для определения и реализации геоцентрической системы координат

- Системы координат имеют первостепенное значение для многих исследований и приложений в области наук о Земле, а также для решения задач спутниковой навигации и для прикладных задач геофизики и геодезии.
- Земная система координат является основой практически всех космических и наземных наблюдений. Положения объектов на поверхности Земли определяются в этой системе. Точность определения положения объектов в конечном виде зависит от точности самой системы координат.

Для определения систем отсчета и их реализаций (систем координат) необходимы:

1. Теоретические и прикладные исследования, связанные с разработкой систем отсчета;

2. Исследования и разработки в области определения единой эталонной системы отсчета и ее точности;

3. Взаимодействие со службами: IVS (сеть станций РСДБ), ILRS (сеть станций лазерной спутниковой локации), IGS (сеть GNSS-станций), IDS (сеть станций доплеровских измерений DORIS), IERS (международная служба вращения Земли), включая их координационные центры и рабочие группы;



4. Разработка теории преобразования между небесной и земной системами отсчета с целью улучшения согласования между ICRF, ITRF с учетом ПВЗ в кооперации с международной службой вращения Земли (IERS);

5. Разработка новых методов обработки наблюдательных данных, получаемых при использовании средств космической геодезии;

6. Поиск и выявление источников систематических ошибок и факторов, которые могут ограничивать точность космических геодезических методов.

Дальнейшее усовершенствование международной земной системы координат будет достигнуто путем следующих мероприятий:

1. Разработка следующего поколения астрономо-геодезических станций, оснащенных приборами нового поколения;

2. Совершенствование конфигурации наземной сети с учетом решения задачи глобального покрытия и коллокации;

3. Улучшение количества и точности вспомогательных служб, расположенных рядом со станциями (локальные геодезические и гравиметрические измерения, метеонаблюдения и др.);

4. Совершенствование космического сегмента, используемого для построения земной системы координат и измерения ГПЗ.

5. Совершенствование методов сбора данных, их обработки, распространения информации

# Система координат «Параметры Земли» 1990 г. (ПЗ-90)

Система геодезических параметров ПЗ-90 включает в себя:

- фундаментальные астрономические и геодезические постоянные;
- общеземной эллипсоид;
- координаты пунктов космической геодезической сети;
- элементы связи с референцными системами координат;
- планетарная модель ГПЗ в виде гармонических коэффициентов;
- каталог высот квазигеоида.

Геоцентрическая система координат ПЗ-90 создана без интеграции с зарубежными геодезическими сетями. Она закрепляется координатами пунктов на территории бывшего СССР, а также на территории шестого континента - Антарктиды.

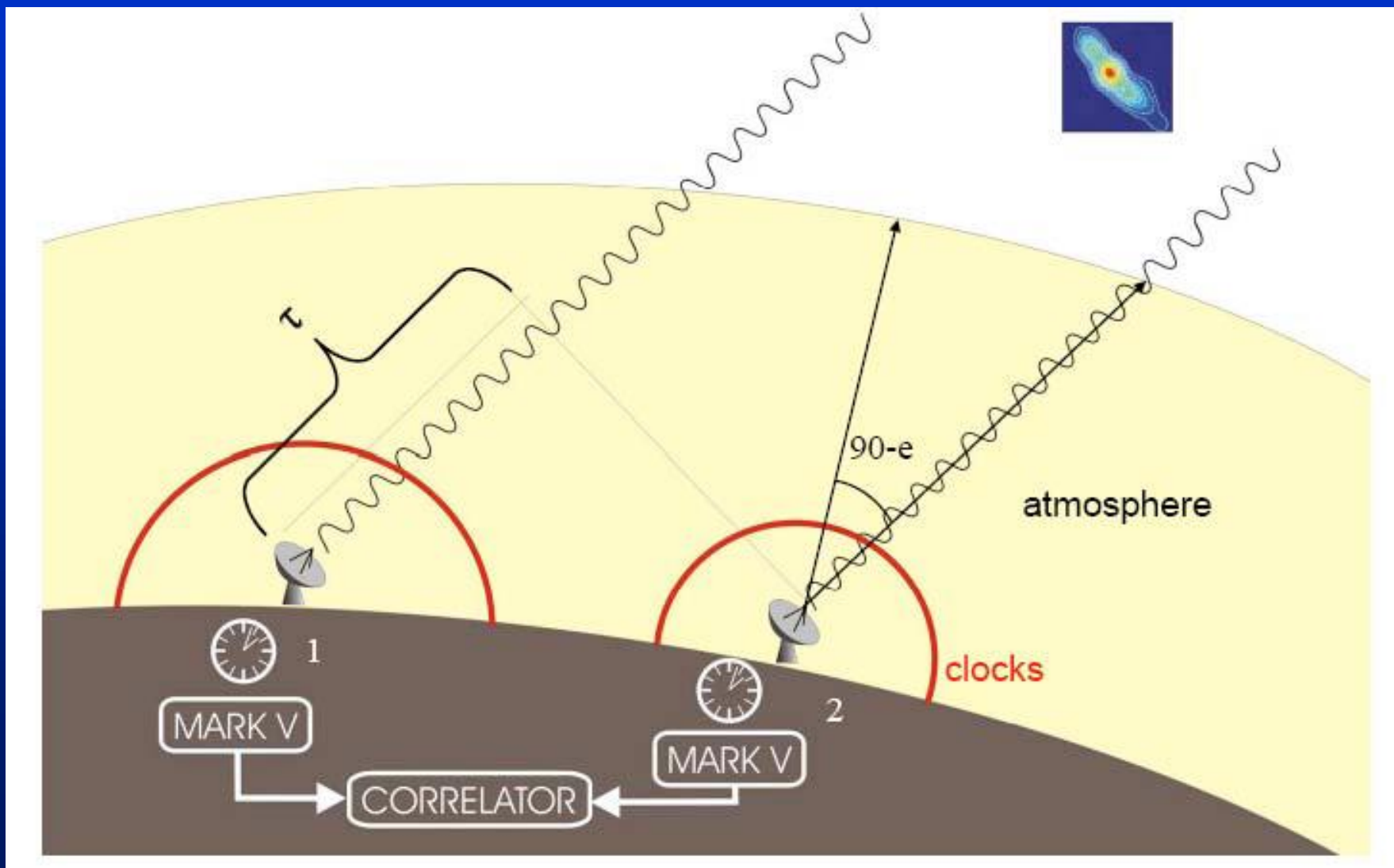
Уточнение государственной геоцентрической системы координат ПЗ-90 выполнено в 2011 г. Постановлением правительства РФ от 28 декабря 2012 г. №1463 система координат ПЗ-90.11 принята в качестве исходной для решения навигационных задач.

Таблица 2 – Связь систем координат ПЗ-90 и ITRF

Названия СК	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
ПЗ-90 – ITRF-2000	-1,430	+ 0,050	+ 0,200
ПЗ-90.02 - ITRF-2000	- 0,360	0,080	0,180
ПЗ-90.11 - ITRF-2008	- 0,003	- 0,001	0,000

Важнейшая задача – увеличение числа пунктов космической геодезической сети, расширение географии расположения и оснащение новыми средствами наблюдений: радиотелескопами, лазерными дальномерами, совмещенными приемниками ГНСС, стандартами частоты, гравиметрами и т.д.

# Принцип работы РСДБ



# Роль РСДБ

1. Определение небесной системы координат (ICRF-1, ICRF-2, ICRF-3)
2. Определение параметров вращения Земли (UT1, координаты полюса и нутация)
3. Определение земной системы координат (~200 телескопов)

# Почему необходимо модернизировать РСДБ? (1)

- Существующая система создавалась более 40 лет назад
- Антенны тяжелые и медленные
- Неоптимальное распределение антенн
- Высокая стоимость обслуживания
- Большая задержка перед получением результата
- Помехи в S-полосе в последнее время значительно увеличились

# Почему необходимо модернизировать РСДБ? (2)

- Разработаны недорогие и легкие антенны из современных материалов
- Разработаны широкополосные приемники
- Появились высокоскоростные накопители данных большого объема
- Появились оптоволоконные линии связи
- Появились высокоскоростные процессоры



# Задачи новой системы VLBI2010 (VLBI Global Observing System - VGOS)

- 1 мм и 0.1 мм/год (координаты и скорости антенн)
- Непрерывные наблюдения
- Задержка до выдачи результата должна быть минимальной (наблюдения в квазиреальном времени)

# Новые антенны для VLBI2010

Австралия (3) 12 м антенны

Новая Зеландия (1) 12 м антенна

Германия (2) 12 м антенны (twin telescopes)

Швеция (2) 12 м антенны (twin telescopes)

Норвегия (2) 12 м антенны (twin telescopes)

Корея (1) «быстрая» 22 м антенна

Испания (3) 12 м антенны

Россия (3) 12 м антенны

.....



# Новые облучатели

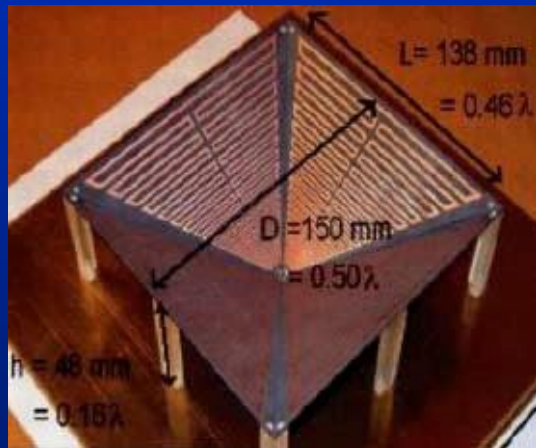
Диапазон частот 2-15 ГГц

Постоянство фазового центра с частотой

Постоянство угла раскрыва с частотой

Охлаждаемый для уменьшения потерь

Две линейные поляризации



- Kildal feed, Chalmers U.
- Best but needs development available

- ETS Lingren Feed
- Commercially

# Конвертеры

Выполняет роль S/X приемника

Должен выбирать произвольную полосу в диапазоне 2-15 ГГц

Преобразование частоты с помощью программируемого гетеродина

## Форматоры данных

Разделение сигнала на каналы

Подготовка данных к записи

Анализ качества данных

Фазовая калибровка

## Регистраторы

При полосе записи от 4 до 8 ГГц (в каждой поляризации) скорость записи должна быть 32 – 64 Гбит/с (при двухбитовой записи)

# Регистраторы

При полосе записи от 4 до 8 ГГц (в каждой поляризации) скорость записи должна быть 32 – 64 Гбит/с (при двухбитовой записи)

# Корреляторы

Mark-4 correlator (~1 Gbps, ~16 stations)

Haystack, USNO, JIVE, Bonn

S2 correlator (~128 Mbps, ~6 stations)

Penticton

K4 correlator (~256 Mbps, ~4 stations)

Kashima, Tsukuba, Koganei

Gigabit Correlator : GICO2 (~2 Gbps, 2 stations)

Kashima

VLBA correlator (~512 Mbps, ~24 stations)

Socorro

VSOP/VERA correlator (~1 Gbps, ~10 stations)

Mitaka

# Корреляторы ближайшего будущего

## 1. E-VLA “WIDAR” – централизованный процессор

Число станций : 32 (1-й этап), 48 (2-й этап)

Полоса : 16 ГГц (8 полос x 2ГГц)

## 2. Рассредоточенная сеть РС

Передача данных по сети

Новая архитектура

Новая стратегия (корреляция данных с антенн, связанных высокоскоростными линиями, остальные позже – ленты, диски)

Стратегия передачи результатов корреляции для пост-корреляционной обработки



# Новая стратегия наблюдений

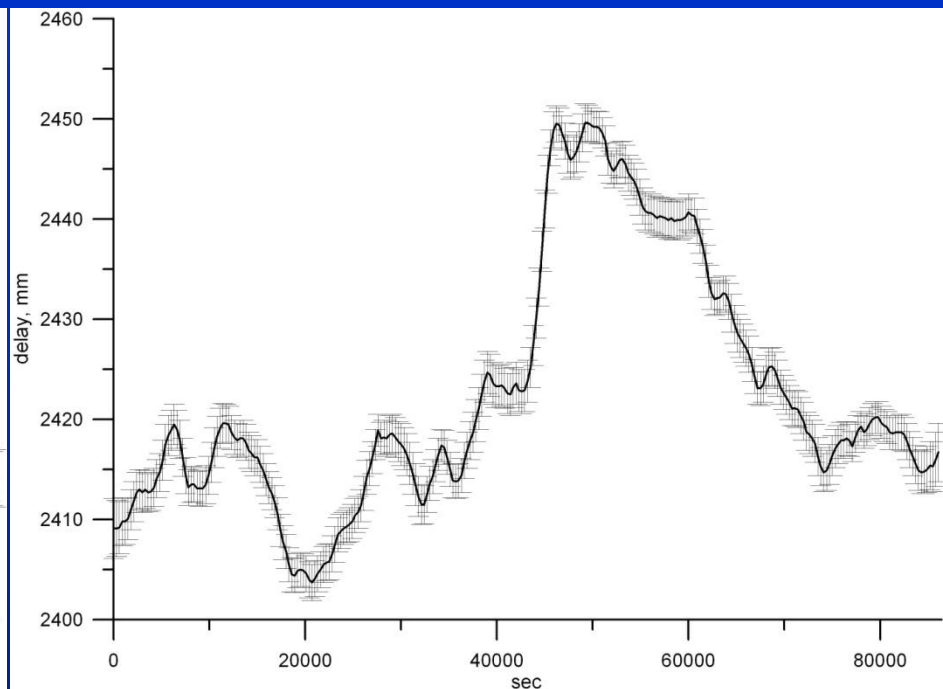
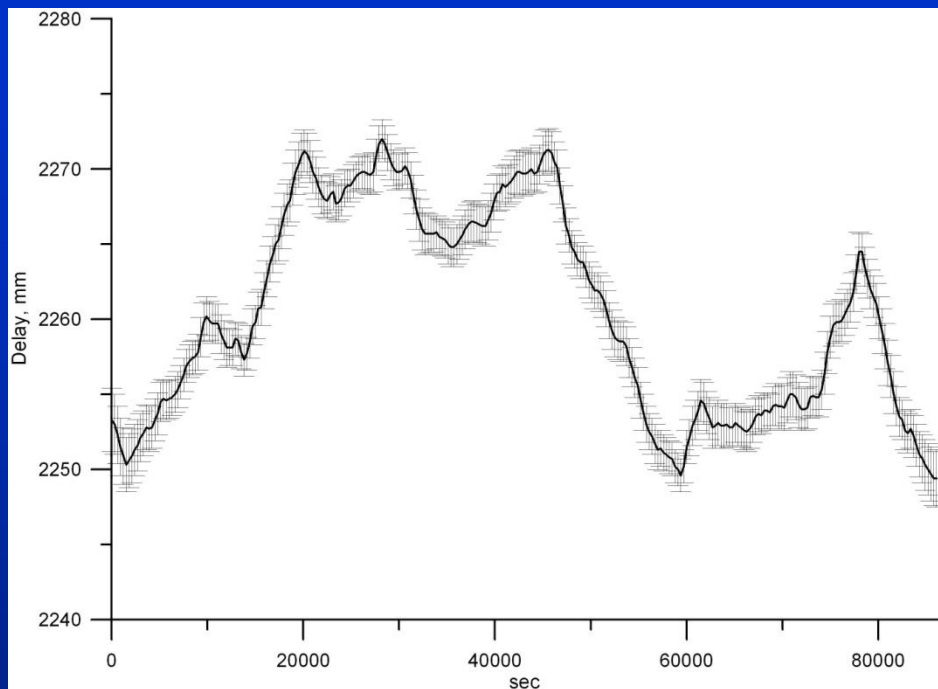
- Уменьшение времени перевода антенны с источника на источник
- Уменьшение времени наблюдения каждого источника
- Улучшение планирования наблюдений

**Новая модель наблюдений**

**Новая модель атмосферы**

Ошибка задержки  $\sim 2.5$  пс (меньше 1 мм) вместо 30-40 пс

# Задержка радиосигнала в тропосфере



Менделеево

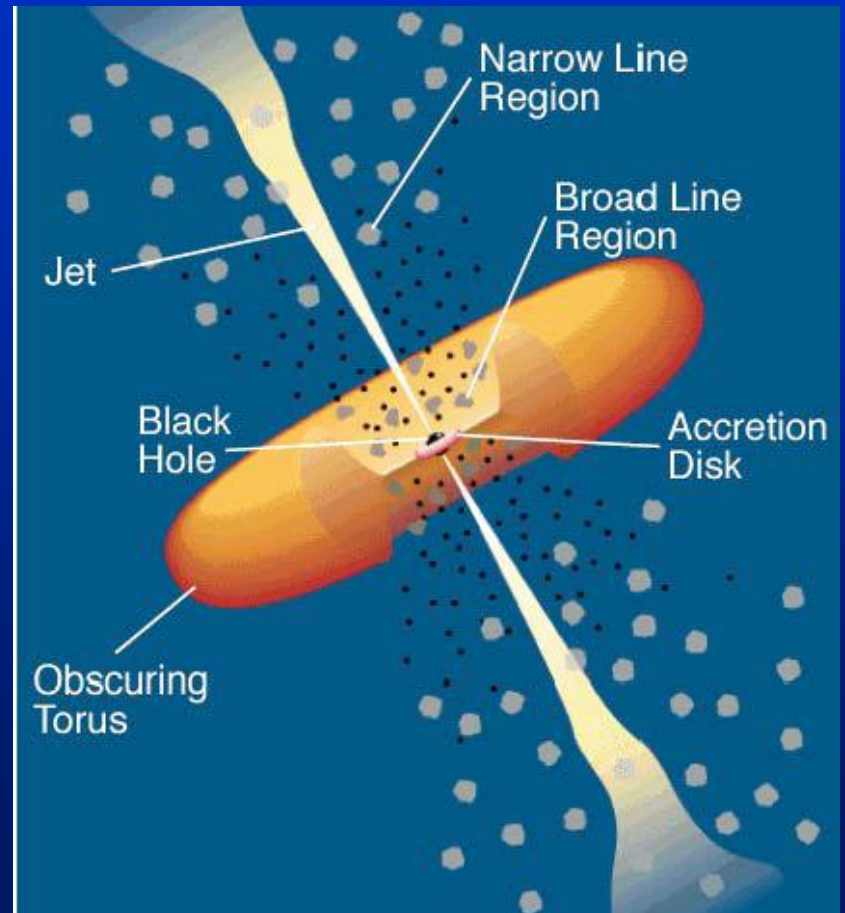
20.01.2019

02.06.2019

(обработка всей сети GPS-станций;  $\sigma \sim 3-4$  мм)

# Физика радиоисточников

В радиодиапазоне  
видны джеты и  
элементы джетов.  
К сожалению это –  
динамичные объекты.



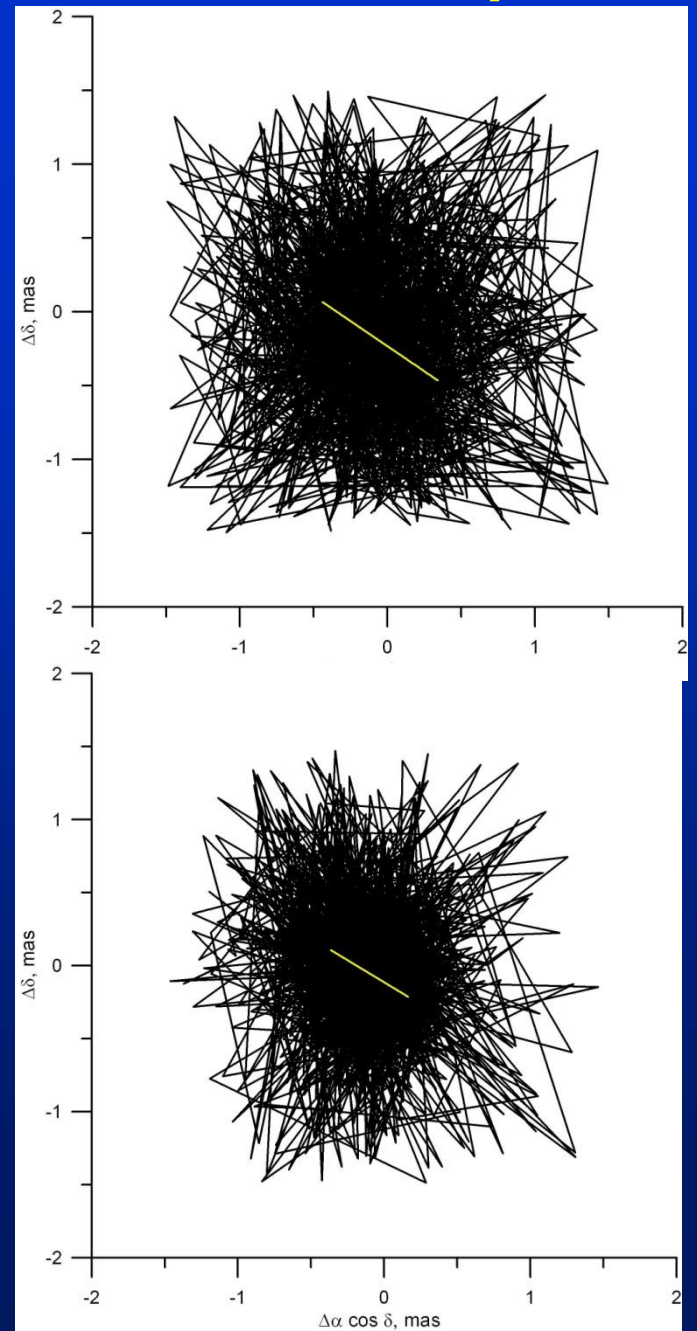
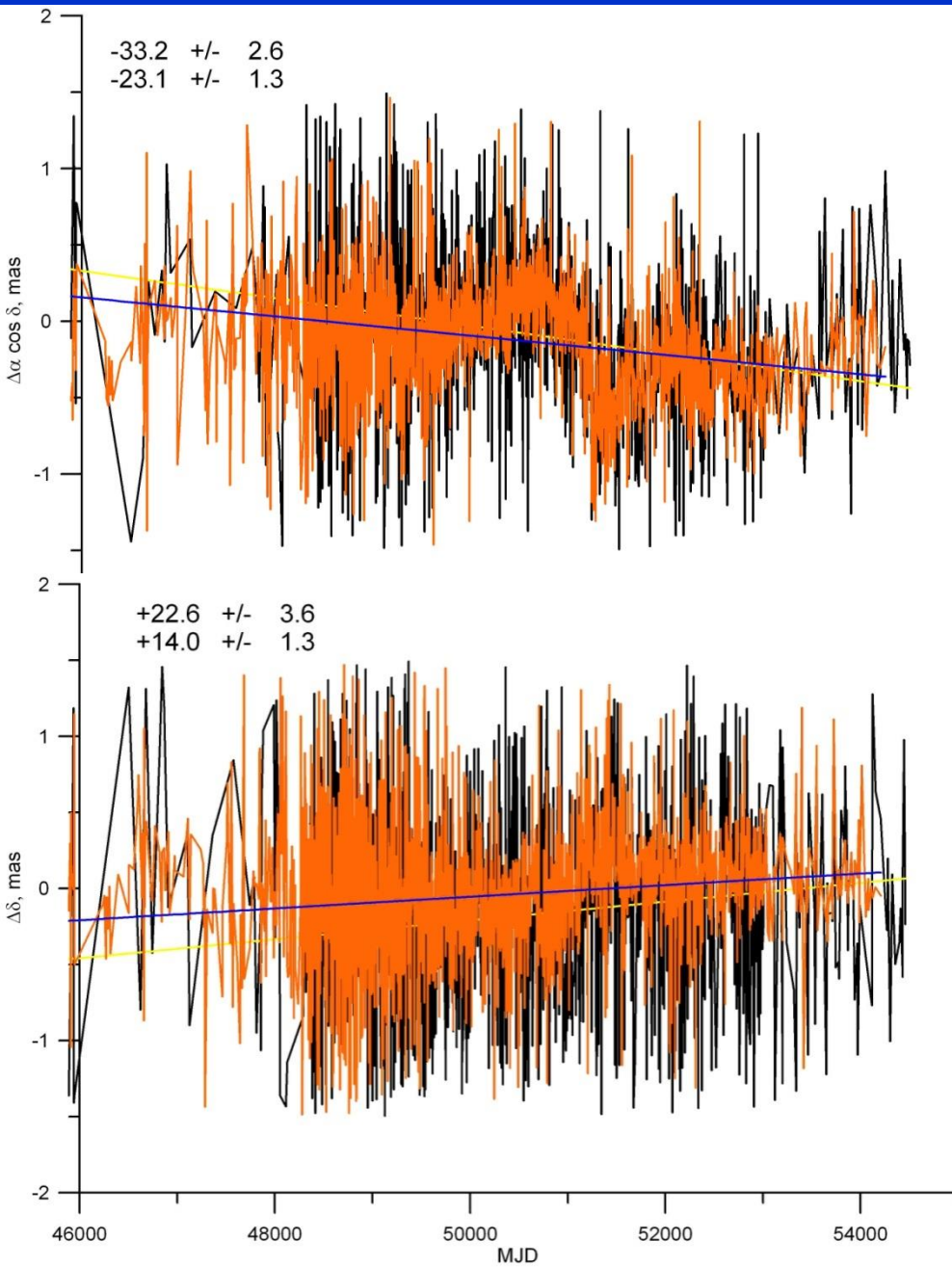
# Структура источников

Изменение координат радиоисточника:

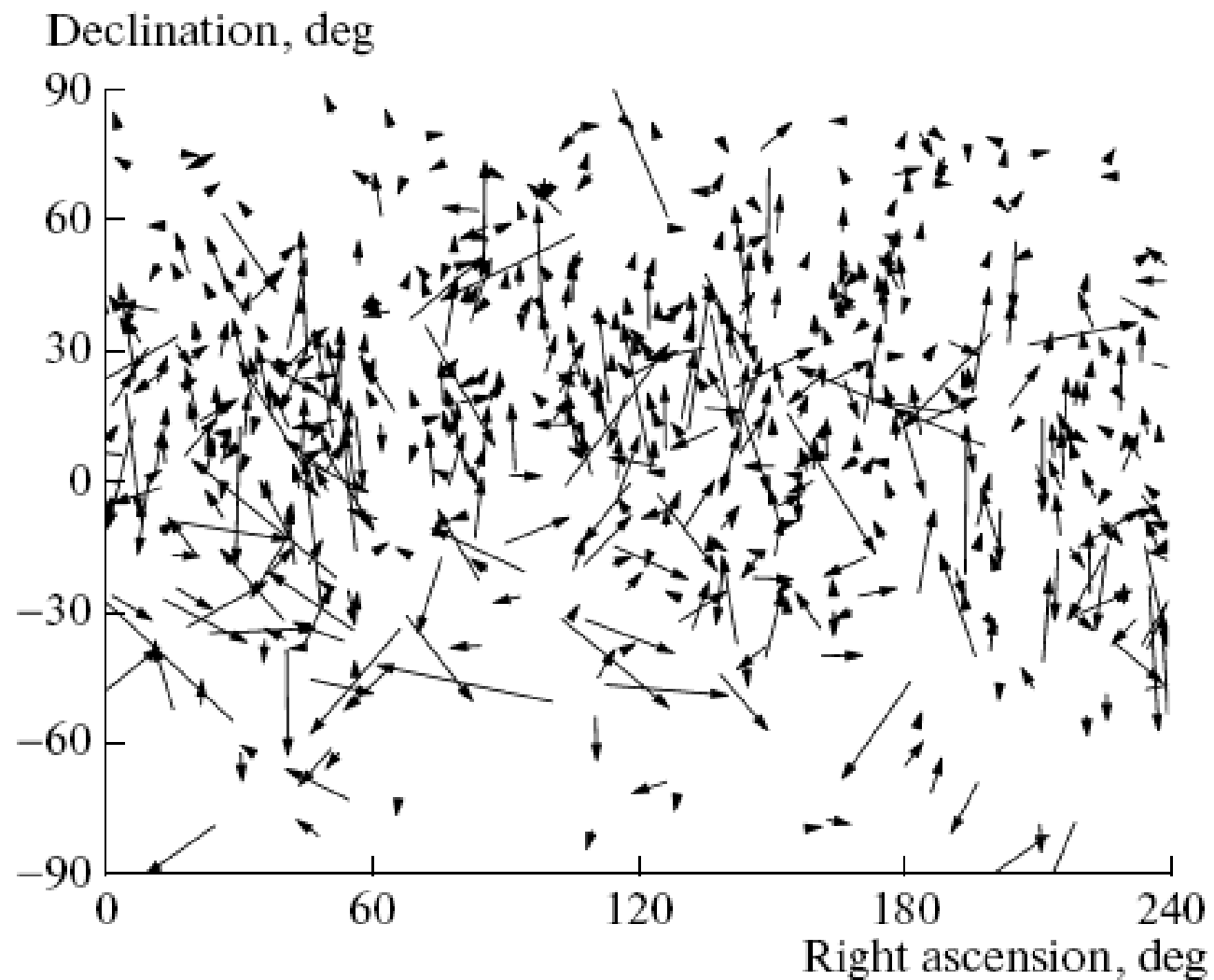
- 1) Прецессионное движение джета
- 2) Вспыхивающие облака плазмы в джете

Требуется новый каталог, в котором учитываются изменения в структуре источников

# Движение 2145+067 (был «определяющим»)



# Видимые движения радиоисточников

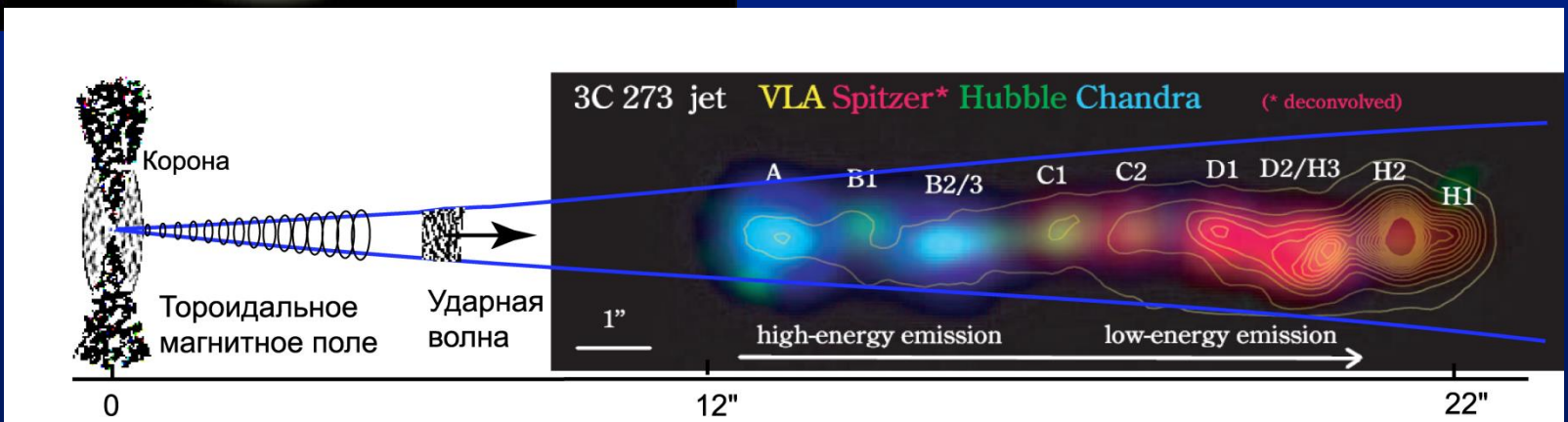
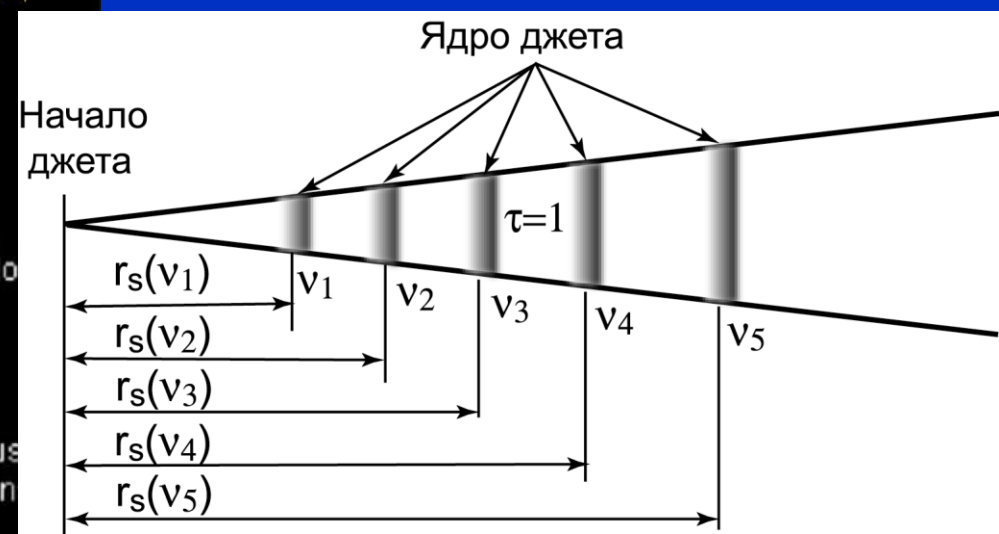
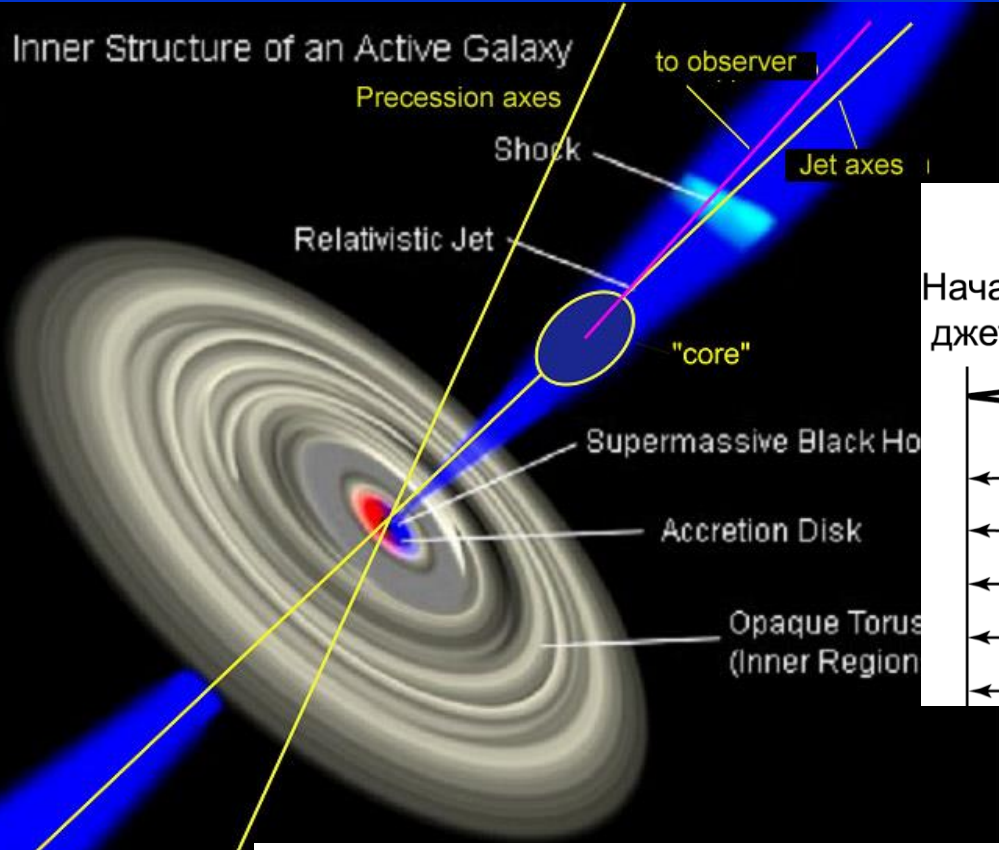


**Fig. 1.** The distribution of the apparent motions of radio sources depending in right ascension and declination.

# Физика джета и понятие «радиоисточник»

$$r_s \sim v^{-1} \Rightarrow$$

$$8\text{GHz} \rightarrow 40\text{GHz} \Delta\tau_g \approx 10 \div 20 \text{ ns} !$$





# GAIA – ICRF2

ICRF2 contains the precise position of 3414 compact radio sources and comes with an accuracy floor of 40 microarcsec ( $\mu\text{as}$ ) in each coordinate for the whole set.

The three groups of sources in ICRF2 are:

- – 295 defining sources with a positional accuracy usually better than 0.1 mas in both coordinates but sometimes extending to 0.3 mas. This is generally better than the accuracy in Gaia DR1.
- – 922 non-VCS sources observed in several sessions, with a typical accuracy of 0.2 to 0.3 mas but sometimes extending to several mas. About 75% of the sources in this category have formal uncertainties smaller than in Gaia DR1.
- – 2197 VCS-only sources observed usually in a single VCS session. These have a wide range of quoted accuracies from 0.2 mas to several tens of mas and a median value around 1 mas. Within this group we may expect to find good Gaia solutions deviating from the radio positions by 50 mas without calling for exotic physical effects in the sources.

Out of the 3414 ICRF2 sources, a tentative optical match was obtained at least once for 2750 sources. But near the Gaia detection limit around  $G = 20.7$  a source is not necessarily detected in every field crossing depending on the noise, the location in the field of view, etc.

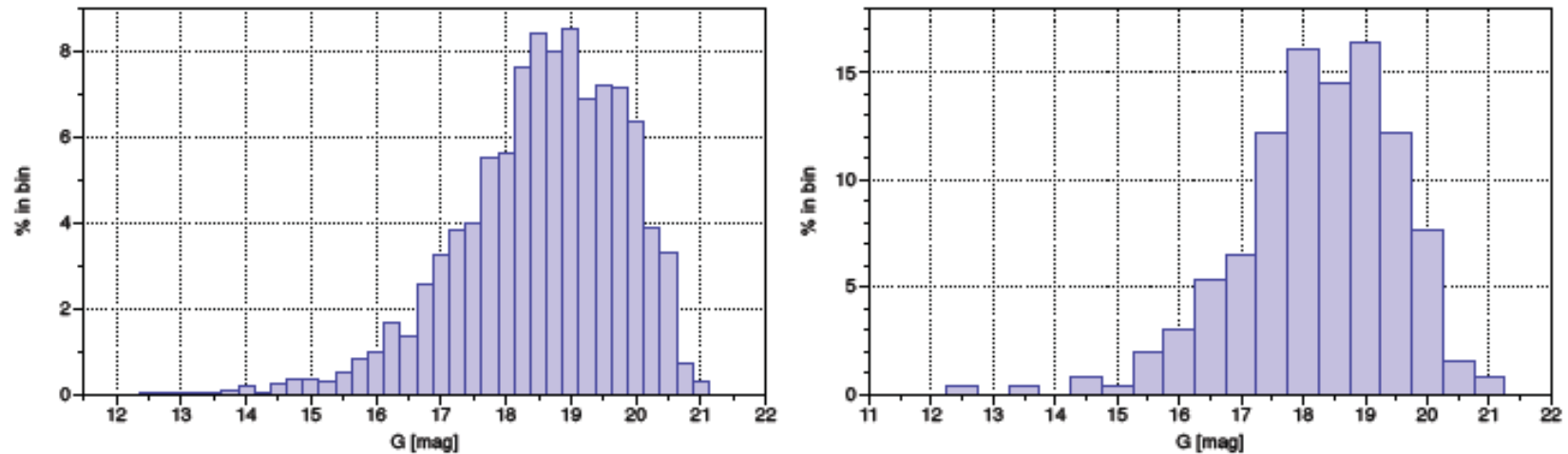


Fig. 1. Distribution of the  $G$  magnitudes of ICRF2 sources with calibrated photometric data in the auxiliary quasar table. *Left*: all 2152 sources. *Right*: the 260 defining sources.

**Gaia Data Release 1. The reference frame and the optical properties of ICRF sources.** F. Mignard, S. Klioner, L. Lindegren, et al.  
Astronomy & Astrophysics 2016

Coordinate differences in right ascension and declination are computed as

$$\Delta\alpha^* = (\alpha_{\text{DR1}} - \alpha_{\text{ICRF2}}) \cos \delta, \quad \Delta\delta = \delta_{\text{DR1}} - \delta_{\text{ICRF2}},$$

from which the angular separation between the two positions is obtained as

$$\rho = \sqrt{\Delta\alpha^{*2} + \Delta\delta^2}.$$

**Table 1.** Number of ICRF sources with angular separations  $\rho < \rho_{\text{max}}$  between the optical and radio positions. In brackets are the percentages of sources in the group below the given limits.

ICRF group	$\rho_{\text{max}}$ (mas)					
	0.5	1	5	10	50	150
all	451	971	1884	2054	2173	2191
(%)	(20)	(44)	(86)	(94)	(99)	(100)
defining	113	186	245	258	261	262
(%)	(43)	(71)	(94)	(98)	(100)	(100)
non-VCS	167	333	556	599	620	640
(%)	(26)	(52)	(87)	(94)	(97)	(100)
VCS-only	171	452	1083	1197	1262	1289
(%)	(13)	(35)	(84)	(93)	(98)	(100)

It is seen that 94% of the optical positions are within 10 mas of the radio position of the associated ICRF2 source. This is quite remarkable given the limited time coverage and the numerous limitations of the astrometric solutions for Gaia DR1.

We define the normalised coordinate differences as

$$X_\alpha = \frac{\Delta\alpha^*}{\sqrt{\sigma_{\alpha^*,\text{Gaia}}^2 + \sigma_{\alpha^*,\text{ICRF}}^2}}, \quad X_\delta = \frac{\Delta\delta}{\sqrt{\sigma_{\delta,\text{Gaia}}^2 + \sigma_{\delta,\text{ICRF}}^2}},$$

C. This category contains sources with angular separations exceeding 10 mas that are statistically significant in relation to the formal uncertainties. This is where we are most likely to find a clear reason for the offset of the optical centre from the radio centre, caused for example by the host galaxy or a nearby faint star. The category includes 35 sources.

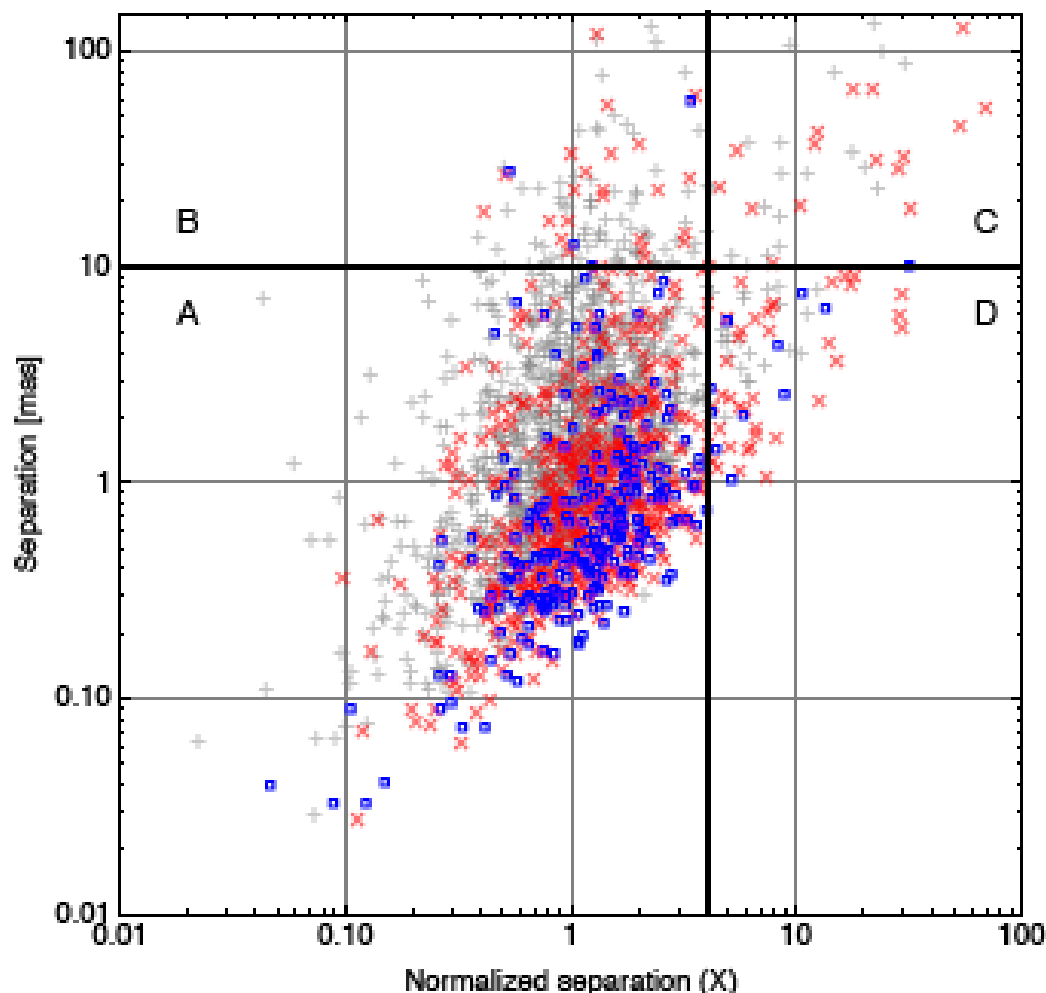


Fig. 13. Angular separation  $\rho$  versus normalised separation  $X$  for 2191 ICRF sources. Defining sources as shown as blue squares, non-VCS sources as red crosses, and VCS-only sources as pale grey plus signs. The four regions labelled A, B, C, D are separated by  $\rho = 10$  mas and  $X = 4.1$ .

The main conclusions are:

- The G magnitudes span a range from 12.4 to 21.0 mag with the bulk of sources between 17 and 20 mag.
- The formal accuracy of the optical positions has a floor at 0.25 mas for  $G < 17$  mag, gradually increasing to a few mas at  $G = 20$ . There is no systematic difference between defining and non-defining ICRF sources in terms of their optical accuracies versus magnitude.
- The overall agreement between the optical and radio positions is excellent: the angular separation is  $< 1$  mas for 44% of the sources and  $< 10$  mas for 94% of the sources. For the defining sources the corresponding numbers are 71% and 98%.
- For most of the 6% sources with angular separations above 10 mas the optical–radio offsets are consistent with the stated formal uncertainties of the data, but for a quarter of them the offsets are statistically significant. Individual examination of a number of these cases show that a likely explanation for the offset can often be found, for example in the form of a bright host galaxy or nearby star.
- Among the sources with good optical and radio astrometry we found no indication of physical optical–radio offsets exceeding a few tens of mas. For most sources the true offsets are likely to be less than 1 mas.

# Определение и измерение параметров вращения Земли

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,

$\Delta\epsilon, \Delta\psi$ -нутація в наклоне и долготе или  $X, Y$ -координаты небесного промежуточного полюса в НСК.

# Точность и оперативность определения ПВЗ РСДБ нового поколения (VGOS)

	Параметры	Точность	Периодичность получения решения	Временное разрешение	Задержка в получении результатов
ПВЗ	UT1-UTC	5 мкс	7 дней в неделю	10 минут	Квазиреальное время
	$d\psi, d\varepsilon$	$25-50 \cdot 10^{-6}$ уг.сек	7 дней в неделю	1 сутки	Квазиреальное время
	$x_p, y_p$	$25-50 \cdot 10^{-6}$ уг.сек	7 дней в неделю	10 минут	Квазиреальное время
	$dx_p/dt, dy_p/dt$	$8-10 \cdot 10^{-6}$ /сутки	7 дней в неделю	10 минут	Квазиреальное время
ЗСК	Ряды координат $x, y, z$ (одно решение за сессию)	2-5 мм	7 дней в неделю	1 сутки	1 сутки
	Отдельные эксперименты по определению координат $x, y, z$	2-5 мм	7 дней в неделю	менее 1 суток	Квазиреальное время.
	Сводное годовое многосесссионное решение (координаты и скорости пунктов)	1-2 мм  0.1-0.3 мм/год	ежегодно	-	1 месяц

**Погрешности определения ПВЗ**  
 $x_p, y_p \sim 3-5$  мкс дуги/сутки,  $UT \sim 0,5$  мкс/сутки

# Теория нутации IAU2000 и наблюдения

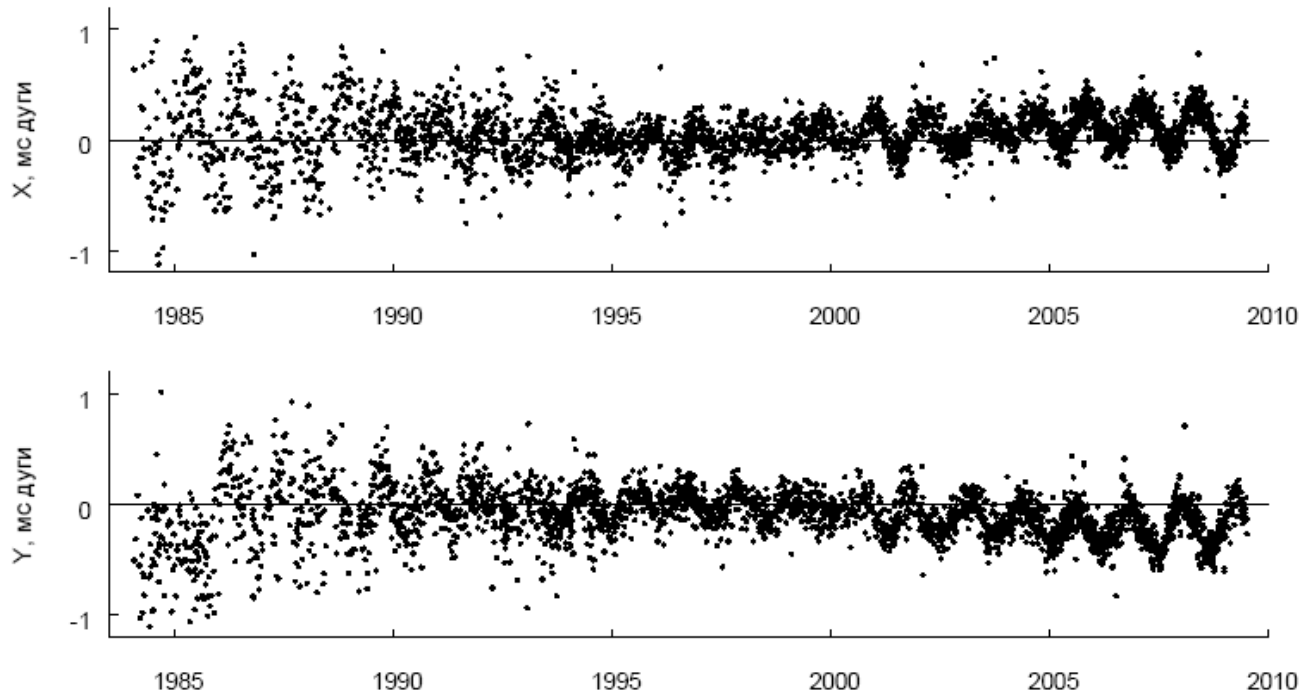


Рис. 1. Разности между наблюдаемыми углами нутации и теорией IAU2000A, mas.

The Free Core Nutation (FCN) is a mode related to non-alignment of the rotation axis of the core and of the mantle. It has a long period (of 432 days) in the celestial frame and is a retrograde mode.

The physical parameters involved are the flattening of the Core Mantle Boundary (CMB) and the deformation of the CMB induced by the dynamic pressure.

This mode is also called the Nearly Diurnal Free Wobble (NDFW, period of about 1 day), if observed in the terrestrial reference frame.



# Изучение гравитационного поля Земли

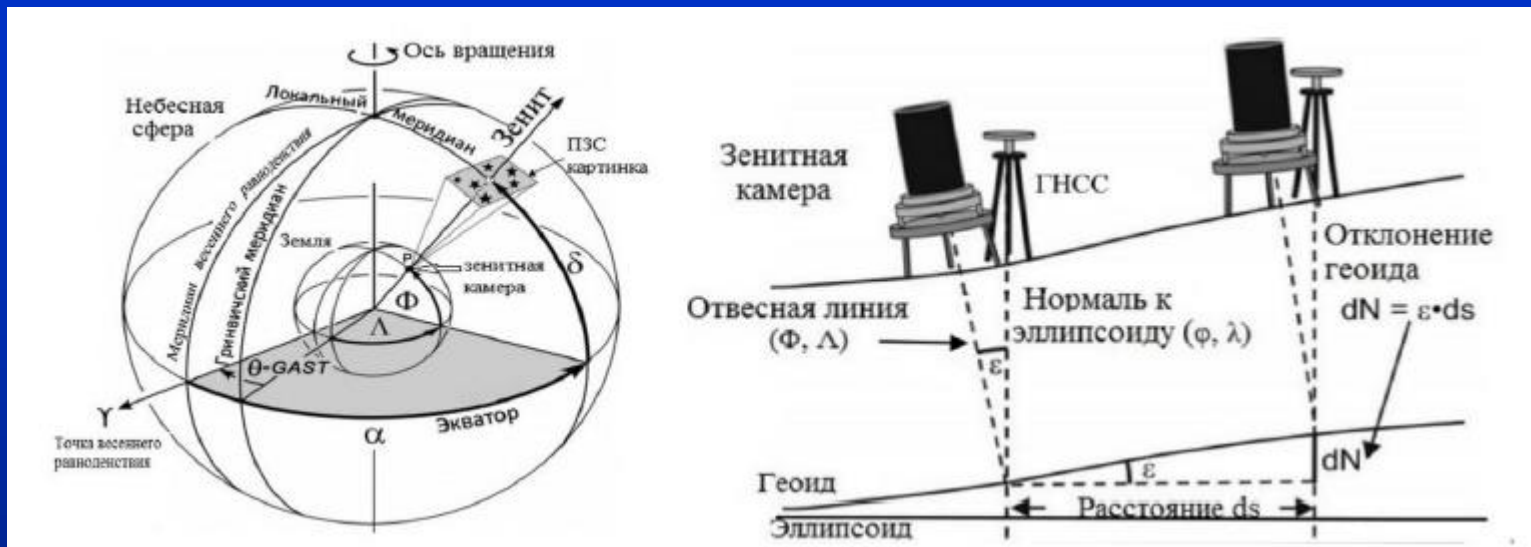
- Глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС) типа ГЛОНАСС/GPS/GALILEO/BAIDOU имеют ряд неоспоримых преимуществ, таких как непрерывность навигации, глобальное покрытие и высокие точности определения местоположения. Но существует ряд ситуаций, в которых уровень сигналов ГНСС либо существенно снижается (каньоны, туннели, закрытые помещения, локальное подавление сигналов), либо сигналы пропадают полностью (под землей, под водой, на других планетах).
- Поэтому для потребителей, требующих непрерывного определения местоположения в любых условиях обстановки, целесообразно использовать комплексную навигационную систему, включающую как навигационную аппаратуру потребителя ГНСС, так и аппаратуру навигации по геофизическим полям – аномальному гравитационному полю Земли (ГПЗ) и аномальному магнитному полю Земли (МПЗ).

# Космические и наземные методы

GRACE, GOCE – глобальные модели ГПЗ (~150 степени и порядка)

Наземная съемка – разрешение (метры – километры)

# Определение УОЛ астрономо-геодезическим методом



Наиболее точным, оперативным и удобным для полевых измерений на сегодняшний день является астрогеодезический метод, реализуемый на перебазированных цифровых телескопах. Это единственный способ, который способен обеспечить погрешность 0,2 угл. сек. при оперативности выполнения одного измерения менее 1 часа.

# Система высот на основе понятия геоида

Геопотенциальным числом точки на физической поверхности называется разность значения потенциалов в исходном пункте и исследуемом:

$$C = W_0 - W_P,$$

$W_0$  – значение гравитационного потенциала в исходном пункте;

$W_P$  – значение гравитационного потенциала в пункте P.

Геопотенциальное число может быть получено из совместных измерений превышений  $dh$  и силы тяжести  $g$  по линии нивелирования:

$$W_0 - W_P = \int_0^P g dh .$$

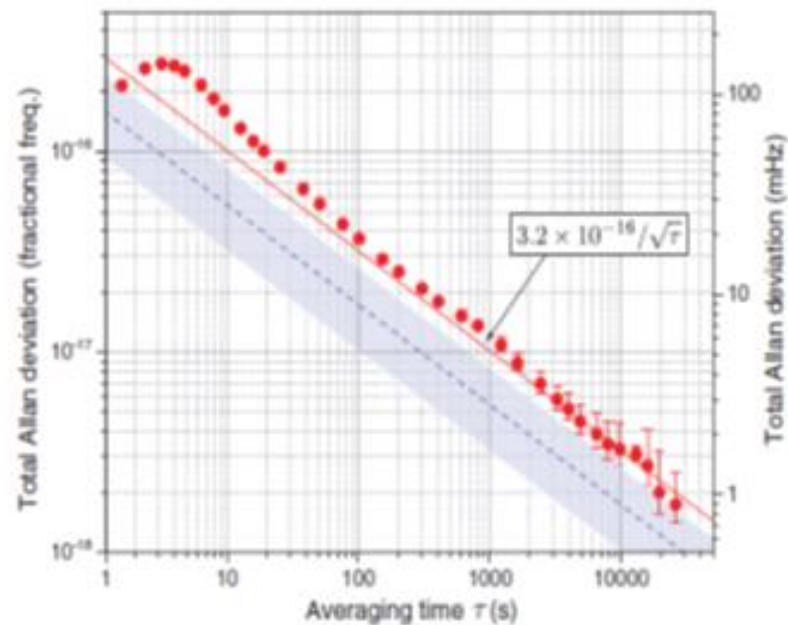
# Высотная основа и частота стандарта частоты

Скорость течения времени для двух наблюдателей, которые разнесены по высоте на расстояние  $\Delta l$  является разной, разницу в скорости течения времени можно выразить простой формулой

$$\frac{d\tau}{dT} = 10^{-18} \frac{\Delta l}{1 \text{ см}}$$

Другими словами, поднимая или опуская часы на 1 см, мы меняем частоту стандарта частоты на  $10^{-18}$ .

Эти простые эксперименты были проведены и наличие эффекта было подтверждено.



Сейчас созданы часы с точностью  $1.6 \times 10^{-18}$  на основе иттербия (Yb).

[N. Hinkley et al., An Atomic Clock with  $10^{-18}$  Instability. SCIENCE, VOL 341, p.1215, 2013]

Важные изменения произошли в последнее десятилетие, когда физики освоили оптические переходы в атомах для стабилизации частоты. Так, были созданы часы на ионах алюминия  $Al^+$  с точностью хода  $8,6 \times 10^{-18}$  [C.W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, and T. Rosenband, Phys. Rev. Lett. 104, 070802 (2010)].

Эти часы имеют большие размеры и не являются транспортабельными.

Недавно были созданы атомные часы на оптических переходах, которые можно поместить на космический аппарат. Точность хода часов -  $7,8 \times 10^{-17}$ . Объем, который занимают часы, всего  $0,54 \text{ м}^3$  [J. Cao, P. Zhang, J. Shang, K. Cui, J. Yuan, S. Chao, S. Wang, H. Shu, X. Huang, A compact, transportable single-ion optical clock with  $7.8 \times 10^{-17}$  systematic uncertainty, Appl. Phys. B (2017) 123:112].

Помимо наличия высокостабильных стандартов частоты необходима система сличения частоты стандартов и система синхронизации часов. Прототипы подобных систем также созданы. Так, в Японии проведены эксперименты по сличению стандартов частоты на расстоянии 15 км с использованием оптоволокна, которые продемонстрировали относительное расхождение частоты на уровне  $10^{-18}$  на интервале измерений полгода [Tetsushi Takano et al. Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks, NATURE Photonics, 2016, V. 10, 662-668]. Кроме этого, продемонстрирована возможность использования высокостабильных стандартов частоты для измерения гравитационного потенциала Земли, а значит, и высотной основы с сантиметровой точностью.

Подобные работы активно проводятся и в других странах: США, Германии, Франции. В частности, в NIST (США) при финансовой поддержке NASA, DARPA проведены работы по сличению стандартов частоты на атомах иттербия, которые показали систематическое расхождение частоты на уровне  $10^{-18}$  и относительную нестабильность около  $3 \times 10^{-19}$  [W. F. McGrew et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level. Nature, 2018, v. 564, doi.org/10.1038/s41586-018-0738-2].

## IERS Conventions (2010)

Gérard Petit<sup>1</sup> and Brian Luzum<sup>2</sup> (eds.)

IERS Conventions Centre

<sup>1</sup> Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)

<sup>2</sup> US Naval Observatory (USNO)

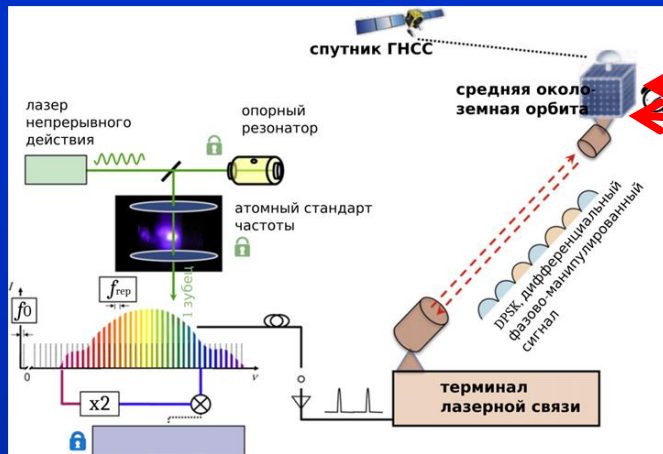
Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie  
Frankfurt am Main 2010

From the assessment of the zenith models against ray tracing for the most used wavelengths in **Laser Ranging**, it can be concluded that these zenith delay models have overall rms errors for **the total zenith delay below 1mm across the whole frequency spectrum** (Mendes and Pavlis, 2003; Mendes and Pavlis, 2004).

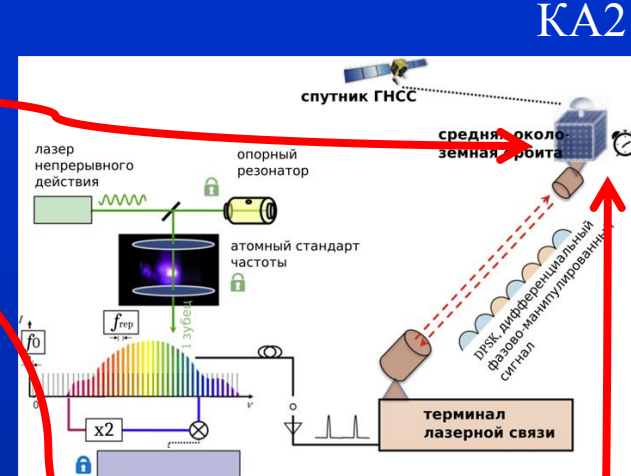
**Только использование лазерной связи и передачи информации по лазерному каналу позволит достичь точности 1-3 пс**



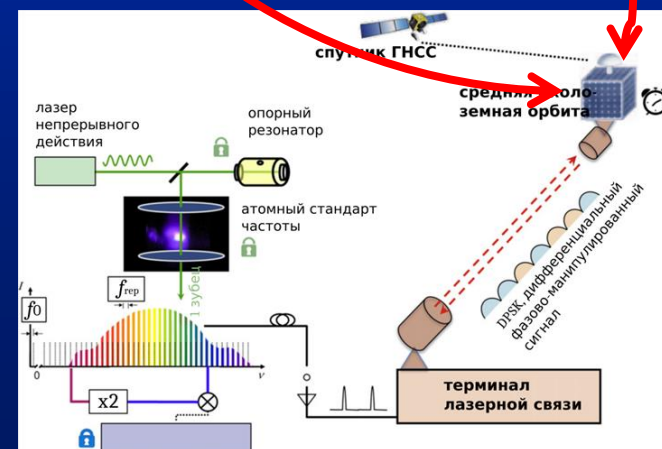
# Принцип работы системы



Пункт А



Пункт В



Пункт С

КА2

КА3

КА1

Часы на всех КА синхронизированы с пикосекундной точностью, разность их хода очень мала (относительное расхождение шкал времени на уровне  $10^{-16} \tau^{1/2} \cong 30$  фс за сутки)

- Достаточно наблюдать один КА с любого наземного пункта
- Число и положение пунктов определяется конкретной задачей

# Заключение

1. Развитие астрометрии связано с построением систем координат нового поколения.
2. Особое значение имеет ввод в действие новой системы VGOS(VLBI2010), основанной на малых антеннах
3. Построение высотной основы с использованием высокостабильных часов с сантиметровой точностью в глобальном масштабе
4. Создание новой атомной шкалы времени на основе часов, расположенных на борту КА
5. Создание принципиально новой автономной пространственно - временной системы отсчета на основе группировки космических аппаратов, оснащенных высокостабильными атомными стандартами частоты с нестабильностью  $10^{-16} - 10^{-17}$  за  $100 - 1000$  с, обеспечивающей определение координат с мм точностью