

THE ORIENTATION OF THE DYNAMICAL FRAMES  
RELATIVE ICRF BY USE OF OPTICAL AND RADAR  
OBSERVATIONS NEAR-EARTH ASTEROIDS (NEAs)  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ОТНОСИТЕЛЬНО ICRF ПО ОПТИЧЕСКИМ И  
РАДАРНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ АСТЕРОИДОВ,  
СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ (АСЗ)

E.I. Yagudina

Institute of Applied Astronomy RAS,  
10 Nab. Kutuzova, St. Petersburg, 191182, Russia, *eiya@ipa.nw.ru*

**ABSTRACT.** ICRF (practical realization of ICRS) is now adopted as the fundamental celestial frame in astronomy. It is based on the positions of the extragalactic radio sources obtained by VLBI observations. Zero-point of right ascensions of ICRF was chosen in a such way that the right ascension of 3C273B quasar was taken from FK5 at the same epoch. The Hipparcos catalogue is the primary realization of the ICRF at optical wavelengths. The rigid model rotation of FK5 with respect to ICRF was adopted for connecting Hipparcos and FK5, the origin of ICRF axes is located at barycentre of the solar system. The dynamical systems (the DE ephemerides, JPL USA; EPM, Russia) are related to ICRF and at present this relation is at sub-milliarcsecond level. To provide the continuity of changing the reference systems, the main plane of the ICRF was chosen in such a way, that its orientation in space is within the range of errors characteristic of the ground observations, coincides with position of "dynamical" equator FK5 catalogue at J2000.0. At present new VLBI observations will give new sources for extending the ICRF as well as future space astrometry missions (DIVA, FAME, SIM etc.) for extension of ICRF over million stars. In spite of the fact that ICRF is a quasi-inertial system there are a great number of problems associated with the use of the ICRF, the main of them being the connection of ICRF to dynamical systems. The parameters of this connection are known with insufficient accuracy and further work is necessary on the problem of mutual orientation of these systems at the new level of accuracy using different new observations of different solar system objects. For this purpose radar and

optical observations of the asteroids (mainly Near Earth Asteroids-NEAs) have been used. The combined solution gave us six parameter orientations which are in good agreement with another authors.

**Key words:** ICRF system, dynamical frame, Hipparcos system, optical FK5 system, radar and optical observations, Near-Earth Asteroids (NEAs), system orientation parameters, position of equinox.

### 1. Введение

XXIII Генеральная Ассамблея Международного Астрономического Союза приняла решение считать основной системой отсчета в астрономии систему ICRF (практическая реализация ICRS-International Celestial Reference System) с 1 января 1998 г. Система была определена на основе РСДБ наблюдений 610 точечных внегалактических радиоисточников. Для обеспечения непрерывности в процессе смены систем отчета выбор основной плоскости ICRF в новой системе был сделан так, чтобы ее ориентация в пространстве совпадала с положением "динамического" экватора каталога FK5 на эпоху J2000.0. Нуль-пункт прямых восхождений в новой системе таков, что прямое восхождение квазара 3C278B было заимствовано из FK5 на ту же эпоху. Оптическая составляющая новой опорной системы реализована на основе каталога Hipparcos, подобно тому, как прежняя система координат реализовывалась каталогом FK5. Начало осей ICRF помещено в барицентр Солнечной системы. Связь оптической и радио систем получена с помощью РСДБ наблю-

дений радиозвезд на уровне формальной точности 1 mas для каждой оси. Эфемериды JPL (динамическая система) привязаны к ICRF уже с 1995 г. Считается, что в настоящее время эта ориентация выполнена на уровне точности десятых долей mas. В настоящее время продолжают наблюдения РСДБ с привлечением новых источников и уже построены новые каталоги в ICRF. В ближайшем будущем будет происходить распространение системы ICRF на миллионы звезд с помощью новых космических астрометрических миссий.

Однако при использовании новой системы, проблема взаимной ориентации динамической и других систем еще остается актуальной и сейчас: необходимо продолжать работу по взаимной ориентации систем на уровне точности, соответствующей настоящему моменту. В уже классической работе Folkner et al. (1994 г.) для привязки DE200/LE200 к ICRF были использованы 14-летние РСДБ измерения и LLR измерения (с 1969 г.) и получены параметры ориентации с точностью около 3 mas. В статье (Standish et al., 1995) связь динамической системы DE403/LE403 и ICRF определена по величине в несколько mas. Для этого были использованы РСДБ наблюдения космических зондов по отношению к источникам из радио каталога и скомбинированы с планетоцентрическими наблюдениями зондов. Точность определения параметров ориентации около 1 mas. Такие РСДБ наблюдения космических аппаратов очень точные, но редки и выполняются на небольших интервалах времени. Необходимо же определять эти параметры с каждой новой реализацией ICRF и новой эфемеридой. Недавно в работах Батракова и Чернетенко были получены параметры ориентации DE403 и DE405 на основе наземных наблюдений малых планет и 48 малых планет, выполненных с помощью программы Hipparcos. Мы предлагаем для этой цели использовать наблюдения АСЗ, поскольку существуют современные оптические и радарные наблюдения АСЗ в нескольких появлениях. Наши результаты предварительные, но уже показывают, что наблюдения могут быть использованы для этой цели. Для определения ориентации ICRF к динамическим системам DE200 и DE403 используются оптические и радарные наблюдения 30 АСЗ и 4 астероидов из основного пояса. Результаты сравниваются с параметрами ориентации, полученными другими авторами.

## 2. Проблема ориентации ICRF по отношению к динамическим системам

В настоящее время современные оптические наблюдения внешних планет и их спутников уже отнесены к системе ICRF самими наблюдателями (пу-

тем трансформации наблюдений от системы своего каталога в Hipparcos). Тоже относится к наблюдениям астероидов и АСЗ. "Старые" наблюдения АСЗ в нашем случае были отнесены к ICRF следующим образом. Известно, что каталог Hipparcos отнесен к системе ICRF и считается реализацией этой системы в оптическом диапазоне. Для установления связи каталогов FK5 и Hipparcos Mignard и Froeschle (Mignard and Froeschle, 2000) сравнили положения 1233 тщательно отобранных единичных звезд, общих для FK5 и Hipparcos. Три угла ориентации между FK5 и Hipparcos на эпоху J2000.0 имеют следующие значения (в mas):

$$\epsilon_x = -19.9 \pm 2.3, \epsilon_y = -9.1 \pm 2.3, \epsilon_z = 22.9 \pm 2.3.$$

Переход координат от FK5 к Hipparcos (т. е. к ICRF):

$$\alpha_{ICRF} \cos \delta = \alpha_{FK5} \cos \delta + \epsilon_x \cos \alpha \sin \delta + \epsilon_y \sin \alpha \sin \delta - \epsilon_z \cos \delta,$$

$$\delta_{ICRF} = \delta_{FK5} - \epsilon_x \sin \alpha + \epsilon_y \cos \alpha \quad (1)$$

Таким образом, при использовании этой схемы (1) наблюдения из FK5 могут быть переведены в систему Hipparcos и тем самым в систему ICRF. Динамические системы отсчета представляются эфемеридами планет, Луны и малыми телами Солнечной системы. Связь между динамической системой и ICRF может быть получена с помощью наблюдений планет и астероидов, сделанными относительно источников, заданных в ICRF или уже отнесенными к этой системе каким-либо другим путем. В статьях (Батраков и др., 1998; Батраков и Чернетенко, 2001; Чернетенко, 2007) было показано, как на основе оптических наблюдений избранных малых планет и малых планет, наблюдаемых в рамках программы Hipparcos, были получены параметры ориентации DE403 по отношению к ICRF. Алгоритм определения этих параметров приведен в упомянутых статьях, где сами углы ориентации связаны с параметрами ориентации, использовавшимися прежде при нахождении параметров ориентации динамических систем и каталогов звезд. Используя обозначения принятые в работах Батракова и Чернетенко, запишем в общем виде ориентацию каталожной системы (ICRF) относительно динамической углами поворота  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  вокруг осей x,y,z динамической системы координат:

$$\Delta\alpha = \operatorname{tg} \delta \cos \alpha \epsilon_x + \operatorname{tg} \delta \sin \alpha \epsilon_y - \epsilon_z,$$

$$\Delta\delta = -\sin \alpha \epsilon_x + \cos \alpha \epsilon_y.$$

При определении параметров ориентации звездных каталогов относительно динамических систем обычно использовались поправки к нуль-пункту каталога  $\Delta A, \Delta D$ , поправка долготы Солнца,  $\Delta L$  и наклона эклиптики к экватору,  $\Delta\epsilon$ :

$$\Delta\alpha = -\Delta A + \Delta L \cos \epsilon (1 + \operatorname{tg} \epsilon \operatorname{tg} \delta \sin \alpha) - \Delta\epsilon \operatorname{tg} \delta \cos \alpha,$$

$$\Delta\delta = -\Delta D + \Delta L \sin \epsilon \cos \alpha + \Delta\epsilon \sin \alpha.$$

Связь между углами поворота систем и поправками нуль-пунктов определяется следующим образом:

$$\epsilon_x = -\Delta\epsilon, \epsilon_y = \Delta L \sin \epsilon, \epsilon_z = \Delta A - \Delta L \cos \epsilon, \quad (2),$$

где  $\Delta D$  характеризует постоянную ошибку системы склонений каталога, не связанную с углами поворота. Для скоростей изменения этих углов ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ), имеем:

$$\omega_x = -\Delta\dot{\epsilon}, \omega_y = \Delta\dot{L} \sin \epsilon, \omega_z = \Delta\dot{A} - \Delta\dot{L} \cos \epsilon.$$

### 3. Описание наблюдательного материала и редукации

В статье (Yagudina, 2002) было показано, как на основе обработки 16600 оптических и 345 радарных наблюдений 34 астероидов (30-АСЗ и 4 астероида главного пояса) были получены параметры ориентации каталога FK5 относительно динамической системы DE403. В настоящей работе, пользуясь уравнением (1) (секция 2), переводим цитируемые в статье наблюдения в Hipparcos и, соответственно, в ICRF. Интервал, на котором представлены оптические наблюдения АСЗ, более 90 лет, радарные наблюдения стали проводиться с 1968 года. Все оптические наблюдения были взяты из MPC каталога (система FK5), а радарные наблюдения (запаздывание и доплер) из базы данных "Small astrometric radar observations", JPL. Точность оптических наблюдений меняется от 1" до 0.5" и менее для наблюдений после 1965 года. Точность доплеровских наблюдений изменяется от 30.0 Hz до 0.1 Hz, и от 140 до 0.1  $\mu$ s для запаздывания. Точность радарных наблюдений растет и увеличивается количество радарных наблюдений, имеющих 2-3 появлениями. Все вычисления были сделаны в рамках системы ЭРА-Эфемеридные Расчеты в Астрономии. Орбиты астероидов были подсчитаны численным интегрированием релятивистских уравнений движения с учетом возмущений от всех больших планет и Луны, а также шварцшильдовских членов от Солнца. Наряду с параметрами орбиты вычислялись и параметры ориентации динамических систем DE по отношению к ICRF по модели, описанной в разделе 2.

### 4. Результаты

В работах (Батраков и Чернетенко 2001; Чернетенко, 2007) наблюдения 48 малых планет спутником Hipparcos были дополнены рядом Николаевских наблюдений 15 Избранных малых планет, переведенных на систему ICRF. Наши результаты (вместе

**Таблица 1. Параметры ориентации ICRF относительно динамической системы DE200/LE200**

Парам. ориент. mas, и mas/y	Батраков и др., 1998 12 м. пл.	Ягудина, 2002, 30 АСЗ и 4 м.пл.	Батраков и Чернетенко, 2001, 12 м.пл. + Hip. 1991.25
эпоха	19910702.0	2001.8	
$\epsilon_x$	19.3±17.3	19.1±12.2	2.5±1.3
$\epsilon_y$	-18.8±17.9	-23.0±15.8	-12.7±2.2
$\epsilon_z$	41.8±26.0	36.9±10.9	1.4±3.3
$\omega_x$	1.3±0.5	0.2±0.1	0.4±0.3
$\omega_y$	-0.4±0.6	0.4±0.3	-0.7±0.3
$\omega_z$	1.6±1.0	-0.2±0.2	-0.9±0.6

**Таблица 2 Параметры ориентации ICRF относительно динамической системы DE403/LE403**

Параметры ориентации mas,mas/y	Чернетенко, 2007 15 м. планет + 48 м. пл. HIP.	Настоящая работа, 2007 30 АСЗ
$\epsilon_x$	-0.1±0.9	-0.3±1.9
$\epsilon_y$	3.0±1.1	4.8±1.5
$\epsilon_z$	-5.2±1.6	-8.2±1.9
$\omega_x$	0.15±0.08	0.2±0.1
$\omega_y$	0.66±0.10	0.9±0.20
$\omega_z$	-0.40±0.17	-0.5±0.2

с результатами Батракова и Чернетенко) приведены в таблицах 1 и 2. Из таблиц видно, что наши результаты уступают результатам Батракова и Чернетенко, поскольку у приведенных авторов в обработку включены очень точные наблюдения спутника Hipparcos. Кроме того, нами использовались оптические наблюдения АСЗ с 1910 года, когда точность их была невысока. В таблице 2 приведены результаты определения параметров ориентации ICRF по отношению к DE403. Здесь уже взяты наблюдения АСЗ начиная с 1950, когда точность их стала менее 0.5". Параметры ориентации по результатам наблюдений малых планет спутником Hipparcos гораздо лучше результатов, полученным только по наземным наблюдениям, но наземные наблюдения дают возможность вычислять скорости изменения углов, чего нельзя сказать о наблюдениях спутника.

## 5. Заключение

- Предварительные результаты обработки радарных и оптических наблюдений 30 АСЗ и 4 астероидов главного пояса по привязке системы ICRF к динамическим системам DE200 и DE403 показывают вполне разумные значения параметров ориентации. В дальнейшем необходимо переводить оптические наблюдения (при точности не хуже 0.4") в систему ICRF и включать их в совместную обработку с современными ПЗС и радарными наблюдениями АСЗ.
- В ближайшее время привлечение новых наблюдений астероидов, сближающихся с Землей, (как ПЗС так и радарных после 2000 г.) и исключение старых оптических наблюдений до 1968 г. (с ошибкой более 0.4") позволит уточнить параметры ориентации DE405/LE405 по отношению к ICRF.

## Литература

- Folkner W.M et al.: 1994, *Astron. Astroph.*, **287**, 279.  
Standish E.M.: 1990, *Astron. Astroph.*, **233**, 252.  
Батраков Ю.В., Горель Г.К., Гудкова Л.А., Чернетенко Ю.А.: 1998, *Труды ИПА РАН*, **3**, 69.  
Батраков Ю.В., Чернетенко Ю.А.: 2001, *Труды ИПА РАН*, **6**, 148.  
Чернетенко Ю.А.: 2007, *Тезисы Второй Всероссийской конференции КВНО-2007*, **287**, 277.  
Mignard F. and Froeschle M.: 1997, in *Proc. ESA Symp. "Hipparcos-Venice 97"*, **ESA SP402**, 57.  
Krasinsky G.A. and Vasiliev M.V.: 1996, in *Proc. IAU Colloq.*, **165**, 239.  
Yagudina E.I.: 2002, in *Proc. of Asteroids, Comets, Meteors, Technical University, Berlin*, 385.