

УДК 523.89

Ю. А. Нефедьев, Н. Г. Ризванов, Р. Р. Шаймухаметов

Астрономическая обсерватория им. В. П. Энгельгардта
422526, Россия, Татарстан, Зеленодольский район, п. Октябрьский

Сравнительная оценка точности современных астрометрических каталогов

Предлагается метод сравнительной оценки точности астрометрических каталогов в случайном отношении. Оценка производится путем сравнения координат звезд в исследуемых каталогах с координатами звезд в каталоге HIPPARCOS на различные годы. Методом наименьших квадратов определяются дисперсии положений и собственных движений звезд в исследуемых каталогах.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ СУЧАСНИХ АСТРОМЕТРИЧНИХ КАТАЛОГІВ, Нефедьєв Ю. А., Різванов Н. Г., Шаймухаметов Р. Р. — Запропоновано метод порівняльної оцінки точності астрометричних каталогів у випадковому відношенні. Оцінку здійснено шляхом порівняння координат зірок в досліджуваних каталогах з даними каталогу HIPPARCOS на різні роки. Методом найменших квадратів визначаються дисперсії положень та власних рухів зірок в досліджуваних каталогах.

A COMPARATIVE ESTIMATION OF THE ACCURACY OF MODERN ASTROMETRIC CATALOGUES, by Nefedjev Yu. A., Rizvanov N. G., Shaimukhametov R. R. — A method for a comparative estimation of the accuracy of astrometric catalogues in the random meaning is offered. The estimation is done by comparison of star coordinates in the catalogues under study with star coordinates in the HIPPARCOS catalogues for various epochs. Variances of star positions and proper motions in the catalogues under investigation are determined by the method of least squares.

Предлагается новый метод сравнительной оценки точности астрометрических каталогов в случайном отношении. Оценка производится путем сравнения координат звезд в исследуемых каталогах с координатами звезд в каталоге HIPPARCOS [2] на различные эпохи. Новизной метода является разделение влияния случайных ошибок положений и собственных движений на разности данных двух сравниваемых каталогов. Дисперсии и стандартные отклонения σ положений и собственных движений звезд в каталогах «Tycho» [2], АСТ [7], TRC [3], «Tycho-2» [6], ФОН [4] определялись методом наименьших квадратов (МНК) после исключения так называемых проблемных звезд, отмеченных флагами. Например, из 2539913 звезд

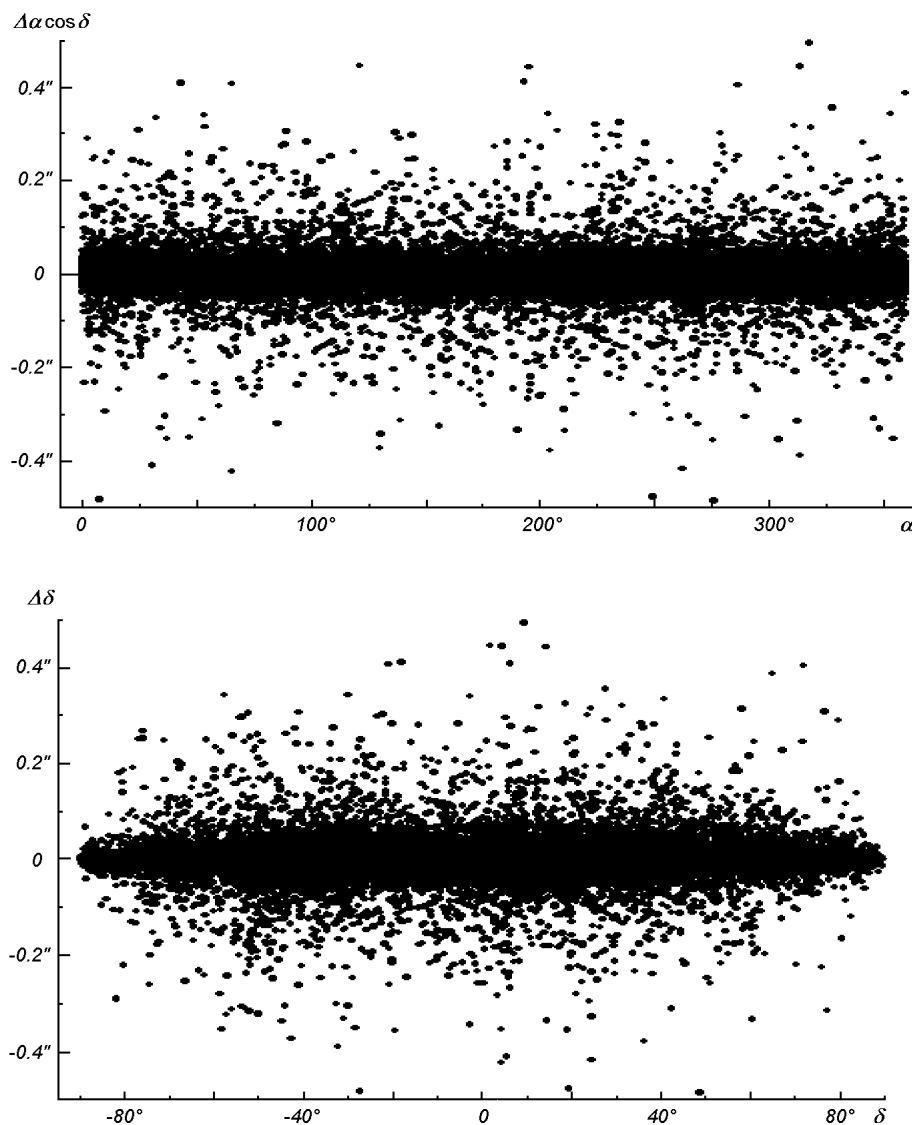


Рис. 1. Разности координат общих звезд в каталогах «Tycho-2» и HIPPARCOS на эпоху J1991.25 и равноденствие J2000.0

каталога «Tycho-2» исключено 122532 звезды. Каталог HIPPARCOS имеет достаточно высокую точность положений и собственных движений (приблизительно $0.001''$ и $0.001''/\text{год}$) и по решению МАС принят в качестве астрометрического стандарта. Это позволяет оценивать точность координат и собственных движений звезд в других каталогах путем их сравнения с каталогом HIPPARCOS (см., например, [5]). На рис. 1 и 2 приведены разности координат общих звезд в каталоге HIPPARCOS и соответственно в каталогах «Tycho-2» и FON.

Выберем общие звезды в каталоге HIPPARCOS и исследуемом каталоге ($i = 1, 2, \dots, n$) и введем следующие обозначения: $\alpha_{\text{H}}, \delta_{\text{H}}, \alpha_{\text{K}}, \delta_{\text{K}}$ — прямые восхождения и склонения i -й звезды в каталоге HIPPARCOS и в исследуемом каталоге; $\mu_{\alpha_{\text{H}}}, \mu_{\delta_{\text{H}}}, \mu_{\alpha_{\text{K}}}, \mu_{\delta_{\text{K}}}$ — собственные движения по прямому восхождению и склонению i -й звезды в каталоге HIPPARCOS и в исследуемом каталоге; $T_{\text{H}}, T_{\text{K}}$ — эпохи каталога HIPPARCOS и исследуемого

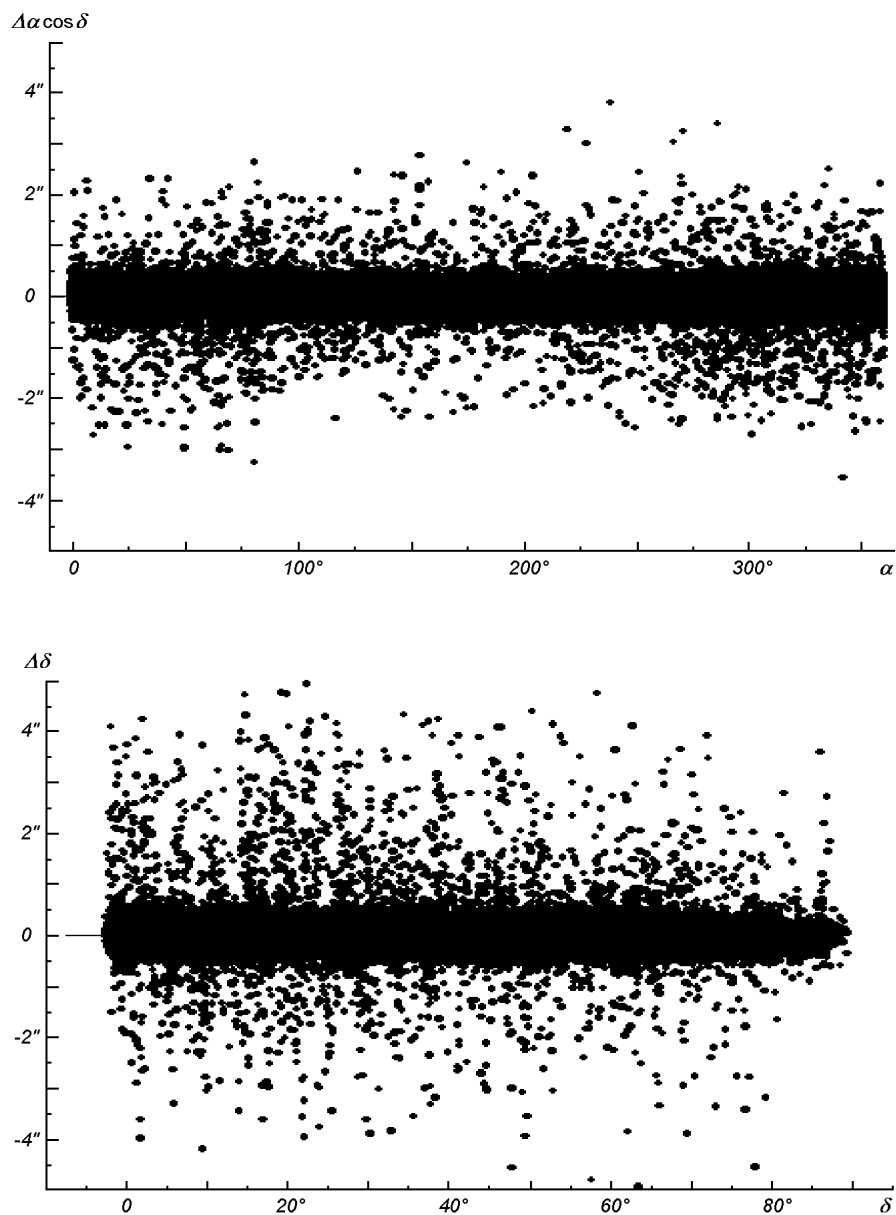


Рис. 2. Разности координат общих звезд в каталогах FON и HIPPARCOS на эпоху J1991.25 и равноденствие J2000.0

каталога ($T_H = J1991.25$); $\Delta T_H = T_j - T_H$ и $\Delta T_K = T_j - T_K$ — интервалы времени между произвольной эпохой T_j и эпохами T_H, T_K ; $D_{\alpha H}, D_{\delta H}, D_{\alpha K}, D_{\delta K}, D_{\mu\alpha H}, D_{\mu\delta H}, D_{\mu\alpha K}, D_{\mu\delta K}$ — дисперсии координат и собственных движений звезд в каталоге HIPPARCOS и исследуемом каталоге.

Образум разности координат i -й звезды между исследуемым каталогом и HIPPARCOS для произвольной эпохи T_j :

$$(\Delta\alpha \cos\delta)_{ij} = (\alpha_K - \alpha_H)_{ij} \cos\delta_{ij}, \Delta\delta_{ij} = (\delta_K - \delta_H)_{ij}. \quad (1)$$

Очевидно, что

$$\begin{aligned} \alpha_{Hj} &= (\alpha_{HTH} + \mu_{\alpha H} \Delta T_H)_{j}, \\ \delta_{Hj} &= (\delta_{HTH} + \mu_{\delta H} \Delta T_H)_{j}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\alpha_{kj} &= (\alpha_{kTk} + \mu_{\alpha k} \Delta T_k)_j, \\ \delta_{kj} &= (\delta_{kTk} + \mu_{\delta k} \Delta T_k)_j.\end{aligned}\quad (3)$$

Напомним две известные формулы математической статистики [1]. Пусть $a = \text{const}$, X , Y — случайные величины, D — оператор дисперсии. Тогда

$$D(aX) = a^2 D(X), \quad D(X \pm Y) = D(X) + D(Y). \quad (4)$$

Напомним также, что в данной статье подразумеваются три вида эпох каталогов. 1. Средняя эпоха наблюдения звезд исследуемого каталога, от которой отсчитываются промежутки времени ΔT . 2. Стандартная эпоха каталога (для всех исследуемых каталогов $T_c = J.2000.0$). 3. Годы (эпохи), для которых строятся условные уравнения (для каждого каталога десять уравнений или более), например 1940, 1950, 1960, ..., 2000 и т. д.

Из уравнений (1)–(4) следует:

$$\begin{aligned}D_{\Delta\alpha\cos\delta} &= D_{\alpha k} + D_{\mu_{\alpha k}} \Delta T_k^2 + D_{\alpha H} + D_{\mu_{\alpha H}} \Delta T_H^2, \\ D_{\Delta\delta} &= D_{\delta k} + D_{\mu_{\delta k}} \Delta T_k^2 + D_{\delta H} + D_{\mu_{\delta H}} \Delta T_H^2,\end{aligned}\quad (5)$$

где $D_{\Delta\alpha\cos\delta}$, $D_{\Delta\delta}$ — дисперсии правых частей в уравнениях (1). Они вычисляются по известным формулам. Найдем средние значения разностей координат в уравнениях (1):

$$\overline{\Delta\alpha\cos\delta} = \sum_{i=1}^n (\Delta\alpha\cos\delta)_i / n, \quad \overline{\Delta\delta} = \sum_{i=1}^n (\Delta\delta)_i / n. \quad (6)$$

Тогда

$$\begin{aligned}D_{\Delta\alpha\cos\delta} &= \sum_{i=1}^n [(\Delta\alpha\cos\delta)_i - \overline{\Delta\alpha\cos\delta}]^2 / (n-1), \\ D_{\Delta\delta} &= \sum_{i=1}^n [(\Delta\delta)_i - \overline{\Delta\delta}]^2 / (n-1),\end{aligned}\quad (7)$$

Ошибки положений и собственных движений звезд в каталоге HIPPARCOS приняты равными около $0.001''$ и $0.001''/\text{год}$. Поэтому можно положить: $D_{\alpha H} = 1$, $D_{\delta H} = 1$, $D_{\mu_{\alpha H}} = 1$, $D_{\mu_{\delta H}} = 1$. Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}L_{\alpha} &= D_{\Delta\alpha\cos\delta} - D_{\alpha H} - D_{\mu_{\alpha H}} \Delta T_H^2, \\ L_{\delta} &= D_{\Delta\delta} - D_{\delta H} - D_{\mu_{\delta H}} \Delta T_H^2.\end{aligned}\quad (8)$$

Тогда, как следует из выражений (5), условные уравнения для определения дисперсий положений и собственных движений звезд в исследуемых каталогах можно представить в виде

$$D_{\alpha k} + D_{\mu_{\alpha k}} \Delta T_k^2 = L_{\alpha}, \quad D_{\delta k} + D_{\mu_{\delta k}} \Delta T_k^2 = L_{\delta}. \quad (9)$$

Значения L_{α} , L_{δ} , ΔT_H^2 и ΔT_k^2 легко вычисляются.

Уравнения (9) решаются методом наименьших квадратов. Число условных уравнений определяется числом эпох j . Например, 1940, 1950, 1960, ..., 2040. Положения звезд в исследуемых каталогах предварительно приводятся к средней эпохе наблюдения звезд данного каталога. Затем уже от этой эпохи они приводятся к эпохам j . Положения звезд каталога HIPPARCOS также приводятся к эпохам j . Затем для каждой эпохи j составляются условные уравнения по формулам (9). Число эпох j может быть произвольным, но не менее двух. На практике достаточно десяти уравнений для получения не смещенных и состоятельных МНК-оценок.

Прежде чем исследовать точность координат и собственных движений звезд в случайном отношении, нужно показать отсутствие систематических отличий рассматриваемых каталогов относительно каталога HIPPARCOS либо оценить влияние систематических ошибок каталогов на величину дисперсий разностей координат и собственных движений. Для определения возможных систематических отклонений систем пяти каталогов от системы каталога HIPPARCOS были использованы средние значения $\Delta\alpha\cos\delta$, $\Delta\delta$ разностей координат звезд из исследуемых каталогов и каталога HIPPARCOS для разных эпох j , полученных при составлении условных уравнений (9). При этом предполагалось, что математические ожидания случайных ошибок положений и собственных движений в данных каталогах стремятся к нулю.

Систематические отклонения Δ положений и собственных движений звезд в пяти каталогах от их положений и собственных движений в каталоге HIPPARCOS приведены в табл. 1. Видно, что в систематическом отношении по координатам наиболее точными являются каталоги «Tycho» и «Tycho-2», по собственным движениям — каталоги АСТ и «Tycho-2».

Так как систематические ошибки положений и собственных движений звезд в пяти каталогах оказались отличными от нуля, было исследовано возможное влияние систематических ошибок на точность определения дисперсий разностей координат и собственных движений. После громоздких

Таблица 1. Систематические отклонения Δ положений и собственных движений звезд из каталогов «Tycho», АСТ, TRC, «Tycho-2», ФОН от данных каталога HIPPARCOS по всем общим звездам

Каталог	Δ_α , 0.001"	Δ_δ , 0.001"	$\Delta\mu_\alpha$, 0.001"/год	$\Delta\mu_\delta$, 0.001"/год	Число общих звезд
«Tycho»	0.0	0.0	-0.184	-0.270	103010
АСТ	-4.0	-0.8	-0.029	0.008	106864
TRC	-4.1	0.5	0.445	-0.010	108019
«Tycho-2»	0.2	1.5	-0.055	-0.162	113439
ФОН	-14.9	15.2	-0.127	0.178	51738

Таблица 2. Значения стандартных отклонений координат и собственных движений звезд для каталогов «Tycho», АСТ, TRC, «Tycho-2», ФОН относительно каталога HIPPARCOS по всем общим звездам

Каталог	σ_α , 1"	σ_δ , 1"	$\sigma_{\mu\alpha}$, 1"/год	$\sigma_{\mu\delta}$, 1"/год	Число общих звезд
«Tycho»	0.173	0.192	0.046	0.051	103010
АСТ	0.376	0.384	0.006	0.006	106864
TRC	0.564	0.575	0.013	0.005	108019
«Tycho-2»	0.127	0.131	0.008	0.007	113439
ФОН	0.351	0.799	0.006	0.008	51738

Таблица 3. Точность пяти астрометрических каталогов согласно оценкам их авторов

Каталог	Положения	Собственные движения
«Tycho»	0.025"	0.025"/год
АСТ	0.025	0.003
TRC	0.025	0.0024
«Tycho-2»	0.060	0.0025
ФОН	0.200	0.003

математических выкладок было показано, что систематические ошибки при использовании предлагаемого метода оценки дисперсий не влияют на конечные результаты, так как при выводе формул (9) они уничтожаются.

В табл. 2 представлены результаты МНК-решения 10 уравнений (9) для пяти каталогов по всем общим звездам в исследуемых каталогах и каталоге HIPPARCOS в виде стандартных отклонений координат и собственных движений $(\sigma_\alpha, \sigma_\delta, \sigma_{\mu\alpha}, \sigma_{\mu\delta})$, а в табл. 3 приведены оценки точности, полученные авторами каталогов. Различие этих данных объясняется тем, что во всех исследованных каталогах некоторая часть звезд обременена большими случайными ошибками (рис. 1 и 2), а в табл. 3 предполагается, что этих случайных ошибок нет.

Вследствие влияния случайных ошибок собственных движений звезд для эпохи J.1950.0 отклонения положений звезд каталога «Tycho-2» относительно каталога HIPPARCOS увеличиваются до $\pm 1''$. У каталогов ACT и TRC отклонения координат некоторых звезд от каталога HIPPARCOS для эпохи J1991.25 достигают соответственно $23''$ и $15''$.

Эти «аномальные» звезды и дают большие значения σ в табл. 2, т. е. значительно ухудшают точность положений звезд в исследуемых каталогах в случайном отношении. Если их исключить, то значения σ существенно уменьшаются и приближаются к авторским оценкам точности каталогов.

«Аномальные» звезды сильно затрудняют использование каталогов при точных астрометрических исследованиях. Это очевидно. На практике трудно предвидеть, какие звезды вписываются в рамки $\pm 0.025''$, $\pm 0.060''$ или $\pm 0.2''$ в смысле «каталог минус HIPPARCOS». У каталога «Tycho-2», как и у остальных, это основной недостаток, который требует дополнительных усилий для его устранения или хотя бы уменьшения числа «аномальных» звезд.

Авторы выражают искреннюю благодарность старшему научному сотруднику Л. И. Рахимову за ряд ценных советов.

Работа выполнялась при финансовой поддержке ИПА РАН (Санкт-Петербург).

1. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. — М.: Наука, 1986.— 447 с.
2. ESA 1997. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues. — ESA-sp-1200.
3. Hog E., Kuzmin A., Bastian U., et al. Tycho reference catalogue // Astron and Astrophys.— 1998.—335.—P. L65.
4. Kislyuk V., Yatsenko A., Ivanov G., Pakulak L., Sergeeva T. The FON astrographic catalogue (FONAC): Version 1.0 // Proceeding of Journées 1999 & IX. Lohrman-Kolloquium «Motion of Celestial Bodies, Astrometry and Astronomical. Reference Frame», September 13—15, 1999. — Dresden: Lohrman Observatory, 2000.—P. 61.
5. Schwan H. Systematic relations between the HIPPARCOS catalogue and major (fundamental) catalogues of the 20th century (Paper II) // Astron and Astrophys.—2002.—387.—P. 1123—1134.
6. *The Tycho-2 catalogue*, positions, proper motions, and two color photometry of the 2.5 million stars. — Copenhagen, 2000.
7. Urban S. E., Corbin T. E., Wycoff G. L. The ACT reference catalogue // Astron. J.—1998.— 115, N 1212.—P. 2161—2166.

Поступила в редакцию 12.02.03