

УДК 524.62-32

**Сравнение собственных движений звезд
сводного каталога GPM
с данными современных астрометрических каталогов**

С. П. Рыбка

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

На основании сравнения каталога GPM с данными «Tycho-2», CMC и NPM1 выполнено исследование систематических и случайных разностей собственных движений, положений и фотометрических характеристик общих звезд в 185 областях неба с галактиками. Главное внимание уделено изучению собственных движений. В результате показано наличие систематических разностей собственных движений, зависящих в большей степени от положений звезд, чем от их блеска. Средние квадратичные значения этих разностей составляют 0.002—0.004"/год. Случайные погрешности собственных движений GPM, найденные по внешней сходимости, составляют 0.009"/год.

ПОРІВНЯННЯ ВЛАСНИХ РУХІВ ЗІРОК ЗВЕДЕНОГО КАТАЛОГА GPM З ДАНИМИ СУЧАСНИХ АСТРОМЕТРИЧНИХ КАТАЛОГІВ, Рыбка С. П. — На підставі порівняння каталога GPM з даними «Tycho-2», CMC та NPM1 виконано дослідження систематичних і випадкових різниць власних рухів, положень і фотометричних характеристик спільних зірок у 185 полях неба з галактиками. Доведено існування систематичних різниць власних рухів, що в більшій мірі залежать від положень зірок, ніж від їхнього блиску. Середні квадратичні значення цих різниць складають 0.002—0.004"/рік. Випадкові похибки власних рухів GPM, знайдені за зовнішнім порівнянням, складають 0.009"/рік.

COMPARISON OF THE GPM PROPER MOTIONS WITH THE DATA FROM MODERN ASTROMETRIC CATALOGUES, by Rybka S. P. — Proper motions, positions, B , V magnitudes and $(B-V)$ colors from the GPM catalogue were compared with those from the Lick NPM1, the Carlsberg CMC, and the ESA «Tycho-2» catalogues. It turned out that the systematic differences of proper motions were in the range from 2 to 4 mas/yr. The external data also proved that the accuracy of the GPM proper motions is on average about 9 mas/yr, i. e., a factor of 1.1 less accurate than internally determined.

ВСТУПЛЕНИЕ

Новая версия сводного каталога собственных движений звезд GPM [2] включает также фотометрические и координатные данные, выбранные из

больших астрометрических каталогов. Она содержит собственные движения 52 805 звезд от 8^m до 15.5^m в 185 областях неба с галактиками севернее -25° по склонению. Кроме того, более 85 % звезд обеспечено точными положениями и трехцветными B , V , R -величинами. Координаты даны в системе каталога HIPPARCOS, фотометрия — в системе Джонсона. В среднем по всему каталогу точность собственных движений составляет $0.008''/\text{год}$, положений — $0.25''$, B -величин — 0.25^m , V -величин — 0.18^m , R -величин — 0.25^m . Наиболее ценными в GPM являются собственные движения звезд, выведенные относительно галактик и полученные в результате объединения индивидуальных каталогов, составленных по плану КСЗ. Безусловно, представляет интерес провести сравнение собственных движений звезд этого каталога с данными, которые содержатся в других каталогах, чтобы оценить таким образом их систематические и случайные различия.

Ранее в [1] было выполнено сравнение собственных движений каталогов GPM и АСТ [7]. В этой работе показано, что предельные значения систематических разностей достигают $\pm 0.004''$, а средние по абсолютной величине равны $0.0014''/\text{год}$. В настоящее время имеется еще несколько каталогов высокоточных собственных движений звезд, которые можно использовать для поставленной цели.

Прежде всего это каталог NPM1 [6], представляющий первую часть Ликской программы по определению собственных движений звезд относительно галактик. Он покрывает 72 % северного неба вне Млечного Пути и содержит 148 940 звезд от 8^m до 18^m в 899 областях размером 6×6 квадратных градусов от $+89^\circ$ до -23° по склонению. Для каждой звезды в каталоге приводятся абсолютные собственные движения, положения и фотографические B -величины, а 97 % процентов из них обеспечены также и показателями цвета $B - V$. Средняя квадратичная ошибка определения годовых собственных движений равна $0.005''$, положений — $0.15''$, B -величин — 0.20^m , показателей цвета — 0.15^m .

Совсем недавно стал доступным астрометрический опорный каталог «Tycho-2» [5], полученный из наблюдений на спутнике Европейского космического агентства HIPPARCOS. Он покрывает все небо и содержит положения, собственные движения и двухцветную фотометрию 2 539 913 звезд ярче $V = 11.5^m$. Координаты и собственные движения получены в системе ICRS, задаваемой каталогом HIPPARCOS. Стандартные ошибки положений составляют $0.06''$, собственных движений — $0.0025''/\text{год}$, V_T -величин — 0.10^m .

Имеется также сводный каталог СМС [4], содержащий 180 812 положений, 176 591 V -величин и 155 055 собственных движений звезд севернее -40° по склонению. Он включает все 11 меридианных каталогов, полученных на Карлсбергском автоматическом меридианном круге в 1984—1998 гг. Предельная V -величина составляет 13.0^m для СМС 1-4, 14.8^m — для СМС 5-6 и 15.4^m — для СМС 7-11. Положения звезд определены в новой системе координат ICRS со средней погрешностью $0.07''$. Точность V -величин равна 0.05^m в СМС 4-10 и 0.03^m в СМС 11. Собственные движения звезд получены из комбинации положений СМС с теми, которые имеются в других каталогах на более раннюю эпоху. Типичная ошибка этих данных составляет 0.003 — $0.004''/\text{год}$.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗНОСТЕЙ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗВЕЗД

Отождествление звезд GPM в каталогах «Tycho-2», СМС и NPM1 проводилось на основании сходимости их экваториальных координат в пределах $2''$. Чтобы использовать надежные определения собственных движений, из

Таблица 1. Общие сведения о сравнении астрометрических данных каталогов

Результаты сравнения	TYC2 – GPM	СМС – GPM	NPM1 – GPM
Разности годовых собственных движений			
Количество звезд	8750	1379	4017
Средняя B -величина	11.48 ^m	10.61 ^m	13.00 ^m
$\Delta\mu_{\alpha}\cos\delta$	Δ_s 0.0023"	0.0019"	0.0023"
	ε_s 5	11	9
	σ 102	107	104
$\Delta\mu_{\delta}$	Δ_s 27	23	40
	ε_s 5	13	9
	σ 99	105	104
Разности положений			
Количество звезд	4185	403	—
Средняя B -величина	12.38 ^m	12.65 ^m	—
$\Delta\alpha\cos\delta$	Δ_s 0.05"	0.06"	—
	ε_s 1	5	—
	σ 25	25	—
$\Delta\delta$	Δ_s 6	9	—
	ε_s 2	6	—
	σ 25	27	—

последующего анализа были исключены звезды, имеющие большие расхождения таких данных, как правило, превышающие в три раза ожидаемую ошибку разностей. Количество общих звезд, полученных при сравнении собственных движений каталогов с учетом этого замечания, указано в верхней части табл. 1.

Выделение систематической составляющей в разностях собственных движений звезд вида TYC2 – GPM, NPM1 – GPM и СМС – GPM проводилось аналитическим методом, подробно описанным в [3]. Сущность этого метода заключается в представлении разностей собственных движений или положений звезд рядом специально выбранных ортогональных функций, установлении максимального порядка ряда и нахождении значимых его членов. Так, если Δ_i — разности собственных движений звезд в двух каталогах по прямому восхождению или склонению, то они представляются суммой:

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^g Y_j(\alpha_i, \delta_i, m_i)b_j, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$, N — число общих звезд; α_i, δ_i, m_i — соответственно прямое восхождение, склонение и звездная величина; g — максимальный порядок разложения; b_j — коэффициенты, подлежащие определению; Y_j — ортогональные на множестве точек α_i, δ_i, m_i функции. Последние являются произведением полиномов Эрмита $H_p(y(m))$, полиномов Лежандра $L_n(x(\delta))$ и членов ряда Фурье $F_{kl}(\alpha)$. Индексы могут принимать следующие значения: $p = 0, 1, 2, \dots$; $n = 0, 1, 2, \dots$; $k = 0, 1, 2, \dots$; $l = 1$ или -1 . В зависимости от l и k члены ряда F_{kl} имеют такой вид:

$$F = \begin{cases} 1 & l = 0, \quad k = 0, \\ \cos(lka), & l = 1, \quad k = 1, 2, \dots, \\ \sin(-lka), & l = -1, \quad k = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Так как распределение исследуемых в данной работе общих звезд не является равномерным, функции Y_j не удовлетворяют условию ортогональ-

Таблица 2. Коэффициенты разложения разностей собственных движений звезд по α и их ошибки

j	p	n	k	l	TYC2 – GPM	CMC – GPM	NPM1 – GPM
					b ± ε, 0.0001"/год		
1	0	0	0	0	—	—	—
2	0	0	1	-1	-9±1	—	-10±3
3	0	0	1	1	-7±1	—	—
4	0	0	2	-1	—	—	—
5	0	0	2	1	-7±1	-12±4	-9±2
6	0	1	0	0	—	—	-6±3
7	0	1	1	-1	—	—	—
8	0	1	1	1	-16±1	-14±4	-10±3
9	0	1	2	-1	13±1	11±4	13±3
10	0	1	2	1	—	—	—
11	0	2	0	0	-12±2	—	-9±3
12	0	2	1	-1	-8±1	—	-13±3
13	0	2	1	1	-5±2	—	—
14	0	2	2	-1	-8±1	-12±4	—
15	0	2	2	1	—	—	—
16	1	0	0	0	—	—	—
17	1	0	1	-1	—	—	5±2

Таблица 3. Коэффициенты разложения разностей собственных движений звезд по δ и их ошибки

j	p	n	k	l	TYC2 – GPM	CMC – GPM	NPM1 – GPM
					b ± ε, 0.0001"/год		
1	0	0	0	0	-5±1	-8±4	13±3
2	0	0	1	-1	13±1	—	19±3
3	0	0	1	1	-9±1	-8±3	—
4	0	0	2	-1	10±1	—	—
5	0	0	2	1	-5±1	—	-4±2
6	0	1	0	0	—	-8±4	—
7	0	1	1	-1	-13±2	-11±4	-18±4
8	0	1	1	1	11±1	—	11±3
9	0	1	2	-1	-2±1	—	—
10	0	1	2	1	5±1	—	7±3
11	0	2	0	0	—	13±4	—
12	0	2	1	-1	8±1	—	10±3
13	0	2	1	1	—	—	7±3
14	0	2	2	-1	7±1	—	—
15	0	2	2	1	8±1	—	—
16	1	0	0	0	-4±1	—	5±2
17	1	0	1	-1	3±1	—	7±2
18	1	0	1	1	-4±1	—	—

ности. Поэтому для восстановления ортогональности применялся метод Грама—Шмидта. Чтобы надежно выделить систематические разности, пришлось ограничиться 30 членами ряда (1), так как количество областей неба в сводном каталоге недостаточно для получения приемлемой точности большего числа коэффициентов. В этом случае использовались такие высшие степени для параметров: $p = 1$, $n = 2$ и $k = 2$. Оценка значимости коэффициентов разложения (1) осуществлялась по v^2 -критерию. В табл. 2 и 3 приведены только существенные коэффициенты b_j , полученные при 5 %

уровне значимости, а также ошибки их определения ε . Эти данные использовались при вычислении поля систематических разностей для каждой общей звезды и оценке их точности. Остаточные уклонения после представления исходных разностей собственных движений звезд ортогональными функциями (1) характеризовали их случайную составляющую. Обобщенные результаты, полученные при сравнении каталогов, приводятся в табл. 1. Здесь в верхней части приводится количество общих звезд, их средняя B -величина, средняя квадратичная оценка систематических разностей собственных движений звезд Δ_s и их ошибок ε_s , а также значение случайной составляющей σ . Как видно из табл. 1–3, есть систематические различия в обоих компонентах разностей собственных движений звезд, которые зависят в большей степени от их положений, чем от блеска. Необходимо заметить, что систематические разности вида $\Delta\mu_\alpha \cos\delta$ практически одинаковы по величине для всех трех сравнений каталога GPM и составляют примерно $0.002''/\text{год}$ (см. табл. 1). Что касается разностей $\Delta\mu_\delta$, то для сравнений TYC2 – GPM и CMC – GPM они близки к этому значению, а для NPM1 – GPM эта величина составляет $0.004''/\text{год}$. Последнее происходит несмотря на одинаковый метод определения собственных движений. Анализ коэффициентов разложения разностей собственных движений звезд, которые содержатся в табл. 2 и 3, показал следующее. Для всех трех сравнений одновременно в пределах ошибок определения совпадают три коэффициента по α ($j = 5, 8, 9$) и только один по δ ($j = 7$). Если анализировать по два сравнения, то можно обнаружить больше таких совпадений.

Рассмотрим случайные составляющие разностей собственных движений звезд σ (табл. 1). Эти данные использовались для оценки точности определения собственных движений в каталоге GPM по внешней сходимости. Такие оценки были получены после учета в разностях σ случайных ошибок соответствующих каталогов, использованных при сравнении. В результате найденные таким образом значения средних квадратичных ошибок годовых μ оказались равными $0.0100''$ для $B = 10.6^m$, $0.0095''$ для $B = 11.5^m$ и $0.0090''$ для $B = 13.0^m$. А в целом для всего каталога такая ошибка составляет $0.009''$, поскольку преобладающее большинство звезд слабее 11.5^m . Она в 1.1 раза больше, чем вычисленная по внутренней сходимости ($0.008''$), но все же можно считать, что получено удовлетворительное согласие этих оценок.

СРАВНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ЗВЕЗД

В связи с тем, что положения звезд в каталогах «Tycho-2» и CMC получены в новой системе ICRS с высокой точностью, на основании изучения разностей координат вида TYC2 – GPM и CMC – GPM можно получить независимую оценку систематических и случайных ошибок этих данных в новой версии сводного каталога. Так, большинство звезд первоначальной версии GPM [2] обеспечено точными положениями, выбранными в основном из трех источников: «Tycho-1», USNO-A2 и GSC. Звезды первого каталога были исключены из дальнейшего исследования как не представляющие особенного интереса. Анализ разностей прямых восхождений и склонений общих звезд TYC2 – GPM и CMC – GPM проводился так же, как и в случае собственных движений (см. выше). В результате было установлено незначительное отклонение системы положений каталога GPM от ICRS, которое достигает в среднем $0.05''$ по α и $0.06''$ по δ (см. табл. 1). Случайные ошибки координат в GPM, полученные по внешней сходимости на основании значений σ из табл. 1, составляют $0.25''$. Найденная величина

полностью подтверждает типичную для USNO-A2 погрешность, ведь около 80 % звезд GPM обеспечено положениями именно этого каталога.

СРАВНЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Кроме сравнения положений и собственных движений каталога GPM, было выполнено также сравнение звездных B , V -величин и показателей цвета $B - V$ с имеющимися в каталогах «Tycho-2», СМС и NPM1. Главная цель, как уже отмечалось выше, заключалась в том, чтобы найти систематические и случайные отличия этих данных в GPM. Исследование было ограничено крупномасштабными чертами, присущими всем звездам сравниваемых каталогов без детализации в отдельных площадках неба, исключая данные «Tycho-1». Совокупность исходных разностей фотометрических характеристик общих звезд Δm (ΔB , $\Delta(B - V)$ или ΔV) представлялась при помощи следующих соотношений:

$$\Delta m = c + a(m_{\text{GPM}} - \bar{m}_{\text{GPM}}), \tag{2}$$

где c и a — искомые неизвестные. B_T и V_T из каталога «Tycho-2» предварительно переводились на систему Джонсона. Решение уравнений (2) осуществлялось способом наименьших квадратов, а затем вычислялись оценки систематической составляющей в разностях звездных величин или показателей цвета.

В табл. 4 приведены найденные таким образом величины коэффициентов a и c вместе с ошибками их определения ε , а также даны ошибки единицы веса σ_0 и средние квадратические значения систематических разностей Δm_s . Видно, что в разностях фотометрических характеристик вида TYC2 – GPM и СМС – GPM имеются небольшие, но уверенно определяемые систематические различия, которые составляют в среднем 0.12^m . Более заметные расхождения наблюдаются при сравнении B -величин и показателей цвета $B - V$ каталогов NPM1 и GPM. Так, нуль-пункты этих данных в GPM сдвинуты относительно NPM1 примерно одинаково ($c = -0.28^m$), и есть сильная зависимость $\Delta(B - V)$ от $B - V$. Средние квадратичные значения систематических разностей ΔB достигают 0.28^m , а $\Delta(B - V) = 0.37^m$.

Случайные ошибки B , V -величин и показателей цвета $B - V$, включенных в каталог GPM, были получены на основании σ_0 (табл. 4) после учета соответствующих погрешностей, присущих сравниваемым каталогам. Оказалось, что они составляют 0.21^m для B , 0.19^m для V , 0.22^m для $B - V$ и

Таблица 4. Результаты исследования разностей фотометрических характеристик звезд и их ошибки

Разности каталогов и их количество	ΔB				ΔV				$\Delta(B - V)$			
	$c \pm \varepsilon$	$a \pm \varepsilon$	$\Delta m_s \pm \varepsilon$	σ_0	$c \pm \varepsilon$	$a \pm \varepsilon$	$\Delta m_s \pm \varepsilon$	σ_0	$c \pm \varepsilon$	$a \pm \varepsilon$	$\Delta m_s \pm \varepsilon$	σ_0
	0.01^m											
TYC2–GPM 3893	6 ± 1	-18 ± 1	10 ± 1	33	8 ± 1	-18 ± 1	12 ± 1	28	-3 ± 1	-34 ± 2	12 ± 1	37
СМС–GPM 361	—	—	—	—	12 ± 1	-6 ± 1	13 ± 1	20	—	—	—	—
NPM1–GPM 2469	26 ± 1	9 ± 1	28 ± 1	31	—	—	—	—	30 ± 1	-76 ± 2	37 ± 1	27

вполне соответствуют полученным авторами каталогов-источников по внутренней сходимости.

ВЫВОДЫ

Основные результаты исследования точности собственных движений, положений и фотометрических характеристик звезд GPM, полученные из сравнения с аналогичными данными «Tycho-2», СМС и NPM1, таковы.

Система собственных движений GPM отличается от системы ICRS (каталоги «Tycho-2», СМС) в среднем на $0.0021''$ в $\mu_\alpha \cos \delta$ и $0.0025''/\text{год}$ в μ_δ . Более существенные систематические различия выявлены в разностях собственных движений NPM1 – GPM) по δ . Они достигают $0.0040''/\text{год}$ несмотря на то, что оба каталога получены в близких системах.

Отклонение положений звезд от системы ICRS составляет менее $0.06''$, что почти незаметно по сравнению со случайной ошибкой их определения $0.25''$.

Звездные B , V -величины и показатели цвета $B - V$ имеют небольшие систематические различия с системой Джонсона, равные примерно 0.12^m .

Оценки случайных погрешностей всех данных GPM, полученные путем его сравнения с другими независимыми каталогами, подтверждают найденные по внутренней сходимости.

1. Рыбка С. П. Сравнение собственных движений звезд, полученных относительно галактик, с данными каталога АСТ // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 1.—С. 79—84.
2. Рыбка С. П., Яценко А. И. GPM — сводный каталог абсолютных собственных движений звезд в избранных площадках неба с галактиками // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 5.—С. 70—74.
3. Bien R., Fricke W., Lederle T. Methods for the comparison of Star Positions to be applied in the construction of the FK5 // Veroeff. Astron. Rechen Inst.—1978.—N 29.—P. 23—28.
4. Carlsberg Meridian Catalogues La Palma number 1—11. — Copenhagen Univ. Obs., Royal Greenwich Obs., Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, 1999.—CD-ROM distribution.
5. Hog E., Fabricius C., Makarov V. V., et al. The Tycho-2 Catalogue. — Copenhagen University Obs., 2000.—CD-ROM distribution.
6. Klemola A. R., Jones B. F., Hanson R. B. Lick Northern Proper Motion Program. 1. Goals, organization and methods // Astron. J.—1987.—94, N 2.—P. 501—515.
7. Urbun S. E., Corbin T. E., Wycoff G. L. The ACT Reference Catalog // Astron. J.—1998.—115, N 5.—P. 2161—2166.

Поступила в редакцию 14.11.00