

УДК 521.9(085)

**В. Л. Карбовский¹, П. Ф. Лазоренко¹, М. И. Буромский²,
С. И. Касьян², Л. Н. Свачий¹**

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
e-mail: karb@mao.kiev.ua, laz@mao.kiev.ua, lida@mao.kiev.ua

²Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета им. Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная 3, Киев, 04053
e-mail: nburomsky@rambler.ru

Астрометрический каталог звезд экваториальной зоны КМАСЗ

Создан каталог положений и звездных V -величин звезд до 17^m в зоне склонений от $+2$ до $+5.5^\circ$. Каталог содержит $2.05 \cdot 10^6$ звезд и базируется на наблюдениях, полученных в 2010—2015 гг. на меридианном аксиальном круге МАК ГАО НАН Украины и Астрономической обсерватории Киевского университета им. Тараса Шевченко. Погрешность положений и фотометрии составляет соответственно 0.06 — $0.08''$ и 0.04 — 0.08^m для звезд 11 — 14^m .

АСТРОМЕТРИЧНИЙ КАТАЛОГ ЗІРОК ЕКВАТОРІАЛЬНОЇ ЗОНИ КМАСЗ, Карбовський В. Л., Лазоренко П. Ф., Буромський М. І., Касьян С. І., Свачій Л. М. — Створено каталог положень та зоряних V -величин зірок до 17^m в зоні схилень від $+2$ до $+5.5^\circ$. Каталог містить $2.05 \cdot 10^6$ зірок і базується на спостереженнях отриманих у 2010—2015 рр. на меридіанному аксіальному крузі МАК ГАО НАН України та Астрономічної обсерваторії Київського університету ім. Тараса Шевченка. Похибки положень та фотометрії становлять відповідно 0.06 — $0.08''$ і 0.04 — 0.08^m для зірок 11 — 14^m .

AN ASTROMETRIC CATALOGUE OF STARS IN EQUATORIAL ZONE, КМАСЗ, by Karbovsky V. L., Lazorenko P. F., Buromsky M. I., Kasjan S. I., Svachii L. N. — A catalogue of star positions and V magnitudes for stars down to 17^m in the declination zone from 2 to $+5.5$ was compiled. It contains $2.05 \cdot 10^6$ stars and is based on the observations obtained from

2010 to 2015 at the meridian circle MAC of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine and Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv. The precision of positions and photometry is 0.06—0.08" and 0.04—0.08^m, respectively, for stars of 11—14 magnitude.

ВВЕДЕНИЕ

В результате успешного завершения космической миссии HIPPARCOS были созданы глобальные каталоги HIPPARCOS и Tycho [7, 15], которые с высокой точностью воспроизводят Международную систему координат ICRF в оптическом диапазоне для ярких звезд до 12^m. Актуальной остается задача поддержки и распространения системы этих каталогов на более слабые звезды. Для ее решения применяются дифференциальные наблюдения на астрометрических инструментах с крупноформатными ПЗС-приемниками [13], которые обеспечивают точность положений 0.05...0.2 для звезд 13—16^m. Ситуация коренным образом изменится в связи с созданием каталога GAIA, точность положений звезд в котором будет лучшей приблизительно на три порядка [5, 8].

Программы ПЗС-наблюдений на МАК. С целью распространения системы каталогов HIPPARCOS и Tycho на более слабые звезды путем проведения дифференциальных наблюдений была выполнена модернизация Киевского меридианного аксиального круга (МАК). В 2000 г. на МАК установили ПЗС-камеру ISD017AP, которая в 2010 г. была заменена на более совершенную камеру «Apogee Alta U47» [3, 9, 14] (см. рис. 1).

Проведенная модернизация дала возможность выполнить следующие программы наблюдений:

2001 по 2003 гг.: наблюдение 115 тыс. звезд в 192 площадках с радиоисточниками — объектами ICRF с целью создания опорного астрометрического каталога КМАС1 звезд до $V = 17^m$ в направлении

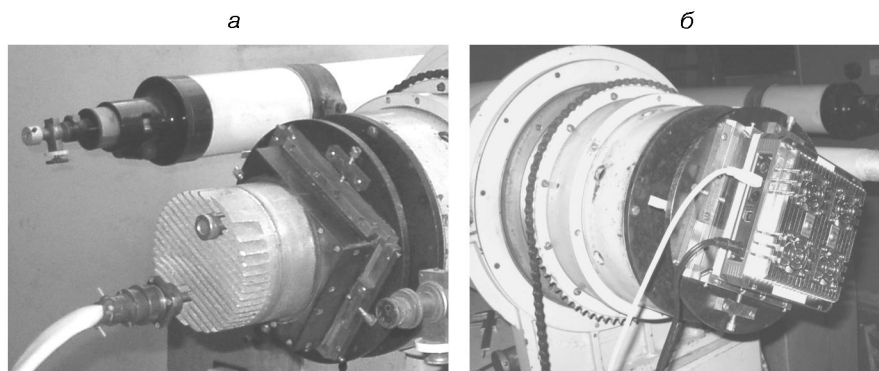


Рис. 1. ПЗС-камеры, установленные на МАК: а — ISD017AP (2001—2005 гг.), б — «Apogee Alta U47» (2010—2015 гг.)

на внегалактические радиоисточники со склонением от 0 до 30 [11]. Использовалась ПЗС-камера ISD017AP. Ошибки положений и фотометрии составили 0.03...0.05 и 0.05...0.07^m соответственно для $V < 14^m$. Каталог размещен в базе данных <http://cdsarc.u-strasbg.fr/>;

2002 по 2015 гг.: долгосрочная программа наблюдений звезд в экваториальной зоне с 4-кратным перекрытием сканированных участков неба, с целью распространения опорной системы HIPPARCOS/Tycho [7] на звезды до $V = 17^m$. Получен каталог КМАС2 1 млн звезд в зоне 0 (ошибки 0.05...0.07 и 0.05...0.08^m для $V < 14^m$; использовалась ПЗС-камера ISD017AP) [4] и каталог КМАС3 2 млн звезд в зоне 2...5.5 (ошибки 0.06...0.08 и 0.04...0.08^m для $V < 14^m$; использовалась ПЗС-камера Arogee Alta U47), составление которого рассматривается ниже.

НАБЛЮДЕНИЯ ЗВЕЗД В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ +2°...+5.5°

Наблюдения звезд в зоне склонений +2...+5.5 проводились на протяжении 2010—2015 гг. Получено больше 38 тыс. сканированных изображений участков неба размером 19.3 19.3 . Один и тот же участок неба сканировался от двух до четырех раз.

Обработка наблюдений. При обработке наблюдений использована методика, которая раньше применялась при создании каталога КМАС2 [4].

После калибровки ПЗС-изображений и выявления изображений звезд осуществлялось вычисление их ПЗС-координат x , y и инструментальных фотометрических величин V^* , отождествление опорных звезд Tycho2, редукция к системе ICRF, вычисление экваториальных координат α , δ и формирование конечного каталога КМАС3. Возможное наличие систематических погрешностей контролировалось путем сравнения положений и фотометрических величин КМАС3 с каталогами UCAC4 и SMC14. На последнем этапе создания каталога выполнялась кросс-идентификация с каталогом NOMAD [10] с целью отсева артефактов (аномальные флуктуации уровня фона, микрометеориты, блики от ярких звезд и т. п.), возможных в случае единичной регистрации изображений слабых звезд.

Вычисление положений фотоцентров. Полученные изображения неба калибровались путем исключения изменений среднего уровня фона по осям координат ПЗС-матрицы X , Y . Это достигалось путем анализа крупномасштабных изменений уровня фона по обеим координатам, их линейной интерполяцией с последующим исключением этих изменений как аддитивной составляющей уровня фона.

С целью обнаружения звезд отсчеты интенсивности пикселей предварительно сглаживались фильтром 3×3 , и в качестве критерия обнаружения звезды было принято превышение усредненного отсчета

над фоном на 1.1 , где — средняя квадратичная флуктуация фона в несглаженном изображении. Такой довольно низкий уровень обнаружения был выбран с целью повышения вероятности регистрации предельно слабых звезд $16...17^m$, хотя, конечно, некоторые флуктуации уровня фона регистрировались как реальные звезды. Количество таких фиктивных регистраций резко увеличивалось для больших V и существенно превышало количество настоящих изображений звезд в диапазоне величин $16...17^m$.

Положения фотоцентров x, y звезд и их инструментальных величин V^* вычислялись путем аппроксимации отсчетов пикселей двумерным гауссовым профилем. В случае расхождения итераций (при отклонениях формы профиля от звездообразного) использовался метод взвешенного центра масс. Профили изображений звезд обычно имеют симметричную форму с параметром размытия $1.3...2.2$ пкл, что отвечает размеру изображений $FWHM = 2.9...5.1$. На рис. 2 показан типичный профиль изображения не очень яркой звезды.

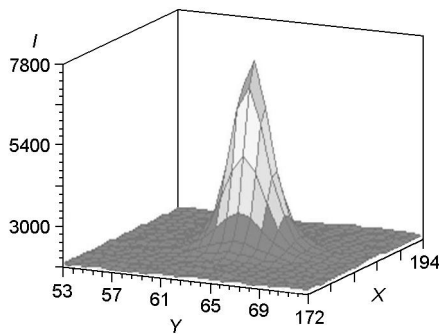


Рис. 2. Профиль изображения звезды (интенсивность дана в отсчетах АЦП, линейные размеры — в пикселях)

Во всем массиве ПЗС-наблюдений было измерено около 6.5 млн изображений звезд в диапазоне $7.5...17^m$, из которых примерно 60—70 % предельно слабых объектов являлись артефактами.

Редукция к ICRF. Для редукции к системе ICRF сканированные области неба разбивались на меньшие участки таким образом, чтобы в каждой из них содержалось от 20 до 40 звезд опорного каталога Tycho2 [7]. После отождествления с этим каталогом в каждом таком участке были вычислены прямоугольные координаты опорных звезд Tycho2:

$$\begin{aligned} & (\tau \quad \tau_0) \cos \tau_0, \\ & \text{tg}(\tau \quad \tau_0), \end{aligned} \quad (1)$$

на ПЗС-матрице в TDI-режиме наблюдений [12] и зависящие от координат звезды τ, τ_0 по каталогу Tycho2 и от координат центра сканированной области неба τ_0, τ_0 .

Для установления связи между координатами звезды и ее ПЗС-координатами x, y использовалась модель преобразования:

$$\begin{aligned} & = y + A_0 + A_1y + \dots + A_ny^n + Bx, \\ & = x + C_0 + C_1y + \dots + C_ny^n + Dx. \end{aligned} \quad (2)$$

Система уравнений (2) решалась для каждого участка неба с привлечением примерно 30 отождествленных звезд каталога Tycho2. Наилучшие результаты с минимальными невязками разностей y – и x – получены при $n = 6$. Значения коэффициентов A, B, C, D редуционной модели (2) использовались для вычисления координат α, δ , измеренных фотоцентров всех звезд с последующим переходом к α_0, δ_0 по формулам, обратным к (1).

Редукция инструментальных фотометрических величин V^* к системе величин V_T каталога Tycho2 выполнена с линейной аппроксимацией:

$$V^* = V_T + E_0 + E_1 y, \quad (3)$$

где слагаемое $E_1 y$ учитывает изменение прозрачности атмосферы на протяжении периода сканирования изображения (аргумент y соответствует времени регистрации изображения звезды).

Каталог КМАСЗ и его характеристики. Величины α, δ и V , полученные из отдельных сканирований участков неба, впоследствии усреднялись, давая таким образом положения и фотометрические величины звезд в каталоге КМАСЗ. Выполнялась также кросс-идентификация звезд каталога КМАСЗ с каталогом NOMAD [17] для дополнительного контроля реальности изображений предельно слабых звезд и удаления артефактов.

Сравнение положений α, δ полученного каталога КМАСЗ с каждым из каталогов UCAC4 [12, 16] и SMC14 [6] дало достаточно близкие результаты, поэтому в дальнейшем остановимся лишь на сравнении с каталогом UCAC4. Среднее квадратичное значение разностей «КМАСЗ – UCAC4» характеризует погрешность положений каталога КМАСЗ по внешней согласованности, а систематическая составляющая этих разностей может указывать на систематические погрешности нашего каталога (или UCAC4).

Как видно из рис. 3, систематические расхождения координат незначительны. Это показывает, что положения каталога КМАСЗ свободны от ошибки, зависящей от блеска звезды.

Сравнение V -величин каталогов КМАСЗ и UCAC4 показало систематическое расхождение для звезд ярче 9.5^m (рис. 3). Амплитуда расхождения увеличивается до $0.5...1^m$ для звезд с $V = 8^m$.

Для исследования причин такого расхождения было проведено сравнение систематических разностей V величин каталогов UCAC4 и Tycho2, а также других каталогов. Сравнение показало наличие расхождений блеска звезд аналогичных показанной на рис. 3. В частности, для разностей «Tycho2 – UCAC4» получен график с раздвоением последовательности систематических разностей в области ярких звезд (рис. 4).

Причина этого раздвоения состоит в компилятивном составе фотометрических данных каталога UCAC4, которые частично получены по собственным наблюдениям, а частично включают данные из Tycho2 или из других каталогов. На наличие систематической по-

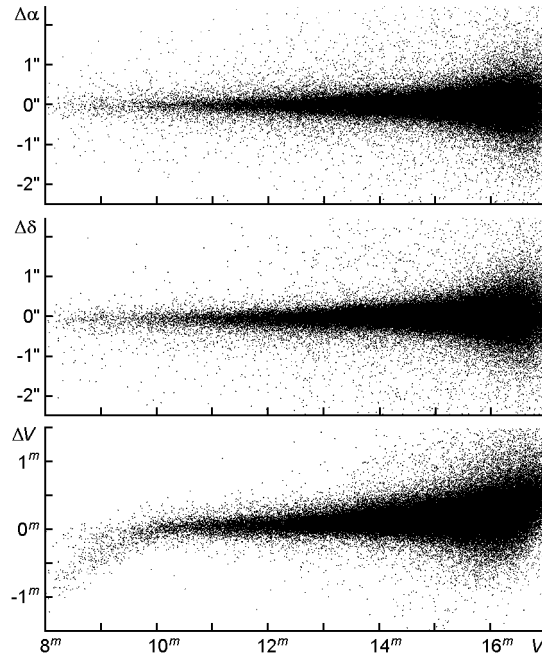


Рис. 3. Разности координат и звездных величин каталогов КМАС3 и UCAC4

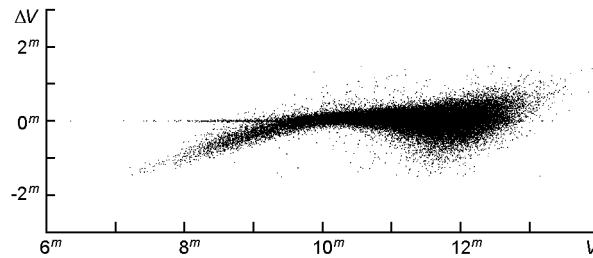


Рис. 4. Разности V -величин «Tycho2 – UCAC4»

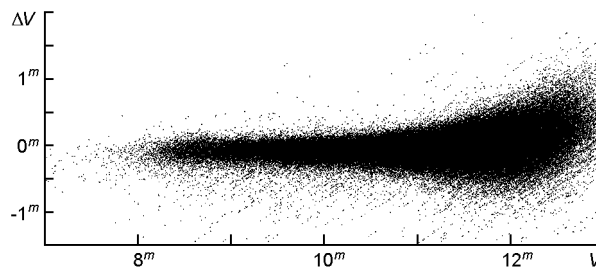


Рис. 5. Разности V -величин каталогов КМАС3 и Tycho2

грешности V -величин для ярких звезд каталога UCAC4 указывают также другие исследования [1, 2, 10, 17].

В то же время сравнение V -величин КМАС3 и Tycho2 не дало систематических отклонений для звезд $V < 9.5^m$. Это видно из рис. 5, где мы приводим невязки уравнения (3) для всех индивидуальных наблюдений звезд на отдельных сканах неба.

Таблица 1. Ошибки одного измерения μ , ошибки каталога μ по внутренней сходимости и количество звезд каталога в данном интервале звездных величин N

| V | N | μ | μ | μ | μ | μ | μ |
|-----|--------|-------|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|
| 8 | 409 | 0.101 | 0.102 | 0.089 ^m | 0.067 | 0.068 | 0.059 ^m |
| 9 | 2709 | 0.096 | 0.095 | 0.074 | 0.064 | 0.063 | 0.050 |
| 10 | 6656 | 0.090 | 0.092 | 0.068 | 0.060 | 0.062 | 0.045 |
| 11 | 15664 | 0.092 | 0.096 | 0.069 | 0.062 | 0.064 | 0.046 |
| 12 | 34184 | 0.107 | 0.110 | 0.072 | 0.071 | 0.074 | 0.048 |
| 13 | 72583 | 0.125 | 0.127 | 0.086 | 0.083 | 0.085 | 0.056 |
| 14 | 150310 | 0.144 | 0.146 | 0.115 | 0.096 | 0.098 | 0.076 |
| 15 | 284069 | 0.231 | 0.235 | 0.180 | 0.154 | 0.157 | 0.120 |
| 16 | 504002 | 0.503 | 0.489 | 0.282 | 0.335 | 0.326 | 0.188 |
| 17 | 274505 | 0.816 | 0.918 | 0.354 | 0.544 | 0.612 | 0.236 |

Таблица 2. Точность каталога КМАС3 по внешней сходимости

| V | μ | μ | μ |
|-----|-------|-------|--------------------|
| 8 | 0.162 | 0.167 | 0.737 ^m |
| 9 | 0.154 | 0.159 | 0.352 |
| 10 | 0.147 | 0.154 | 0.122 |
| 11 | 0.139 | 0.146 | 0.119 |
| 12 | 0.139 | 0.144 | 0.132 |
| 13 | 0.137 | 0.141 | 0.152 |
| 14 | 0.151 | 0.152 | 0.202 |
| 15 | 0.258 | 0.260 | 0.251 |
| 16 | 0.619 | 0.621 | 0.345 |
| 17 | 0.953 | 0.960 | 0.492 |

Погрешности μ , μ и μ одного измерения в зависимости от V приведены в графах 3—5 табл. 1. Погрешности вычислены по внутренней сходимости и примерно равны таким же оценкам, полученным для каталога КМАС2 [4]. В графах 6—8 приведены вероятные погрешности каталога μ , μ и μ , формально полученные из величин масштабированием на множитель $1/n^{0.5}$ при среднем числе наблюдений звезды $n = 2.25$.

Верхние оценки погрешностей μ , μ и μ каталога по внешней сходимости получены из сравнения с UCAC4 и приведены в табл. 2. Заметим, что эти оценки существенно выше приведенных в табл. 1, вероятно, из-за неучтенного вклада собственных движений звезд.

ВЫВОДЫ

Полученный каталог КМАС3 содержит 2.05 млн звезд, распространяет опорную систему Tycho — HIPPARCOS на звезды до $V = 17^m$ в экваториальной зоне $+2...+5.5^\circ$ с точностью положений и фотометрии соответственно 0.06...0.08 и 0.04...0.08^m для $V < 14^m$ и обеспечивает

плотность в среднем около 1500 звезд на квадратный градус, что значительно больше, чем 1—5 звезд Tycho2.

1. Гусева И. С. Особенности обработки наблюдений при большом поле зрения инструмента // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулковке.—2013.—№ 220.—С. 461.
2. Ермаков Б. К., Гусева И. С. О фотометрических данных каталога UCAC // Всероссийская астрометрическая конф. «Пулково-2012»: Тез. докл. — Спб.: ГАО РАН, 2012.—С. 20.
3. Карбовський В. Л., Лазоренко П. Ф., Андрук В. М. та ін. Київський меридіанний аксіальний круг з новою ПЗЗ-камерою // Кинематика и физика небес. тел.—2011.—27, № 4.—С. 66—74.
4. Лазоренко П. Ф., Карбовский В. Л., Буромський М. И. и др. Астрометрический каталог звезд в экваториальной зоне КМАС2 // Кинематика и физика небес. тел.—2015.—31, № 5.—С. 61—71.
5. Carlsberg Meridian Catalog 14 // <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?I/304>. — 2006.
6. de Bruijne J. H., Rygl K. L., Antoja T. Gaia astrometric science performance - post-launch predictions // 2015.—arXiv:1502.00791.
7. Hrg E., Fabricius C., Makarov V. V., et al. The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 million brightest stars // Astron. and Astrophys.—2000.—355.—P. L27—30.
8. Jordan S. The Gaia Project — technique, performance and status // Astron. Nachr.—2008.—329.—P. 875.
9. Karbovsky V. The Kyiv Meridian Axial Circle with a CCD micrometer // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.—2005.—N 5.—P. 390.
10. Knapp W. R. A. Wide and faint double star photometry and measurement with online tools — test drive with Landolt standard stars and example with ROE 76 in Perseus // J. Double Star Observations.—2015.—11, N 3.—P. 125—129.
11. Lazorenko P., Babenko Yu., Karbovsky V., et al. The Kyiv meridian axial circle catalogue of stars in fields with extragalactic radio sources // Astron. and Astrophys.—2005.—438.—P. 377—389.
12. Munari U., Henden A., Frigo A., et al. APASS Landolt-Sloan BVgri photometry of RAVE stars. I. Data, effective temperatures, and reddenings // Astron. J.—2014.—148, N 5.—ID 81.—15 p.
13. Stone R., Monet D., Monet A., et al. The Flagstaff astrometric scanning transit telescope (FASTT) and star positions determined in the extragalactic reference frame // Astron. J.—1996.—111, N 4.—P. 1721—1741.
14. Telnuk-Adamchuk V., Babenko Yu., Lazorenko P., et al. Observing programs of the Kyiv meridian axial circle equipped with a CCD micrometer // Astron. and Astrophys.—2002.—386, N 3.—P. 1153.
15. The Hipparcos and Tycho catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission.—Noordwijk: ESA Publ. Division, 1997.—(ESA SP Ser. Vol. 1200).
16. Zacharias N., Finch C. T., Girard T. M., et al. The fourth US Naval Observatory CCD astrograph catalogue (UCAC4) // Astron. J.—2013.—145, N 6.—P. 44—49.
17. Zacharias N., Finch C., Zacharias M. I., Girard T. UCAC4 status // Bull. Amer. Astron. Soc.—2011.—43.—id.409.09.
18. Zacharias N., Monet D. G., Levine S., et al. NOMAD Catalog (Zacharias+ 2005) // VizieR On-line Data Catalog, I/297.—2005.

Статья поступила в редакцию 22.10.15