

УДК 523.44:520.82

И. А. Терещенко, В. Г. Шевченко, Ю. Н. КруглыйНаучно-исследовательский институт астрономии
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина
61022 Харьков, ул. Сумская 35**Исследование фотометрической системы телескопа
АЗТ-8 и ПЗС-камеры IMG 1024S**

Исследуется фотометрическая система, состоящая из телескопа АЗТ-8, BVRI-фильтров и ПЗС-камеры IMG 1024S. Получены коэффициенты трансформации инструментальных значений звездных величин и показателей цвета к стандартной системе Джонсона — Козинса в спектральных полосах BVRI.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ТЕЛЕСКОПА АЗТ-8 І ПЗС-КАМЕРИ IMG 1024S, Терещенко І. А., Шевченко В. Г., Круглий Ю. Н. — Досліджується фотометрична система, що складається із телескопа АЗТ-8, BVRI-фільтрів і ПЗС-камери IMG 1024S. Отримано коефіцієнти трансформації інструментальних значень зоряних величин та показників кольору до стандартної системи Джонсона — Козінса у спектральних смугах BVRI.

INVESTIGATION OF THE PHOTOMETRIC SYSTEM OF THE TELESCOPE AZT-8 AND CCD-CAMERA IMG 1024S, by Tereschenko I. A., Shevchenko V. G., Krugly Yu. N. — We investigated the photometric system consisting of the telescope AZT-8, BVRI filters and CCD-camera IMG 1024S. We derived transformation coefficients to transfer the instrumental values of magnitudes and color indexes to the standard Johnson — Cousins system for the BVRI spectral bands.

Введение. Исследуемый телескоп АЗТ-8 Института астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина был введен в действие в 1965 г. возле поселка Ивановка Чугуевского района Харьковской области. Диаметр главного зеркала составляет 70 см, телескоп имеет три сменные системы: две кассегреновские с фокус-

ными расстояниями 11.2 м (относительное отверстие 1:16, поле зрения 40°) и 28 м (1:40, 18°), а также ньютоновскую (1:4, 40°). В августе 2001 г. на телескопе была установлена ПЗС-камера IMG 1024S и фильтровая турель CFW-1 фирмы FLI (США). В ПЗС-камере используется более совершенная матрица ТК 1024 (1024 × 1024 пкп). Общие размеры матрицы при размерах пиксела 24 × 24 мкм составляют 24.6 × 24.6 мм. Матрица охлаждается элементами Пельтье до температуры -50 ± 0.2 °С. Камера была установлена в фокусе Ньютона, при этом поле зрения камеры составило 30 × 30", что соответствует разрешению примерно 1.8"/пкп. Фильтровая турель содержит 5 окошек со светофильтрами, соответствующими UBVR-I полосам системы Джонсона — Козинса [3, 5]. Вследствие низкой чувствительности матрицы в ультрафиолетовой области спектра и значительного поглощения в этом диапазоне в атмосфере и оптике корректора поля телескопа, наблюдения проводились только в четырех полосах BVRI. Кривые пропускания светофильтров близки к полосам стандартной системы (см. рис. 1 и табл. 1).

Камера успешно использовалась более четырёх лет для наблюдений астероидов и комет, после чего была отправлена на фирму для

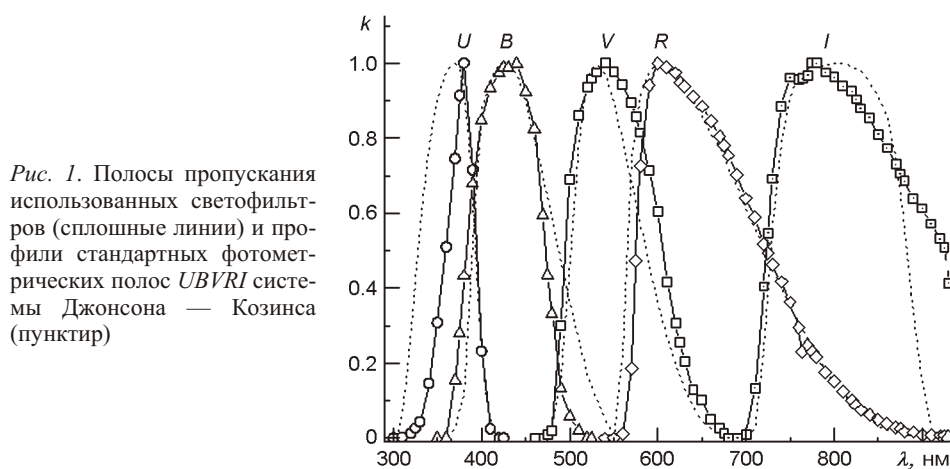


Таблица 1. Спектральные характеристики фотометрической системы: телескоп АЗТ-8, светофильтры и ПЗС-камера IMG-1024S

Спектральная полоса	Инструментальная система		Стандартная система	
	λ_0 , нм	$\Delta\lambda$, нм	λ_0 , нм	$\Delta\lambda$, нм
U	373.7	36	360.5	67
B	429.4	89	443.4	99
V	555.7	111	551.2	85
R	667.9	148	647.2	156
I	837.4	200	806.0	152

устранения неисправностей. После ремонта возникла необходимость повторного исследования инструментальной фотометрической системы телескопа, которая определяется в основном спектральной чувствительностью матрицы, передаточной функцией телескопа и пропусканием светофильтров. Чтобы выяснить, насколько значимы отличия инструментальной фотометрической системы от стандартной и корректно учитывать их, необходимо определить коэффициенты трансформации звездных величин из инструментальной системы к стандартной для каждой спектральной полосы.

Специфика наблюдения объектов Солнечной системы требует использования звезд сравнения, близких по спектральному классу к солнечному. Это существенно ограничивает диапазон показателей цвета стандартных звезд и снижает ошибки приведения инструментальной системы к стандартной.

Редукция изображений. ПЗС-снимок, полученный с камерой IMG 1024S, представляет собой двумерный массив данных 1024 × 1024 элемента объемом около 2 Мбайт дискового пространства. Первичные снимки содержат как информацию о небесных объектах, так и шумы. Последние разделяются на фон неба, шум считывания и тепловой шум. Кроме того, есть фотометрическая ошибка поля, которая возникает вследствие неравномерной чувствительности элементов ПЗС-матрицы и различных оптических эффектов, возникающих при прохождении света в телескопе, светофильтрах и камере. Для учёта неравномерности поля каждое изображение было скорректировано делением на так называемое «плоское поле». Такие поля получались по измерению сумеречного неба в вечернее и/или утреннее время во всех четырех исследуемых спектральных полосах *BVRI*. Общее количество полученных снимков плоских полей составляло 7—15 кадров, из которых составлялся усредненный снимок «master-flat», который и применялся для коррекции ошибки поля. Кроме того, из каждого снимка плоского поля вычитался снимок «master-dark», усредненный по 15—20 темновым снимкам, которые получены при той же температуре и времени накопления, что и плоские поля. «Master-dark» также получался и для вычитания тепловых шумов из изображений звездных полей. Шум считывания отдельно не выделялся; он вычитался автоматически при вычитании темновых снимков. Более подробно методика обработки снимков описана в работе [4]. При наблюдениях звёзд время накопления выбиралось из условия, чтобы отношение сигнал/шум для каждой звезды было не менее 150, что позволяет получать точность относительной фотометрии не хуже 0.01^m .

Определение коэффициентов трансформации. Измерения блеска звезд на ПЗС-изображениях проводились методом апертурной фотометрии. Программное обеспечение ASTPHOT, созданное С. Моттолой [8], позволяет выбирать круглую или эллиптическую апертуру с радиусом $R = 5$ пкл для измерения до 11 объектов на снимке. Размер диафрагмы выбирался таким образом, чтобы она включала 97—99 %

всего потока звезды. Фон измерялся в 8—10 квадратах с размерами 16 × 16 или 32 × 32 пикселей, которые выбирались вокруг каждой звезды и исключали попадание звезд поля в область измерения фона. Отсчеты от звезд с вычтенным фоном переводились в шкалу инструментальных звездных величин по известному соотношению

$$m_o = 2.5 \lg(N_o - N_{\text{фон}}), \quad (1)$$

где N_o — суммарный по диафрагме отсчет от объекта, $N_{\text{фон}}$ — отсчет фона с площади диафрагмы. Поскольку поле зрения камеры небольшое, то все звезды в этом поле находятся практически на равных высотах, и поправки блеска за относительное изменение воздушной массы по снимку не производились. Вычисление воздушных масс проводилось по известной формуле Бемпорада [2]. Кроме того, в процессе определения поправочных коэффициентов наблюдения проводились при воздушных массах не более 1.8. Звезды проверялись на переменность по взаимным разностям блеска и считались не обладающими заметной переменностью, если ошибка такой разности не превышала 0.005^m .

Сравнение используемой инструментальной и стандартной систем показало, что их спектральные характеристики близки (см. рис. 1), поэтому связь между звездными величинами и показателями цвета в этих системах можно представить в виде [1, 7]

$$M^i = m_o^i + m C^i, \quad C^i = c c^i, \quad (2)$$

где M^i, C^i — звездные величины и показатели цвета в стандартной системе, m_o^i, c^i — звездные величины и показатели цвета в инструментальной системе, m и c — коэффициенты трансформации, m и c — константы нуля-пункта.

Звезды измерялись по ряду изображений, полученных в течение нескольких ночей. Блеск i -й звезды определялся как среднее значение по всем n возможным оценкам:

$$\bar{m}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m_{ij}. \quad (3)$$

При исследованиях системы мы использовали наблюдения 22 фотометрических стандартов из каталогов [6, 9], список которых представлен в табл. 2. Коэффициенты трансформации вычислены методом наименьших квадратов и приведены в табл. 3.

На рис. 2 представлена зависимость инструментальной звездной величины от стандартной для полосы V и ее аппроксимация линейной функцией. Коэффициент наклона составляет 1.0092 ± 0.0019 , что указывает на хорошее соответствие инструментальной системы и стандартной для данной полосы в диапазоне звездных величин 11.2—14.8. Подобные зависимости получены и для других полос, при этом линейные коэффициенты также близки к единице с незначительной ошибкой в четвертом знаке после запятой. Мы не приводим здесь эти значе-

Таблица 2. Список стандартных звезд

Название площадки	2000	2000	V	$B - V$	$V - R$	$V - I$
MS 0036.5+2103 A	00 ^h 39 ^m 03.40 ^s	21 20 24.0	14.600	0.760	0.440	0.860
MS 0036.5+2103 B	00 39 10.30	21 21 38.0	13.300	0.510	0.320	0.660
AR And-3	01 45 07.44	37 57 42.1	14.970	0.670	0.400	—
AR And-4	01 45 09.86	37 54 33.9	15.350	0.650	0.390	—
AO 0235+164 3	02 38 29.40	16 36 45.0	12.920	0.760	0.450	0.840
AO 0235+164 2	02 38 32.30	16 36 01.0	12.720	0.840	0.480	0.920
AO 0235+164 1	02 38 36.70	16 36 27.0	13.050	0.560	0.340	0.680
AO 0235+164 6	02 38 45.60	16 38 46.0	14.020	0.680	0.380	0.720
AO 0235+164 C1	02 38 45.90	16 37 36.0	14.780	—	0.550	1.020
MS 0317.0+1834 B	03 19 35.35	18 43 37.5	13.800	0.860	0.430	0.890
MS 0317.0+1834 A	03 19 57.07	18 41 59.0	11.750	0.580	0.310	0.640
U_GEM1	07 55 04.60	22 01 53.0	13.900	0.510	0.310	0.610
U_GEM5	07 55 07.10	21 59 19.0	14.710	0.710	0.400	0.770
U_GEM2	07 55 11.50	21 58 03.0	13.100	0.730	0.400	—
U_GEM3	07 55 23.40	21 59 57.0	11.980	0.490	0.340	0.560
U_GEM4	07 55 24.10	21 58 40.0	14.140	0.550	0.330	0.610
PG1323-086A	13 25 49.73	-08 50 23.7	13.591	0.393	0.252	0.506
PG1323-086C	13 25 50.22	-08 48 38.4	14.003	0.707	0.395	0.759
PG1323-086B	13 25 50.65	-08 50 54.8	13.406	0.761	0.426	0.833
PG1323-086D	13 26 05.25	-08 50 36.1	12.080	0.587	0.346	0.684
SA 115-268	23 42 30.70	00 52 11.0	12.494	0.634	0.366	0.714
SA 115-420	23 42 36.50	01 05 59.0	11.161	0.468	0.286	0.580

Таблица 3. Коэффициенты трансформации

Полоса	m	
B	0.006 ± 0.022	-0.011 ± 0.034
V	0.031 ± 0.019	-0.052 ± 0.029
R	0.010 ± 0.026	-0.035 ± 0.067
I	0.031 ± 0.021	-0.080 ± 0.053
Показатель цвета	c	
$B - V$	0.013 ± 0.029	0.976 ± 0.046
$V - R$	-0.014 ± 0.020	1.035 ± 0.051
$R - I$	0.025 ± 0.034	0.938 ± 0.094

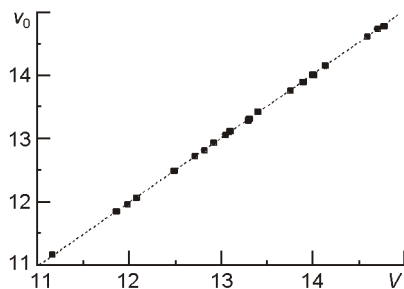


Рис. 2. Зависимость инструментальной звездной величины от стандартной для полосы V

ния коэффициентов, поскольку описываемая ими ошибка существенно ниже ошибок фотометрии. На рис. 3 представлены зависимости разностей инструментальной и стандартной систем от показателей цвета для различных полос. Все зависимости имеют небольшой отрицательный градиент, а разности не превышают $\pm 0.03^m$ в диапазоне изменения показателей цвета. На рис. 4 изображены зависимости показателей цвета стандартной системы от инструментальной. Зависимости имеют положительный градиент, а линейные коэффициенты также близки к единице. Наименьший наклон получен для показателей цвета

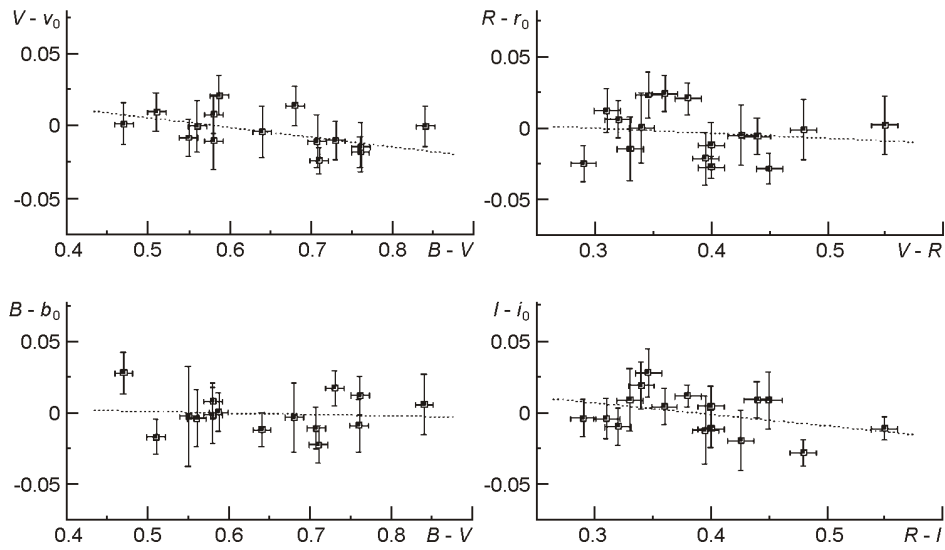


Рис. 3. Зависимости разностей звездных величин в фильтрах V, B, R, I от показателей цвета $B - V, V - R, R - I$

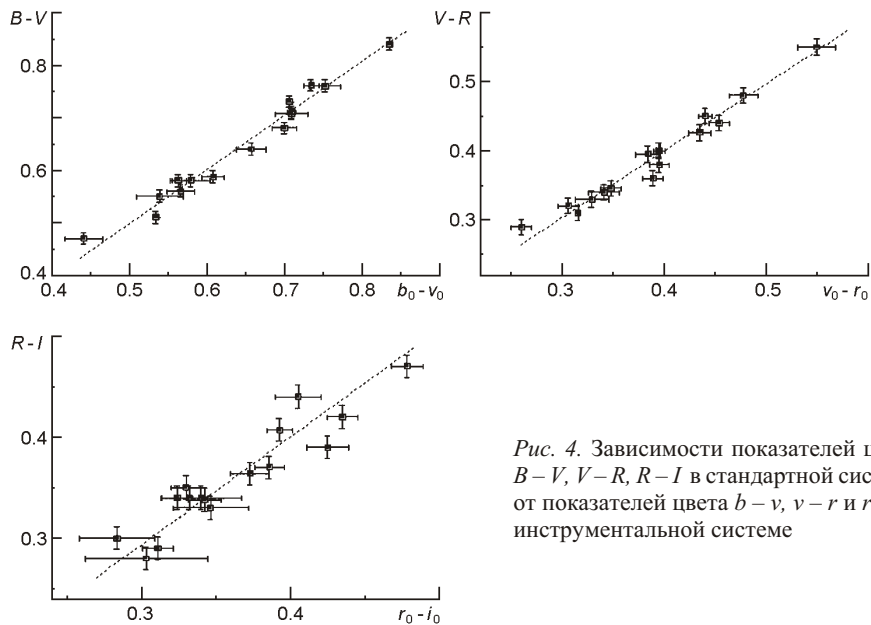


Рис. 4. Зависимости показателей цвета $B - V, V - R, R - I$ в стандартной системе от показателей цвета $b - v, v - r$ и $r - i$ в инструментальной системе

$R - I$, что может быть связано с недостаточной точностью определения звездных величин стандартов в этих полосах. В целом инструментальная и стандартная системы неплохо соответствуют между собой на измеренном диапазоне показателей цвета.

Заключение. Таким образом, измерения фотометрических стандартов позволили нам получить поправочные коэффициенты, описывающие связь между инструментальной и стандартной фотометрическими системами. Следует отметить, что за время использования ПЗС-камеры мы провели наблюдения в $BVRI$ -полосах свыше 100 астероидов и использовали около 300 звезд в качестве звезд сравнения. Приведение звездной величины звезд сравнения к стандартной системе позволит использовать данные звезды в качестве вторичных фотометрических стандартов в последующих наблюдениях. Данные по этим звездам будут отправлены в Страсбургский центр астрономических данных для дальнейшего использования.

1. Мартынов Д. Я. Курс практической астрофизики. — М.: Наука, 1977.—544 с.
2. Харди Х. Редукция фотоэлектрических наблюдений // Методы астрономии / Под ред. В. А. Хилтнера. — М.: Мир, 1967.—536 с.
3. Bessell M. S. $UBVRI$ photometry II: The Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry // Publ. Astron. Soc. Pacif.—1979.—**91**, N 543.—P. 589—607.
4. Howell S. B. Handbook of CCD-photometry. — Cambridge: Univ. Press, 2000.—164 p.
5. Johnson H. L. The absolute calibration of the Arisona photometry // Commun Lunar and Planet. Lab.—1965.—**3**, N 53.—P. 73—77.
6. Landolt A. U. $UBVRI$ photometric standard stars in the magnitude range 11.5—16.0 around the celestial equator // Astron. J.—1992.—**104**.—P. 340—371.
7. Miles R. $UBVRI$ photometry using CCD cameras // J. Brit. Astron. Assoc.—1998.—**108**.—P. 65—74.
8. Mottola S., De Angelis G., Di Martino M., et al. The Near-Earth objects follow-up program: first results // Icarus.—1995.—**117**.—P. 62—70.
9. Skiff B. A. $UBVRI$ photometry of faint field stars // VizieR On-line Data Catalog: II/277. 2007.

Поступила в редакцию 23.03.09