

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 121, № 3, 5–12 (2025)

УДК 520.8, 520.82, 520.8.07

Коэффициенты редукции фотометрической системы АЗТ-11

*К.Н. Гранкин*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
konstantin.grankin@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 1 сентября 2025 г.

Аннотация. Приводится краткое описание процедуры вычисления коэффициентов редукции новой инструментальной фотометрической системы телескопа АЗТ-11 к стандартной широкополосной системе $UBVR_cI_c$. Новые коэффициенты редукции сравниваются с предыдущими значениями.

Ключевые слова: методы: анализ данных, методики: фотометрические, редукция фотометрических данных

1 Введение

Одной из важнейших задач фотоэлектрической фотометрии является корректное преобразование измеренных инструментальных звездных величин и показателей цвета к стандартной фотометрической системе. Параметры конкретной инструментальной фотометрической системы определяются как спектральной чувствительностью приемника излучения, так и коэффициентами пропускания (и/или отражения) оптических узлов телескопа и используемых фильтров. Замена одних приемников излучения на другие, использование фильтров различных производителей, ввод в эксплуатацию дополнительных оптических узлов, например редукторов фокуса, переалюминирование зеркал или их полная замена должны сопровождаться измерением коэффициентов трансформации инструментальной фотометрической системы к стандартной.

Телескоп АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории (КраО) активно используется начиная с 80-х годов прошлого века. За четыре десятилетия эксплуатации главное зеркало телескопа многократно переалюминировалось, вследствие чего его отражающая поверхность заметно деградировала. Кроме того, изначальная оптическая схема телескопа, обеспечивающая эффективное фокусное расстояние 16 м, плохо сочеталась с современными приемниками излучения. В связи с этим было принято решение изготовить новую оптику для телескопа с меньшим эффективным фокусным расстоянием 12 м.

Теребиж и др. (2024) рассчитал новую оптическую схему телескопа VT-124i, которая включает в себя два зеркала – главное и вторичное – и четырехлинзовый корректор изображения. Одним из важнейших требований к новой оптической схеме было условие строгого ее согласования с существующей механической конструкцией телескопа. Изготовление новой оптики, сборка системы и ее юстировка были осуществлены коллективом сотрудников оптической и механической мастерских КраО. К середине сентября 2023 г. все работы по замене оптической системы телескопа были закончены. Первые наблюдения с новой оптической системой АЗТ-11 показали, что выигрыш в проникающей силе оказался порядка 1.5 звездных величин. Кроме этого, новая оптическая система обеспечила стабильно лучшие изображения (порядка одной угловой секунды) и более низкую степень инструментальной поляризации, которая составила менее 0.1 % (Теребиж и др., 2024).

В настоящей статье приводится краткое описание процедуры вычисления коэффициентов редукции новой инструментальной фотометрической системы телескопа АЗТ-11 к стандартной широкополосной системе $UBVR_cI_c$. Новые коэффициенты редукции сравниваются с предыдущими значениями.

2 Основные формулы

В связи с повсеместным использованием панорамных приемников излучения на базе ПЗС широкое применение получил дифференциальный метод обработки фотометрических наблюдений, позволяющий значительно уменьшить или даже исключить влияние переменной атмосферной экстинкции. Подробное описание алгоритма этого метода можно найти в работе Гранкин (2025). В самом общем виде разницу блеска (ΔV°) и показателей цвета ($\Delta(V - R)^\circ$, $\Delta(V - I)^\circ$, $\Delta(B - V)^\circ$ и $\Delta(U - B)^\circ$) между исследуемым объектом (*) и фотометрическим стандартом (s) в известной фотометрической системе $UBVRI$ можно вычислить по следующим формулам:

$$\begin{cases} \Delta V^\circ = \Delta v - \alpha_{V_s} \Delta X - \gamma_V \Delta(v - r) X_* + K_V \Delta(V - R)^\circ \\ \Delta(V - R)^\circ = K_{VR} [\Delta(v - r) - \alpha_{VR_s} \Delta X - \gamma_{VR} \Delta(v - r) X_*] \\ \Delta(V - I)^\circ = K_{VI} [\Delta(v - i) - \alpha_{VI_s} \Delta X - \gamma_{VI} \Delta(v - i) X_*] \\ \Delta(B - V)^\circ = K_{BV} [\Delta(b - v) - \alpha_{BV_s} X_* + \alpha_{BV_s} X_s] \\ \Delta(U - B)^\circ = K_{UB} [\Delta(u - b) - \alpha_{UB_s} X_* + \alpha_{UB_s} X_s], \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta X = X_* - X_s$ – разность воздушных масс переменной звезды и звезды сравнения; Δv , $\Delta(v - r)$, $\Delta(v - i)$, $\Delta(b - v)$ и $\Delta(u - b)$ – измеренная разность блеска и показателей цвета исследуемой звезды и звезды сравнения в инструментальной системе телескопа; α_V , α_{VR} , α_{VI} , α_{BV} , α_{UB} – значения экстинкции, соответствующие измерениям стандартной звезды (s) или исследуемой (*); γ_V , γ_{VR} , γ_{VI} – специальные коэффициенты, учитывающие различия в цветах (спектральных классах) исследуемой и стандартной звезд; K_V , K_{VR} , K_{VI} , K_{BV} и K_{UB} – коэффициенты редукции от инструментальной фотометрической системы к стандартной. Следует отметить, что эти формулы заметно упрощаются при проведении одновременных наблюдений исследуемой и стандартной звезд с помощью ПЗС-приемника. В этом случае разность воздушных масс равна нулю ($\Delta X = 0$) и соответствующими членами уравнений можно пренебречь. Кроме того, если стандартная звезда имеет показатели цвета, близкие к таковым у исследуемого объекта, можно опустить члены уравнений, содержащие γ_V , γ_{VR} и γ_{VI} .

В самом общем случае коэффициенты редукции от инструментальной фотометрической системы к стандартной легко вычислить по измерениям пары стандартных звезд, которые имеют различные показатели цвета. Действительно, используя уравнения из формулы (1), можно записать следующие выражения для коэффициентов редукции:

$$\begin{cases} K_V = [\Delta V_{12}^\circ - \Delta v_{12} + \alpha_V \Delta X + \gamma_V \Delta(v - r)_{12} X_1] / \Delta(V - R)_{12}^\circ \\ K_{VR} = \Delta(V - R)_{12}^\circ / [\Delta(v - r)_{12} - \alpha_{VR} \Delta X - \gamma_{VR} \Delta(v - r)_{12} X_1] \\ K_{VI} = \Delta(V - I)_{12}^\circ / [\Delta(v - i)_{12} - \alpha_{VI} \Delta X - \gamma_{VI} \Delta(v - i)_{12} X_1] \\ K_{BV} = \Delta(B - V)_{12}^\circ / [\Delta(b - v)_{12} - \gamma_{BV} \{(b - v)_2 X'_2 - (b - v)_1 X'_1\}] \\ K_{UB} = \Delta(U - B)_{12}^\circ / [\Delta(u - b)_{12} - \gamma_{UB} \{(u - b)_2 X'_2 - (u - b)_1 X'_1\}], \end{cases} \quad (2)$$

где $X'_1 = X_1(1 + rX_1)$, $X'_2 = X_2(1 + rX_2)$, а r – это коэффициент Форбса для K_{BV} или K_{UB} ($r_{BV} = -0.02$ или $r_{UB} = -0.028$). Коэффициенты редукции надежно определяются путем решения систем линейных уравнений (2), составленных по измерениям большого числа стандартных звезд, значения блеска и показатели цвета которых значительно различаются. Как правило, для определения коэффициентов редукции к стандартной фотометрической системе $UBVRI$ проводятся массовые измерения стандартных звезд из площадок Ландольта (Landolt, 2009). Для повышения точности таких измерений следует наблюдать площадки Ландольта на минимальных воздушных массах (около кульминации) и в лучшие фотометрические ночи. Исторически сложилось так, что в пакете программ НММ 4 (Heterochromatic Magnitude Method) вычисляются коэффициенты редукции от стандартной системы к инструментальной, которые обозначаются маленькими буквами: k_V , k_{VR} , k_{VI} , k_{BV} и k_{UB} . Они связаны с коэффициентами K_V , K_{VR} , K_{VI} , K_{BV} и K_{UB} следующими выражениями:

$$K_V = -\frac{k_V}{k_{VR}}, K_{VR} = \frac{1}{k_{VR}}, K_{VI} = \frac{1}{k_{VI}}, K_{BV} = \frac{1}{k_{BV}}, K_{UB} = \frac{1}{k_{UB}}. \quad (3)$$

3 Наблюдения редукционных звезд

Наблюдения редукционных звезд из нескольких площадок Ландольта были выполнены в течение двух фотометрических ночей 26 и 28 февраля 2025 г. Наблюдения проводились на пяти площадках в окрестностях звезд GD 71, SA 98 670, SA 98 733, Ru 149 и Ru 152. В пределах этих пяти площадок были измерены 33 редукционные звезды в пяти фотометрических полосах: U , B , V , R_c и I_c . Выбор

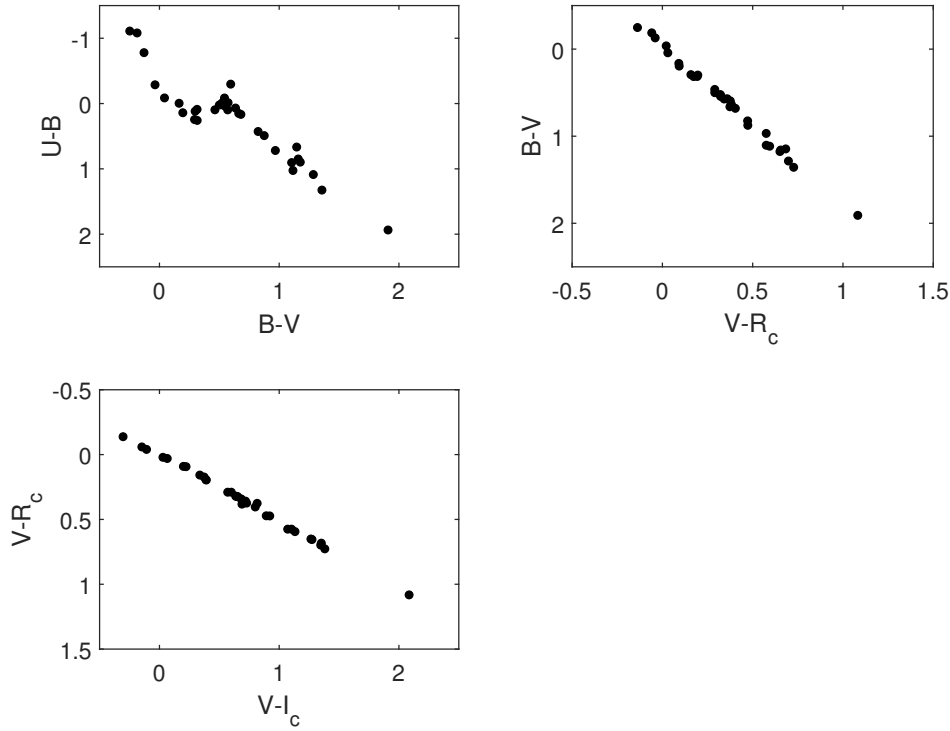


Рис. 1. Показатели цвета редукционных звезд в стандартной фотометрической системе

звезд осуществлялся таким образом, чтобы перекрыть как можно больший диапазон показателей цвета. На рис. 1 представлены двуцветные диаграммы отобранных редукционных звезд. Для каждой площадки было получено не менее двух серий наблюдений, а для площадки в окрестностях звезды Ru 152 было выполнено шесть серий. Каждая серия наблюдений состояла из трех последовательных циклов наблюдений в полосах U , B , V , R_c и I_c . В целом для каждой редукционной звезды было получено не менее шести индивидуальных измерений в каждой фотометрической полосе. Время экспозиции подбиралось таким образом, чтобы все редукционные звезды на каждом кадре имели статистически значимое отношение сигнал/шум от 50 для самых слабых (15 звездной величины) до 2000 для самых ярких (11 звездной величины).

Примеры рабочих изображений пяти площадок в полосе R_c , полученных на телескопе АЗТ-11 с ПЗС greateyes ELSEi 2k2k, приведены на рис. 2. Эти изображения были сделаны с одинаковой экспозицией в 10 секунд и при температуре чипа -60 градусов. Обозначения редукционных звезд такие же, как и в работе Landolt (2009), их основные параметры собраны в таблице 1. В ней приведены пятизначный цифровой код звезды в системе обозначений пакета программ НММ 4, координаты на 2000 год, обозначение звезды из работы Landolt (2009), значения блеска в полосе V и показателей цвета $U - B$, $B - V$, $V - R_c$ и $V - I_c$ в системе Крона–Кузинса. Звезда Ru 152E использовалась еще и для оценки мгновенных значений экстинкции по той причине, что ее показатели цвета близки к нулю.

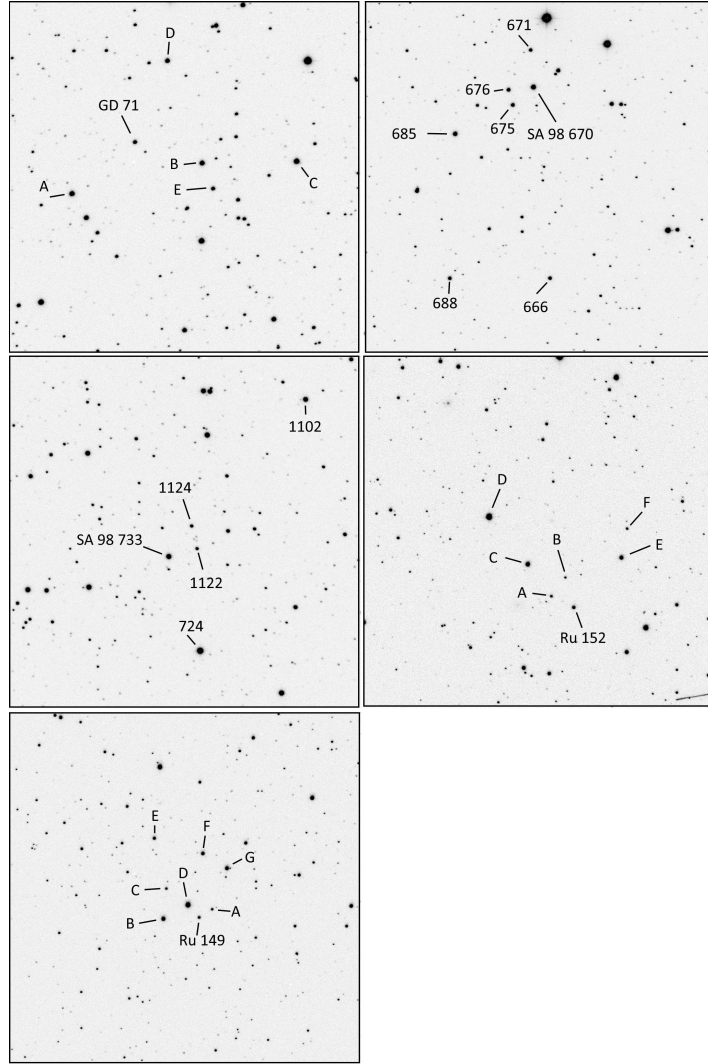


Рис. 2. Пять ПЗС-изображений в окрестностях звезд GD 71, SA 98 670, SA 98 733, Ru 152 и Ru 149

Таблица 1. Параметры редуционных звезд из файла `srpstars.hmm`

ID	R.A.	Dec.	Name	Vmag	$U - B$	$B - V$	$V - R_c$	$V - I_c$	Comment
25000	05:52:28	15:53:13	GD 71	13.033	-1.110	-0.248	-0.138	-0.304	reduction star
25001	05:52:34	15:51:59	GD 71A	12.643	0.897	1.176	0.651	1.265	reduction star
25002	05:52:22	15:52:42	GD 71B	12.599	0.166	0.680	0.404	0.800	reduction star
25003	05:52:13	15:52:44	GD 71C	12.325	0.849	1.159	0.655	1.274	reduction star
25004	05:52:25	15:54:58	GD 71D	12.898	0.097	0.570	0.359	0.719	reduction star
25005	05:52:21	15:52:08	GD 71E	13.634	0.428	0.824	0.472	0.892	reduction star
26102	06:52:28	-00:13:43	SA 98 1102	12.113	0.089	0.314	0.193	0.388	reduction star
26122	06:52:38	-00:17:04	SA 98 1122	14.090	-0.297	0.595	0.376	0.816	reduction star
26124	06:52:38	-00:16:34	SA 98 1124	13.707	0.258	0.315	0.173	0.373	reduction star
26666	06:52:10	-00:23:32	SA 98 666	12.732	-0.004	0.164	0.091	0.200	reduction star
26670	06:52:12	-00:19:16	SA 98 670	11.930	1.325	1.357	0.727	1.381	reduction star
26671	06:52:12	-00:18:25	SA 98 671	13.385	0.719	0.968	0.575	1.071	reduction star
26675	06:52:13	-00:19:40	SA 98 675	13.398	1.936	1.909	1.082	2.085	reduction star
26676	06:52:14	-00:19:20	SA 98 676	13.068	0.666	1.146	0.683	1.352	reduction star

Таблица 1. Параметры редукционных звезд из файла `cmpstars.hmm` (продолжение)

ID	R.A.	Dec.	Name	Vmag	$U - B$	$B - V$	$V - R_c$	$V - I_c$	Comment
26685	06:52:18	-00:20:20	SA 98 685	11.954	0.096	0.463	0.290	0.570	reduction star
26688	06:52:19	-00:23:33	SA 98 688	12.754	0.245	0.293	0.158	0.337	reduction star
26724	06:52:37	-00:19:20	SA 98 724	11.118	0.904	1.104	0.575	1.103	reduction star
26733	06:52:40	-00:17:15	SA 98 733	12.238	1.087	1.285	0.698	1.347	reduction star
27000	07:29:58	-02:06:28	Ru 152	13.017	-1.081	-0.187	-0.059	-0.147	reduction star
27001	07:30:00	-02:06:23	Ru 152A	14.341	-0.085	0.543	0.325	0.654	reduction star
27002	07:30:00	-02:06:23	Ru 152B	15.019	0.022	0.500	0.290	0.600	reduction star
27003	07:30:03	-02:05:39	Ru 152C	12.222	-0.013	0.573	0.342	0.683	reduction star
27004	07:30:06	-02:04:38	Ru 152D	11.076	0.491	0.875	0.473	0.921	reduction star
27005	07:29:54	-02:05:31	Ru 152E	12.362	-0.086	0.042	0.030	0.065	extinction star
27006	07:29:54	-02:04:52	Ru 152F	14.564	0.069	0.635	0.382	0.689	reduction star
27007	07:24:14	-00:33:04	Ru 149	13.866	-0.779	-0.129	-0.040	-0.108	reduction star
27008	07:24:13	-00:32:53	Ru 149A	14.495	0.118	0.298	0.196	0.391	reduction star
27009	07:24:18	-00:33:06	Ru 149B	12.642	0.151	0.662	0.374	0.728	reduction star
27010	07:24:17	-00:32:26	Ru 149C	14.425	0.141	0.195	0.093	0.222	reduction star
27011	07:24:15	-00:32:48	Ru 149D	11.480	-0.287	-0.037	0.021	0.029	reduction star
27012	07:24:18	-00:31:19	Ru 149E	13.718	-0.007	0.522	0.321	0.637	reduction star
27013	07:24:14	-00:31:39	Ru 149F	13.471	1.025	1.115	0.594	1.132	reduction star
27014	07:24:12	-00:31:58	Ru 149G	12.829	0.033	0.541	0.322	0.645	reduction star

4 Вычисление коэффициентов редукции

Потоки редукционных звезд извлекались из ПЗС-изображений с помощью программы `MaxIm DL Version 6.11` с использованием стандартных настроек: радиус апертуры 20, ширина зазора 1, ширина кольца 8 пикселей. Выходной файл данной программы имеет специфичный формат, в котором

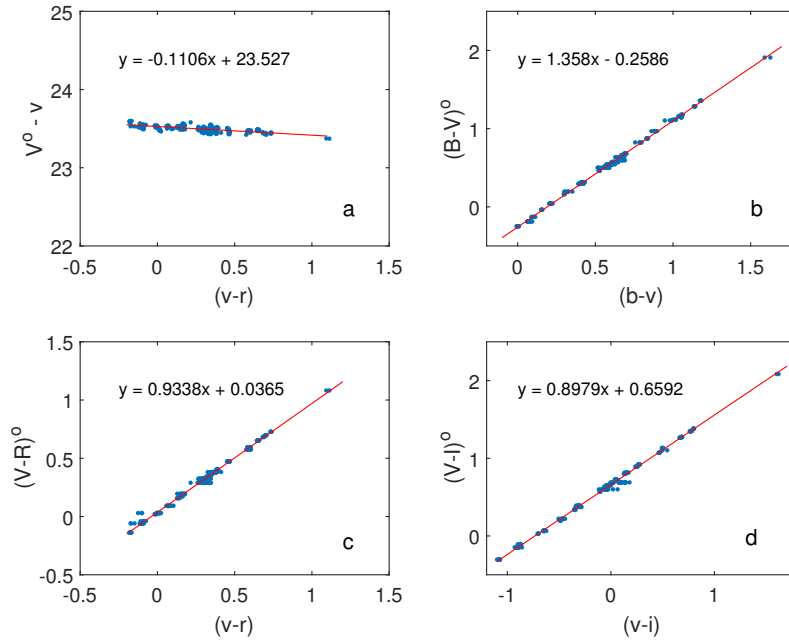


Рис. 3. Диаграммы зависимости $V^o - v$ от $(v-r)$ (а) и показателей цвета редукционных звезд в стандартной фотометрической системе $(B-V)^o$ (b), $(V-R)^o$ (c) и $(V-I)^o$ (d) от соответствующих показателей цвета в инструментальной системе телескопа АЗТ-11

каждая строка содержит данные, полученные с одного кадра для всех измеренных объектов. В частности, в такой строке содержится юлианская дата, имя файла с ПЗС-изображением, использованный фильтр и потоки для всех измеренных звезд. Для вычисления коэффициентов редукции с помощью пакета программ НММ 4 все выходные файлы программы MaxIm DL были преобразованы к специальному формату, совместимому с этим программным пакетом (Гранкин, 2025).

На рис. 3 представлены диаграммы зависимости разности звездных величин в стандартной и инструментальной системах ($V^o - v$) от показателя цвета в инструментальной системе ($v - r$) (а) и показателей цвета редукционных звезд в стандартной фотометрической системе ($B - V$) o (b), ($V - R$) o (c) и ($V - I$) o (d) от соответствующих показателей цвета в инструментальной системе телескопа АЗТ-11, оснащенного ПЗС greateyes ELSEi 2k2k. Результаты линейной интерполяции представлены красной непрерывной линией. Соответствующие уравнения линейной зависимости показаны на каждой панели. Множитель при переменной x соответствует искомому коэффициенту редукции от стандартной фотометрической системы к инструментальной.

5 Заключение

Успешное решение задач абсолютной астротометрии невозможно без использования коэффициентов редукции от инструментальной фотометрической системы к стандартной. Значения этих коэффициентов зависят от технических параметров приемной аппаратуры, спектральных коэффициентов пропускания (и/или отражения) оптических элементов телескопа и применяемых фильтров. Использование различных приемников излучения или наборов фотометрических фильтров, изменения оптической системы телескопа, переалюминирование зеркал или их полная замена должны сопровождаться контролем за коэффициентами редукции инструментальной фотометрической системы. В середине сентября 2023 г. на телескопе АЗТ-11 завершились работы по полной замене его оптической системы. Первые наблюдения показали, что произошло увеличение проникающей силы инструмента на 1.5 величины, уменьшение степени инструментальной поляризации ниже 0.1 % и заметное улучшение качества изображений (Теребиз и др., 2024).

Таблица 2. Коэффициенты редукции от стандартной системы к инструментальной

Дата	$k_{V,B-V}$	$k_{V,V-R}$	k_{UB}	k_{BV}	k_{VR}	k_{VI}	Комментарии
25.07.2008	-0.0510	-0.0690	0.9270	1.1820	0.7330	0.8910	фотометр-поляриметр
18.08.2011	-0.0230	-0.0380		1.4072	1.0034	0.9887	ПЗС FLI PL-1001
01.08.2013	-0.0171	-0.0314		1.3989	0.8835	0.8022	ПЗС FLI PL-230 (CNRS)
01.09.2014	-0.0746	-0.1150		1.5649	0.9595	0.9039	установка редуктора фокуса
01.07.2022	-0.0350	-0.0810	1.3256	1.4077	0.9658	0.9019	ПЗС greateyes ELSEi 2k2k
22.09.2023	-0.0867	-0.1106	1.0629	1.3580	0.9338	0.8979	замена оптики АЗТ-11

С целью определения новых коэффициентов редукции телескопа АЗТ-11, оснащенного ПЗС greateyes ELSEi 2k2k, были выполнены наблюдения 33 редукционных звезд из списка Ландольта (Landolt, 2009). Анализ наблюдений и вычисление коэффициентов редукции осуществлялись с применением пакета программ НММ 4 (Гранкин, 2025). Значения новых коэффициентов редукции от стандартной фотометрической системы к инструментальной приведены в таблице 2. Для сравнения в этой таблице собраны все предыдущие оценки коэффициентов редукции, вычисленные автором в течение 2008–2022 гг. В первом столбце указана начальная дата, связанная с теми или иными изменениями в системе телескоп–приемник излучения. Во втором и третьем столбцах приводятся значения коэффициентов редукции $k_{V,B-V}$ и $k_{V,V-R}$, которые необходимы для вычисления значения звездной величины в полосе V с использованием показателя цвета $B - V$ или $V - R$. Поскольку многие современные панорамные приемники излучения имеют низкую чувствительность в полосах U и B , предпочтительнее вычислять блеск с использованием коэффициента $k_{V,V-R}$. В столбцах 4–7 приведены коэффициенты редукции для вычисления значений показателей цвета $U - B$, $B - V$, $V - R_c$ и $V - I_c$. В последнем, восьмом столбце приводится дополнительная информация, необходимая для выбора тех или иных коэффициентов редукции.

Если инструментальная фотометрическая система телескоп–приемник излучения почти совпадает со стандартной, то значения $k_{V,B-V}$ и $k_{V,V-R}$ должны быть близки к нулю, а значения остальных коэффициентов (k_{UB} , k_{BV} , k_{VR} и k_{VI}) должны быть близки к единице. Из таблицы 2 видно, что в большинстве случаев хорошее соответствие между инструментальной и стандартной системами наблюдается в фотометрических полосах V , R_c и I_c . Наибольшее различие между системами имеет место для полосы B , когда коэффициент редукции k_{BV} принимает значения между 1.36 и 1.56, за исключением случая использования пятиканального фотометра-поляриметра В. Пииролы (Pirola, 1975).

Сравнение новых коэффициентов редукции с предыдущими показывает, что имеет место значительное улучшение соответствия между инструментальной и стандартной системами в полосе U . Действительно, новый коэффициент k_{UB} достиг значения 1.06, в то время как при использовании старой оптической системы с тем же ПЗС *greateyes ELSEi 2k2k* он имел значение 1.33. Небольшое улучшение наблюдается для полосы B : коэффициент k_{BV} изменил свое значение с 1.41 до 1.36.

Литература

- Гранкин К.Н., 2025. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 121. С. 14–31. [Grankin K.N., 2025. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 121, pp. 14–31. (In Russ.)]
- Теребиж В.Ю., Стешенко Н.М., Долгополов А.В., Антонюк К.А., Ростопчина-Шаховская А.Н., 2024. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 120. С. 22–31. [Terebizh V.Yu., Steshenko N.M., Dolgoplov A.V., Antonyuk K.A., Rostopchina-Shakhovskaya A.N., 2024. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 120, pp. 22–31. (In Russ.)]
- Landolt A.U., 2009. Astron. J., vol. 137, pp. 4186–4269.
- Pirola V., 1975. Ann. Acad. Sci. Fennicae, Series A VI – Physica, no. 418.

Reduction factors of the photometric system AZT-11

K. Grankin

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
konstantin.grankin@craocrimea.ru

Abstract. The paper briefly describes the procedure for calculating the reduction factors of the new instrumental photometric system of the AZT-11 telescope to the standard broadband $UBVR_cI_c$ system. The new reduction factors are compared with the previous values.

Key words: methods: data analysis, procedures: photometric, photometric data reduction