

## ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ АСТРОФОТОМЕТРИИ

Главной проблемой, стоящей перед современной астрофотометрией, является повышение точности измерений и редуциций. Важнейшими шагами на пути решения этой проблемы являются создание системы стандартов нового типа и стандартизация методов обработки фотометрических измерений.

Main goal of modern astrophotometry is an increasing of accuracy and precision for measurements and processing. It is necessary to create a new type standard system and standartization of reduction technique for approaching the goal.

### Введение

Почти все, что мы знаем и можем узнать о небесных телах, мы получаем в результате анализа их электромагнитного излучения. Нас интересует, с какого направления приходит излучение, какова его мощность, как эта мощность распределена по спектру и как эти параметры изменяются со временем. В узком смысле анализ мощности излучения в оптическом диапазоне и составляет предмет астрофотометрии. Астрофотометрия как раздел астрономии возникла во II в. до н. э., когда Гиппарх разделил все звезды на шесть классов по величине.

Астрофотометрия в широком смысле этого понятия — не только получение количественных сведений об электромагнитном излучении небесных тел, но и использование этих знаний для решения разнообразных задач астрономии.

В XX в. астрофотометрические измерения стали особенно важны для астрофизики, так как были развиты методы многоцветной фотометрии звезд, созданы многоцветные фотометрические системы и в некоторых из них были произведены измерения звездных величин и показателей цвета сотен миллионов звезд.

Из всего необъятного круга современных приложений астрофотометрии в астрономии выделим важнейшие области.

Во-первых, как и в древности, звездные величины совместно с координатами служат для целей ориентации и навигации. Только теперь речь идет не об ориентации на поверхности Земли, а об автоматической ориентации и навигации космических аппаратов. Аппарат в космосе должен уметь, направив свои датчики в произвольный участок неба, отождествить звезды, попавшие в поле зрения, определить координаты этого участка и вычислить собственную ориентацию. Сложность заключается в том, что спектральная чувствительность бортовых датчиков, как правило, сильно отличается от общепринятых в астрономии фотометрических полос. Сегодня, как правило, максимум чувствительности этих датчиков находится в красной или инфракрасной области, где ярчайшими звездами будут уже не голубые Сириус с Вегой, а Бетельгейзе и другие, более слабые в визуальной области, красные звезды.

Современная астрофотометрия должна уметь по измерениям в одной части спектра предсказывать реакцию прибора на излучение звезд в любой другой полосе пропускания.

Чтобы решить эту проблему, нужно справиться со второй важнейшей задачей астрофотометрии. Она заключается в том, чтобы на основе многоцветной фотометрии звезд восстановить распределение энергии в их спектрах. Непосредственное получение спектральноэнергетических кривых является сложной и трудоемкой задачей. Невероятно, чтобы распределение энергии в спектре можно было бы получить для сотен миллионов слабых звезд  $15\text{--}20^m$ . Однако спектральное распределение энергии в большинстве случаев можно восстановить по результатам многоцветной фотометрии. Если эта задача будет решена успешно, то фундаментальная астрофизика получит данные о температуре, светимости и химическом составе атмосфер звезд, а прикладная астрономия — звездные величины в любой напередзаданной полосе реакции приемника. Задача восстановления распределения энергии в спектре звезд по фотометрическим данным тесно связана с задачей спектральной классификации.

Современную астрофизику трудно представить без фотометрических исследований переменных звезд. Это третья важнейшая задача астрофотометрии. Изучение многочисленных и разнообразных эффектов переменности звезд было и остается крайне необходимым для понимания строения и эволюции звезд и звездных систем. В последнее время возникает все больше задач, требующих предель-

но высокой фотометрической точности. Это изучение радиальных и нерадиальных пульсаций звезд на разных гармониках, задачи астророссийсмологии и многое другое.

И наконец, четвертая важнейшая задача связана с тем, что на совершенно новые рубежи вышла современная астрометрия. В последние десятилетия с Земли и из космоса было получено около миллиона измерений точных положений и собственных движений ярких звезд и измерены точные параллаксы практически всех звезд, удаленных на расстояние до 200 пк от Солнца. Современная точность астрометрии — это примерно  $0.002''$ . На повестку дня выходят задачи получения астрометрических данных с погрешностями, не превосходящими  $0.00001''$ . Но поскольку изображение объекта различно в различных длинах волн, то эту задачу нельзя решить, если не располагать данными высокоточной многоцветной фотометрии.

Перечисленные выше задачи имеют важнейшее значение для современной фундаментальной и прикладной астрономии. Для их решения необходимо создать соответствующие фотометрические системы для наблюдений с поверхности Земли и из космоса. Ключевым вопросом здесь является повышение фотометрической точности как в случайном, так и в систематическом отношении. Задача повышения точности напрямую связана с созданием систем фотометрических стандартов и калибровкой результатов измерений.

## Классификация методов астрфотометрии

В фотометрии всегда измеряется отношение энергетических потоков двух источников излучения в некоторой спектральной полосе.

В зависимости от поставленных задач методы астрфотометрии можно разделить на несколько классов.

В тех случаях когда результаты измерений выражаются непосредственно в единицах мощности, приходящей от источника на небе на определенную площадь в определенном спектральном интервале, говорят об *абсолютной* астрфотометрии. Абсолютные измерения ведутся путем сравнения с эталонами спектральной плотности энергетического потока или энергетической освещенности. При подобных

измерениях приходится делать большое количество промежуточных калибровок, в результате чего возникают значительные систематические ошибки. Они особенно велики при измерениях в ультрафиолетовой области, где могут достигать десятков процентов.

Ситуация упрощается, если для одной или нескольких звезд, обычно называемых *стандартами*, уже заданы либо распределение энергии в спектре, либо величины во всех спектральных полосах используемой многоцветной фотометрической системы. Тогда результаты сравнения выражаются в долях энергии излучения стандарта. Если для стандарта проведена абсолютная калибровка, то и для исследуемой звезды можно сделать в каждой полосе оценку энергетического потока в эргах в секунду, ваттах и т. п. Подобные измерения уместно называть *абсолютно-относительными*. Систематические ошибки абсолютизации потоков стандарта в этом случае входят одинаковым образом в измерения всех звезд.

Во многих случаях абсолютной калибровки величин стандарта не имеется. Как правило, стандарту априори присваиваются произвольные звездные величины во всех полосах используемой фотометрической системы. Конечно, эти величины выбираются похожими на те, к которым мы привыкли раньше. Собственно, аналогичным способом поступил когда-то Гиппарх, приписав ярчайшим звездам неба класс 1, а слабейшим — класс 6. Такие астрофотометрические измерения назовем *относительными*.

По величине, характеризующей погрешности измерений, можно выделить четыре класса точности астрофотометрии.

К первому классу отнесем измерения, не требующие высокой точности. Назовем такие измерения *пороговыми*. К пороговым, например, относятся измерения с целью обнаружения переменных с большими амплитудами блеска (Новые, сверхновые и пр.). Для таких измерений даже погрешность в целую величину может не играть существенной роли. Будем считать, что фотометрия относится к классу пороговой, если сумма случайных и систематических ошибок в смысле среднеквадратичной погрешности превышает  $\pm 0.1^m$ . Для пороговых измерений практически не требуется учитывать зависимость разности блеска звезд от спектрального состава их излучения, от ширины и формы кривых реакции фотометрической системы и т. п. Как правило, пороговая фотометрия — это единственный способ получить данные о наиболее слабых звездах, доступных конкретному телескопу.

Ко второму классу отнесем *грубые* измерения. Этим термином следует называть фотометрию со среднеквадратичной погрешностью  $0.03\text{--}0.09^m$ . Это типичная точность хороших оценок блеска по фотопластинкам. Для получения грубых измерений достаточно простейших методов учета аппаратурных и атмосферных эффектов.

Переходя к третьему классу, который будем называть *точной* астрофотометрией, напомним, что отклик фотоэлектрического приемника  $G$  пропорционален интегралу по ширине полосы фотометрической системы от произведения функции распределения энергии в спектре измеряемой звезды  $E(\lambda)$  на полную кривую реакции приемника  $T(\lambda)$  и, в случае наземных измерений, на кривую спектрального пропускания земной атмосферы  $p(\lambda)$  в данном направлении:

$$G \sim \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)T(\lambda)p(\lambda)d\lambda. \quad (1)$$

В звездных величинах  $m$  это уравнение записывается в виде

$$m = \text{const} - 2.5 \lg \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)T(\lambda)p(\lambda)d\lambda. \quad (2)$$

Полная кривая реакции приемника формируется кривой квантовой эффективности детектора и кривыми спектрального пропускания и отражения оптических элементов, включая светофильтры.

Точная фотометрия характеризуется среднеквадратичной погрешностью  $0.02\text{--}0.005^m$ . Для достижения такого результата как при измерениях, так и в процессе обработки необходимо применять специальные методы, в число которых, в частности, входит итерационный метод учета атмосферной экстинкции, разработанный Халиуллиным и Мошкалевым [1]. Получить измерения разности величин с погрешностью порядка  $\pm 0.01^m$  несложно, если речь идет о дифференциальной фотометрии звезд в небольшой области на небе, на временных интервалах, не превышающих одной ночи для звезд со сходными спектрами. Однако трудности многократно возрастают, когда требуется сравнивать потоки от звезд различных спектральных типов, расположенных в разных частях небесной сферы (например, в северном и южном полушариях) на протяжении длительных интервалов времени.

Еще более строгие требования возникают, если задаться целью получать *высокоточные* фотометрические измерения с суммарной среднеквадратичной ошибкой менее  $\pm 0.005^m$ . И хотя нет принципи-

альных причин, чтобы добиться погрешности  $\pm 0.001^m$ , на практике этот предел пока еще труднодостижим.

Вместе с тем задач, требующих высочайшей точности фотометрических измерений, становится все больше. Как уже было сказано, к ним относится задача достижения современной астрометрией микроарксекундной точности координат и параллаксов звезд. Поскольку оптические аберрации зависят от длины волны, получение точных координат прямо и непосредственно связано с задачей точного измерения звездных величин и показателей цвета. Чтобы получить измерения с погрешностью порядка 10—100 угловых микросекунд, нужны показатели цвета с погрешностью не хуже  $0.001—0.003^m$ .

К задачам, требующим очень точной фотометрии, относится также задача обнаружения фотометрическими методами планет вне Солнечной системы.

## Причины потери точности

Есть целый ряд причин, приводящих к потере точности.

Сравнительно просто обстоит дело со случайными ошибками, такими как фотонный шум. Бороться с этими ошибками и соответственно увеличивать отношение сигнал/шум можно увеличением числа накопленных фотонов. Правда, для этого нужно увеличивать либо время накопления сигнала, либо размер питающей оптики. Увеличивать время накопления можно тогда, когда есть уверенность, что свойства сигнала не изменяются за время накопления. Другими словами, если нас не интересуют вариации сигнала, происходящие на временных интервалах менее времени экспозиции. Увеличивать размер телескопа трудно и дорого.

Если измерения ведутся через атмосферу в совершенно ясную погоду, то, на первый взгляд, для того, чтобы получить ошибку, не превышающую 1 %, достаточно накопить за время экспозиции 10 000 единиц отклика. Если производить измерения с помощью классического фотозлектрического фотометра с фотоумножителем на телескопе с диаметром главного зеркала около 1 м и применять метод счета фотонов, то для ярких звезд поток в 10 000 импульсов будет накоплен за доли секунды. К сожалению, это не означает, что уже достигнута ошибка менее 1 %. Дело в том, что временной спектр мерцаний звезд даже на высокогорных обсерваториях содержит низкочастотные составляющие непреенебрежимой амплитуды на характерных временах до 5—6 с. Поэтому при наблюдениях с Земли ре-

комендуется использовать времена накопления не менее 6, а лучше 10 с. Этот эффект зависит от размера входной апертуры и особенно существен для телескопов малого и среднего размера.

При точной и тем более высокоточной фотометрии главную роль начинают играть методы выявления и учета систематических ошибок. Как следует из уравнения (1), неизвестность и непостоянство полной кривой реакции приемника будет приводить к возникновению систематических ошибок при определении разности звездных величин. Аналогично ошибки будут возникать от незнания или от переменности спектра звезды. Подчеркнем, что речь идет не только о том, чтобы получить данные в собственной инструментальной фотометрической системе, но и о том, чтобы все результаты фотометрических наблюдений были бы представлены в единой стандартной системе, в которой было бы легко (и правильно!) сравнивать свои результаты с результатами других авторов.

Надежная трансформация между различными фотометрическими системами также требует точных измерений.

## Точность фотометрии в обзорных каталогах звезд

Как ни странно, только небольшое число каталогов, содержащих значительное число звезд, может считаться источником точных и высокоточных фотометрических данных. Гигантские обзоры, выполненные на основе сканов фотографических пластинок, имеют существенные случайные и еще большие систематические ошибки. Это типичные примеры пороговой фотометрии.

Многочисленные измерения, выполненные разными авторами в системе  $UBV$ , как правило, имеют внутреннюю точность, удовлетворяющую требованиям к точным каталогам. Однако эти данные не выдерживают критики с позиции систематических ошибок. Даже ряды наблюдений одних и тех же звезд, выполненные самим Джонсоном сходятся друг с другом со стандартной ошибкой не лучше, чем  $0.02^m$ . Результаты же, полученные разными авторами, могут различаться существенно более. На рис. 1 показано сравнение двух фотометрий звезд в рассеянном скоплении Гиады. Одни измерения выполнены в 1955 г. Джонсоном и Нуклсом [1], а другие — Апгреном и Вайсом [2] в 1977 г. В этих работах имеется 30 общих звезд в интервале звездных величин между  $7^m$  и  $11^m$ . Видно, что между фотометриями существует большая систематическая разница как в звездных величинах, так и в показателях цвета. Это подчеркивает,

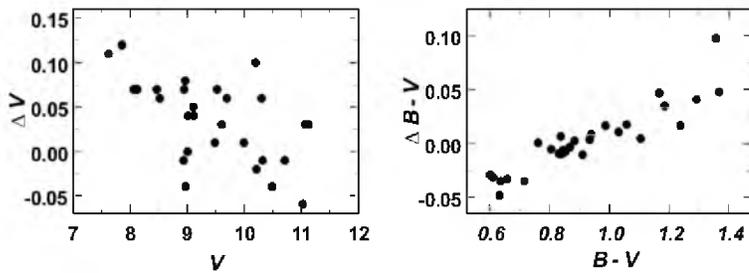


Рис. 1. Сравнение фотометрий звезд Гиад в работах [1] и [2]. На левой панели по оси абсцисс — звездная величина  $V$  по данным [2], по оси ординат — разность звездных величин в этих работах. На правой панели — аналогичный график для показателя цвета  $B - V$

что процедура перевода на стандартную систему  $UBV$  не определена. Такие результаты ни с какой точки зрения нельзя считать удовлетворительными.

То же самое можно сказать о каталогах, выполненных в среднеполосной системе  $ubvy\beta$  Стремгrena. Каталоги, составленные на основе измерений разных авторов, плохо сходятся друг с другом. Очевидно, что причинами этого являются плохое знание инструментальных кривых реакции, несовершенство методики приведения величин на стандартную систему и отсутствие достаточно однородной системы стандартов по всему небу. О требованиях к стандартам мы будем говорить позже, здесь же отметим, что та ситуация со стандартами, которая была удовлетворительной во времена Джонсона, не может считаться нормальной в XXI в.

Недостатки, связанные с неоднородностью системы стандартов и трудностями привязки звездных величин к стандартам, достаточно далеко отстоящих от исследуемых звезд, оставили отпечаток и на такой работе, как измерение более чем 15 тыс. звезд в Вильнюсской системе. Эта система, задуманная вначале как чисто колориметрическая, опирается на величины  $V$  стандартов системы  $UBV$  и унаследовала все их недостатки.

По настоящему высокоточная фотометрия в настоящее время содержится только в трех каталогах. Первый — «Каталог WBVR-

величин ярких звезд северного неба» [3], созданный в ГАИШ на основе наблюдений почти 14 тыс. звезд, проведенных в Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории близ Алма-Аты. Второй — каталог величин  $H_r$ , полученный в ходе космического эксперимента Hipparcos [5]. Практически все звезды WBVR-каталога содержатся в обзоре Hipparcos. Было показано [6], что после исключения двойных и переменных звезд, а также немногочисленных наблюдений с грубыми ошибками стандартное отклонение разностей наблюдаемых и вычисленных величин  $H_r$  равно  $0.0048^m$ . Этот результат получен по выборке из примерно 7 тыс. общих звезд. Аналогичные полиномы были составлены и для аппроксимации величин  $V_T$  и  $B_T$ , содержащихся в каталоге Tycho. Сравнение величин  $V$  и  $V_T$  показало, что стандартное отклонение для разностей наблюдаемых и вычисленных величин  $V_T$  равно  $0.0044^m$ , а для разностей показателей цвета  $(B - V) - (B_T - V_T) = 0.0089^m$ . Отсюда следует, что и данные Тянь-Шаньского WBVR-каталога, и фотометрические результаты в каталогах Hipparcos и Tycho удовлетворяют введенному выше определению высокоточных каталогов.

В 2006 г. стал доступен полностью фотометрический обзор всего неба, выполненный в трех инфракрасных полосах  $J$ ,  $H$  и  $K_s$ , полученный в результате выполнения проекта 2MASS [7]. Каталог 2MASS, содержащий данные о почти 500 млн объектов, разумеется, сразу привлек внимание астрофотометристов. Предварительное сравнение величин общих звезд в 2MASS и в Тянь-Шаньском WBVR-каталоге (т. е. для звезд с  $5^m < V < 7.0^m$ ) показали, что для этих звезд типичная ошибка величины  $J$  равна  $0.04^m$ .

## Система стандартов нового типа

Успех эксперимента Hipparcos и подготавливаемые новые обзорные проекты побуждают астрономов к тому, чтобы была достигнута еще более высокая точность фотометрических и спектрофотометрических измерений. Сегодня многие коллективы исследователей в разных странах планируют осуществить обзоры неба. Несомненно, что в ближайшие десятилетия будут проведены по крайней мере 10—20 обширных наземных и космических обзоров с разными целями. На данном этапе речь может идти о точности  $0.001$ — $0.003^m$  как в случайном, так и в систематическом смысле.

Нам представляется, что цель современной звездной фотометрии состоит в том, что она должна превратиться из раздела практиче-

ской астрофизики в часть астрономической метрологии, как это давно имеет место в астрометрии.

Очевидно, что новые обзоры будут выполнены в разных фотометрических системах. Безусловно, что возникнет потребность сравнивать эти данные друг с другом. Без этого нельзя оценить ни случайные, ни систематические ошибки. Каждая такая фотометрическая система будет нуждаться в собственных стандартах.

Поэтому возникает задача создать такую систему стандартов по всему небу, которая могла бы обслуживать любую (или почти любую) фотометрическую систему, была бы пригодна для любой фотометрической полосы.

Очевидно, что идеальными стандартами является набор звезд, для которых известно точное распределение энергии в спектре в необходимом спектральном интервале. Для таких стандартов сравнительно легко вычислить величины в любой фотометрической полосе. Такой набор данных об этих звездах мог бы служить опорой для любой фотометрической полосы. Его можно было бы назвать *фотометрической системой отсчета*.

Чтобы при наблюдениях всегда можно было бы привязать к опорным звездам любое фотометрическое измерение, нужно, чтобы объем системы стандартов достигал нескольких миллионов звезд в обоих полушариях — от ярчайших до звезд, скажем,  $15^m$ . Получить такое огромное количество высокоточных спектров не представляется возможным. Однако к этому идеалу можно приблизиться при дополнительном условии. Отобрать в стандарты только звезды с «типичными» распределениями энергии; тогда их распределение энергии можно будет восстановить из фотометрических измерений в небольшом числе достаточно широких фотометрических полос.

Повторим, что астрофотометрия всегда имеет дело со сравнением световых потоков от двух источников в инструментальной фотометрической системе, определенной кривыми реакции инструмента совместно с изменяющейся функцией пропускания земной атмосферы. Таким образом, наблюдения всегда проводятся в разных фотометрических полосах и полученные результаты должны быть переведены в унифицированную систему, определенную установленными кривыми реакции и нуль-пунктом.

Следовательно, основной задачей стандартизации фотометрических измерений становится задача создания каталога таких звезд, величины которых можно было бы легко перевести в любую наперед заданную фотометрическую систему без потери точности. По

аналогии с терминами, используемыми в астрометрии, такой каталог следует назвать *фундаментальным фотометрическим каталогом*.

Использовать опорную систему можно следующим образом. Измерив несколько десятков или сотен стандартов из фундаментального каталога с помощью вашей аппаратуры, вы получаете уравнение трансформации. Применяя это уравнение ко всем опорным стандартам, вы получаете сотни тысяч стандартов в вашей собственной фотометрической системе, распределенных по всей небесной сфере и имеющих высокую точность.

Фундаментальный фотометрический каталог должен быть создан путем тщательного сравнения большого числа отдельных каталогов. В процессе этого сравнения необходимо выявить и устранить систематические ошибки этих каталогов.

На практике фотометрическая система отсчета понимается как набор моделей, соглашений и предписаний, которые нужно использовать, чтобы из наблюдений получить для любого момента времени фотометрические свойства приемной аппаратуры, параметры пропускания земной атмосферы и величины программных звезд в утвержденных фотометрических полосах.

Система опорных фотометрических стандартов должна удовлетворять следующим требованиям.

Система должна быть стабильной. Необходимо контролировать стабильность параметров всех звезд из фундаментального каталога. Их возможные вариации блеска и переменность спектра должны быть тщательно изучены.

Система должна быть удобна для использования. Для этой цели должна быть создана достаточно плотная сетка стандартов на всем небе. В идеале число опорных объектов должно было бы достигать 1—6 млн. В таком случае при использовании большого наземного телескопа в его поле зрения, размер которого обычно составляет  $10'$ , в среднем содержалось бы 1—4 опорных объекта.

Система должна содержать стандарты в различных диапазонах звездных величин. Наиболее яркие стандарты должны быть изучены по особой программе. Величины стандартов, принадлежащих различным диапазонам блеска, должны быть хорошо скоординированы друг с другом.

Система должна поддерживать высокую внутреннюю точность. Обычная точность индивидуального наземного наблюдения равна  $0.01^m$ . Стандарты опорной системы должны быть измерены в 3—10 раз точнее.

Система должна быть свободна от систематических ошибок. В систематическом отношении точность опорных стандартов не должна зависеть ни от положения на небе, ни от блеска и показателя цвета, ни от других параметров

Звезды-стандарты должны удовлетворять следующим требованиям.

- их величины должны быть неизменны с точностью  $0.001—0.003^m$ ;
- распределение энергии в спектрах звезд-стандартов должно обеспечивать простую и однозначную трансформацию из инструментальной фотометрической системы в стандартную и обратно, а также из стандартной системы в любую другую фотометрическую систему;
- средняя ошибка такой трансформации должна быть менее, чем  $0.001—0.003^m$ ; поэтому, в частности, двойные и кратные звезды должны быть исключены.

Чтобы осуществить такую систему должны быть определены и утверждены следующие модели, параметры и методы:

- набор кривых реакции внеатмосферных фотометрических полос;
- модели атмосферной экстинкции;
- набор распределений энергии в спектрах звезд-стандартов из фундаментального каталога;
- метод уточнения атмосферной экстинкции;
- метод трансформации величин между системами;
- метод контроля кривых реакции, использующий наблюдения стандартов в рекомендованных полосах.

Только комбинация всех этих условий позволит создать опорную систему фотометрических стандартов, удовлетворяющую современным требованиям точности.

## Заключение. «Ли́ра-Б»

Важным этапом создания фундаментального фотометрического каталога может стать осуществление одного (а лучше нескольких!) наземного и космического обзорных проектов, ставящих перед собой задачу получения высокоточной фотометрии и ведения измерений объектов от самых ярких до примерно  $15^m$ .

Одним из таких проектов должен стать российский космический фотометрический эксперимент «Ли́ра-Б», предусматривающий размещение автоматического фотометрического телескопа на борту международной космической станции.

### Список литературы

1. *Мошкалев В. Г., Халиуллин Х. Ф.* Итерационный метод учета атмосферной экстинкции при фундаментальной гетерохромной астрофотометрии // *Астрон. журн.* 1985. Т. 62. С. 1001.
2. *Johnson H. L., Knuckles C. F.* The Hyades and Coma Berenices Star Clusters // *Astrophys. J.* 1955. Vol. 122. P. 209.
3. *Uppgren A. R., Weis E. W.* Photometry of new possible members of the Hyades cluster // *Astronom. J.* 1977. Vol. 82. P. 978.
4. *Корнилов В. Г., Волков И. М., Захаров А. И. и др.* Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба. /Под ред. В. Г. Корнилова // *Тр. ГАИШ. М., 1991. Т. 63.*
5. ESA: 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP—1200, v.1—17.
6. *Mironov A., Zakharov A.* Systematic Errors of High- Precision Photometric Catalogues // *Astrophys. and Space Sci.* 2002. Vol. 280. Iss. 1/2. P. 71.
7. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. et al.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astronom. J.* 2006. Vol. 131. P. 1163.