

УДК 524.31

В.Б. Никонов и современные проблемы астрофотометрии

А.В. Миронов, А.И. Захаров

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Университетский проспект, 13, Москва, 119992, Россия

Поступила в редакцию 09 марта 2006 г.

Аннотация. В.Б. Никонов сыграл важную роль в истории астрофотометрии. Его работы позволили значительно повысить точность измерений. Развитие выдвинутых им идей послужило основой создания высокоточного фотометрического каталога в ГАИШе.

Изучение наследия Никонова стимулирует современные работы по дальнейшему повышению точности астрофотометрических измерений.

V.B. NIKONOV AND MODERN PROBLEMS OF ASTROPHOTOMETRY, by A.V. Mironov and A.I. Zakharov. V.B. Nikonov figured prominently in history of astrophotometry. His works enabled to increase notably an accuracy of the measurements. Subsequent development of Nikonov's ideas in Sternberg astronomical institute was set up a base for creation of high-accuracy photometric catalogue. A study of the Nikonov's science heritage stimulates now an activities for further increasing of photometric accuracy.

Ключевые слова: В.Б. Никонов, астрофотометрия

В середине 1930-х годов в астрономии и астрофизике остро встала проблема повышения точности фотометрических измерений. В деле решения этой проблемы большую роль сыграл Владимир Борисович Никонов.

Понятие *точность* в астрофотометрии употребляется, по крайней мере, в двух смыслах.

Во-первых, под термином *точность* понимают *внутреннюю точность* измерений. Она характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения ряда весьма близких во времени оценок звездной величины, сделанных с помощью одной и той же аппаратуры. Главными причинами таких отклонений являются квантовая структура электромагнитного излучения и быстрые флуктуации коэффициента экстинкции земной атмосферы. Оба этих процесса являются случайными процессами с известными распределениями. Поэтому внутренняя точность средней величины светового потока, измеряемого за относительно короткий промежуток времени, увеличивается при увеличении времени накопления сигнала.

Во-вторых, существуют *систематические ошибки*, отражающие изменения атмосферных условий и аппаратуры. Причина появления этих ошибок – несовершенство методов измерений и обработки данных. Усреднение измерений иногда может приводить к повышению *внутренней точности каталога* (эксперимента) за счет случайной взаимной компенсации влияний причин, приводящих к отклонениям в противоположные стороны. Такое усреднение ведет к уменьшению разброса результатов измерений, но при этом всегда остается неучтенная систематическая часть, выявить которую можно только путем сравнения с измерениями, выполненными в принципиально

других условиях с принципиально другой аппаратурой (в сравнении наземных и космических наблюдений, в других фотометрических каталогах и проч.).

Поэтому, кроме внутренней точности, необходимо рассматривать *внешнюю точность* каталога (эксперимента), то есть сходимость данных, приведенных в разных каталогах и полученных на разной аппаратуре, в разных обсерваториях и пр. Внешняя точность отражает те систематические ошибки, которые не удалось обнаружить и скомпенсировать.

Точность визуальных и фотографических фотометрических измерений первой трети XX века, как правило, характеризовалась величиной ошибки порядка 0.1 – 0.5 звездной величины. Многочисленные измерения основных стандартов, таких как звезды Северного Полярного ряда, имели высокую внутреннюю точность, но обладали существенными систематическими ошибками, различными для разных звездных величин.

Переход к фотоэлектрическим измерениям позволил значительно повысить как внутреннюю, так и внешнюю точность фотометрии звезд. Первый же опыт Никонова показал, что внутренняя точность фотоэлектрических измерений, выполненных с первым советским фотоэлектрическим фотометром (Никонов, Куликовский, 1939), соответствует среднеквадратическому отклонению порядка нескольких тысячных долей звездной величины (нескольких десятых долей процента). Однако разброс результатов, полученных в разные ночи, в десятки раз больше.

Никонов быстро понял острую необходимость разработки соответствующих способов редукиций, прежде всего – разработки методов учета атмосферной экстинкции. Владимир Борисович блестяще справился с этой задачей на уровне требований и возможностей своего времени, создав не только первый в СССР фотоэлектрический фотометр, но и знаменитый метод учета ослабления света в атмосфере, носящий его имя. В результате как внутренняя, так и внешняя точности улучшились на порядок по сравнению со старыми визуальным и фотографическим методами.

Перед современной астрофотометрией стоит аналогичная задача: необходимо еще примерно на один порядок повысить точность астрофотометрических измерений. Отметим, что повышение точности обходится весьма дорого, поскольку на этом пути необходимо проделать большую работу, требующую значительных затрат времени и средств. Закономерно возникает вопрос: “А для чего же нам такая точность?”.

Покажем это на одном единственном примере.

Весь астрономический мир с замиранием сердца ждет реализации грандиозного космического эксперимента GAIA, в ходе которого предполагается получить астрометрический и многоцветный фотометрический обзор неба (ГАЙА, 2000). Итоговый каталог должен будет содержать около одного миллиарда звезд и примерно столько же галактик. В звездном каталоге будет, предположительно, 340 тыс. объектов до $V = 10^m$, 26 млн. – до $V = 15^m$, 250 млн. – до $V = 18^m$ и 1000 млн. – до $V = 20^m$. При этом предполагается достичь ошибки параллакса не более 4ас для звезд ярче 10^m , не более 11ас для звезд 15^m и примерно 160ас для звезд 20^m .

Фотометрия: до $V = 20^m$ должна быть выполнена в 5-х цветной широкополосной системе, и до $V = 15^m$ – в 11-ти цветной среднеполосной системе.

Проследим связь между ошибками астрометрии и фотометрии.

Для получения заявленных результатов фокусное расстояние главных телескопов GAIA должно быть порядка 50 метров. Космический аппарат предполагается поместить на околосолнечной орбите в районе лагранжевой точки L2 системы Солнце-Земля. Очевидно, что доставить туда конструкцию 50-метровой длины невозможно. Проектируемая оптическая схема предполагает трехзеркальную внеосевую систему. Естественно, что при этом дифракционное изображение точечного объекта будет иметь вид не знакомого всем диска Эри, окруженного кольцами, а гораздо более сложную форму. При этом вид дифракционной картины будет изменяться в зависимости от длины волны.

На сайте фотометрической группы проекта GAIA <http://gaia.am.ub.es/PWG> приведены результаты компьютерного моделирования изображения точечного источника в фокальной плоскости главных (астрометрических) телескопов GAIA в нескольких длинах волн. Это неправильные и несимметричные фигуры. Мы внимательно изучили рисунки на сайте и пришли к выводу, что различие в спектральном составе излучения белых и красных звезд, различающихся по показателю цвета на $\Delta(B - V) = 1^m5$ будет приводить к систематическому сдвигу максимума изображения



Рис. 1. Результаты теоретического расчета дифракционной картины от монохроматического точечного источника в фокальной плоскости астрометрических телескопов GAIA. Слева – длина волны 600 нм, справа – 900 нм.

на огромную для GAIA величину – около 7 mas. Подчеркнем, что это систематическая ошибка, не зависящая от числа наблюдений. Чтобы учесть этот эффект и получить окончательную погрешность в 1000 раз меньше систематической ошибки, нужно одновременно получить показатели цвета измеряемой звезды в инструментальной системе с погрешностью, не превышающей $1^m5/1000 = 0^m0015$.

Очевидно, что для проведения таких редукиций требуются высокоточные методики и система высокоточных стандартов.

Рассмотрим подробнее важнейшие принципы, выработанные Никоновым для повышения точности учета атмосферной экстинкции (Никонов, 1944).

Во-первых, для того чтобы правильно обработать наблюдения, нужно правильно построить наблюдательную программу. В методе Никонова в течение ночи нужно регулярно наблюдать экстинкционный стандарт. По этим измерениям определяются вариации атмосферной экстинкции (и чувствительности аппаратуры). Во-вторых, при обработке главная часть поправки за атмосферное поглощение представляется эмпирической моделью. Из наблюдений находятся только малые поправки к этой модели, которые можно представить функцией линейной по малому числу параметров. И, в-третьих, для окончательного определения внеатмосферных величин стандартов в инструментальной системе привлекаются наблюдения программных звезд. Таким образом, все звезды “работают” стандартами.

Эти никоновские идеи были реализованы наблюдателями ГАИШ при создании Тянь-Шаньского фотометрического каталога ярких звезд северного неба (Корнилов и др., 1991). Наблюдения выполнялись в высокогорной обсерватории близ Алма-Аты на высоте около 3000 м над уровнем моря.

1. Хорошо продуманная и отлаженная фотометрическая аппаратура позволяла тратить на измерение одной звезды (в 4-х фильтрах) примерно одну минуту. Через каждые 10 – 20 минут измерялась пара стандартов.
2. При обработке в первую очередь измерения редуцировались за стандартную модельную



Рис. 2. В.Б. Никонов на конференции, посвященной созданию Вильнюсской фотометрической системы. Вильнюс. 1960-е годы

атмосферу. После этого вариации параметров атмосферы и аппаратуры учитывались как функции малых параметров. Для учета зависимости атмосферной экстинкции от спектрального состава излучения звезд использовались модели средних распределений энергии в спектрах звезд разных спектральных классов.

3. Контроль правильности определения выноса проводился по звездам, которые наблюдались в течение ночи более одного раза. Критерием правильности подбора параметров модели атмосферы было требование, чтобы для всей совокупности таких звезд их звездные величины, вынесенные за атмосферу, минимально отличались друг от друга.

В результате, параллельно с измерениями программных звезд была создана и увязана система из примерно 200 стандартов.

В Тянь-Шаньском каталоге содержится 13600 звезд, каждая звезда измерялась в среднем 4 раза. Авторы каталога сразу дали высокие значения для внутренней точности своих измерений.

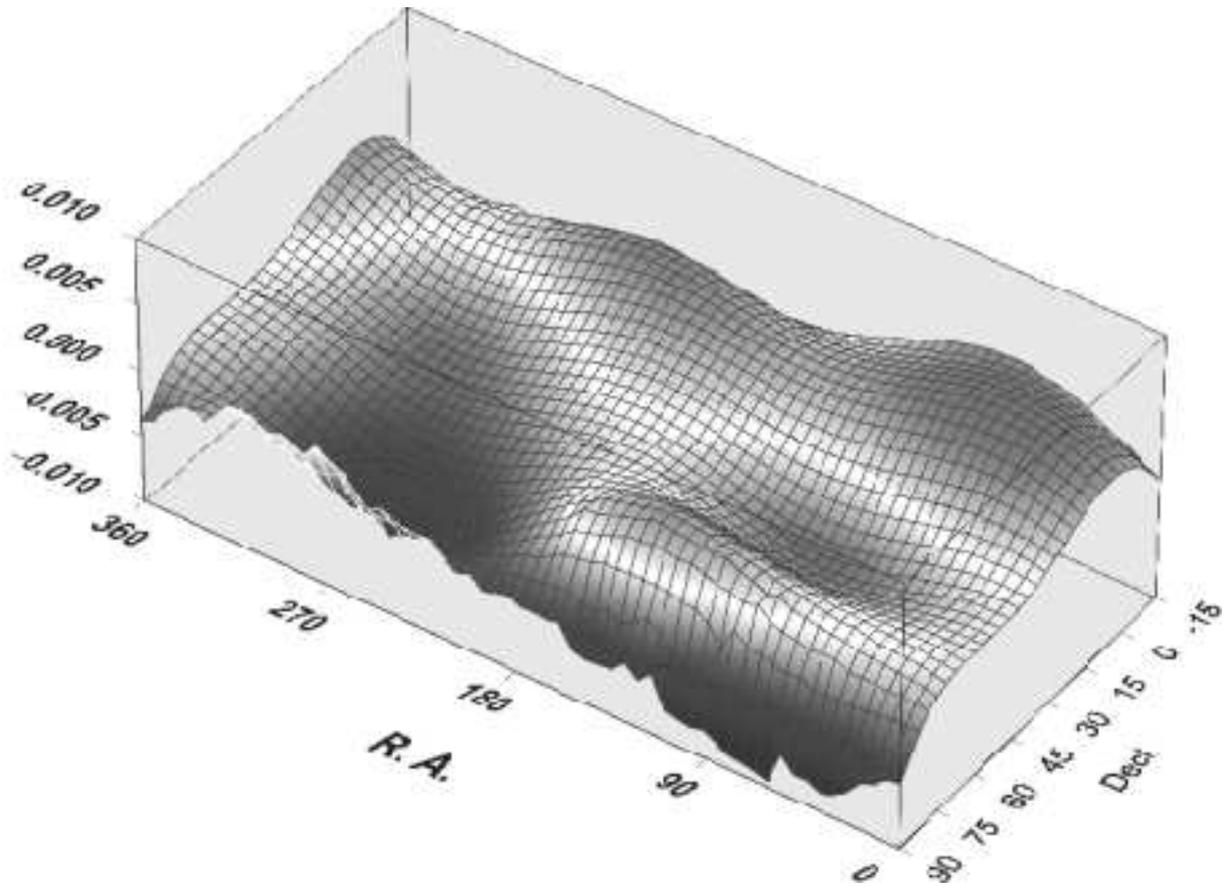


Рис. 3. Распределение по небу систематических различий фотометрии *Hipparcos* и каталога it WBVR

Среднеквадратичные отклонения средних величин оказались в 5 – 10 раз меньше, чем в любом другом фотометрическом каталоге. Сделать оценку внешней точности оказалось возможным только после завершения работ и публикации результатов космического эксперимента *Hipparcos* (“Гиппаркос”, 1997). Был построен полином от величины V и трех показателей цвета $W - B$, $B - V$ и $V - R$, моделирующий звездную величину H_p фотометрической системы *Hipparcos*. Более чем для половины звезд каталога удалось представить величину H_p с отклонением, не превышающим $0^{\text{m}}002$. Сравнение полученных из наблюдений и вычисленных величин дало возможность выявить относительные систематические различия между этими каталогами. Они оказались не малыми. Систематическая разность $H_{p_{\text{obs}}} - H_{p_{\text{calc}}}$ достигала значений $0^{\text{m}}010$ и $-0^{\text{m}}005$ в разных частях небесной сферы (Миронов, Захаров, 2001). Из дополнительных соображений оказалось возможным часть этих различий приписать к недостаткам Тянь-Шаньского каталога, а часть – к погрешностям фотометрии *Hipparcos*. Около 6000 звезд, измерения которых показали наилучшую сходимость, были рекомендованы как кандидаты в новую, обширную систему фотометрических стандартов на северном небе.

Достижения *Hipparcos* и Тянь-Шаньского каталога стимулируют дальнейшее развитие высокоточной астрофотометрии. Требования к высокой точности результата вызывают необходимость создания новых систем стандартов. Нужно чтобы:

- погрешность величин и показателей цвета стандартов не превышала $0^{\text{m}}001$;
- система обладала достаточной плотностью по всему небу;

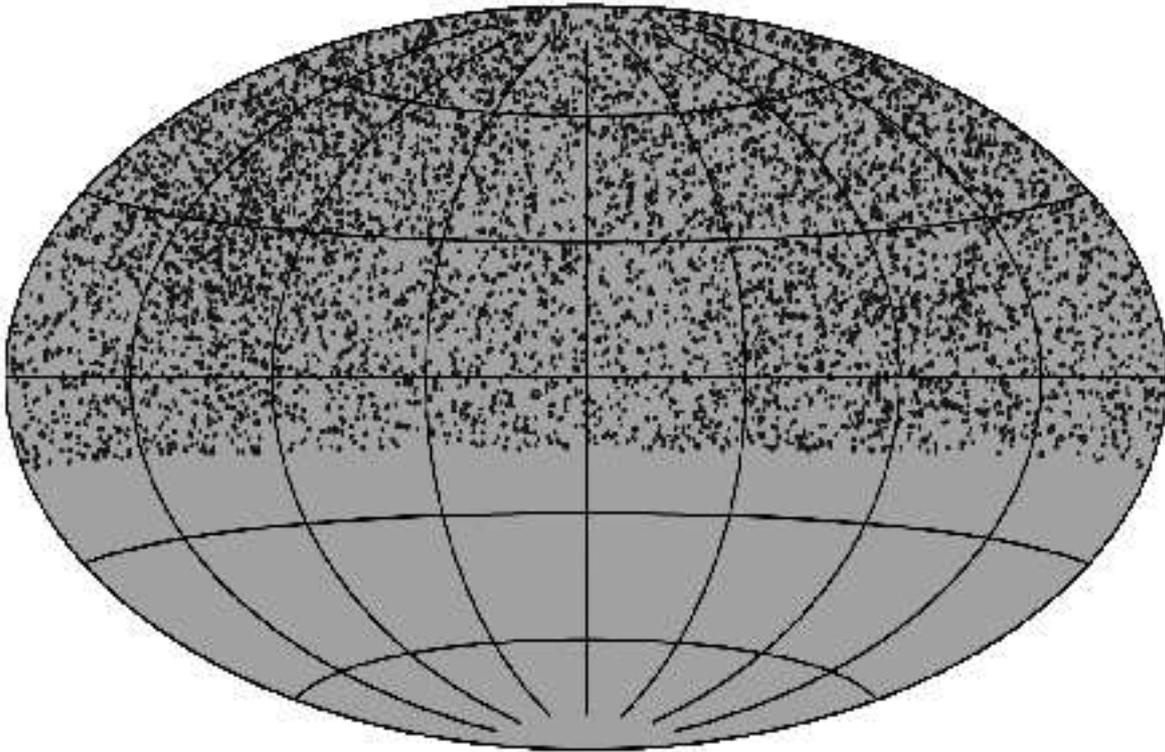


Рис. 4. Распределение на небесной сфере звезд-кандидатов на роль высокоточных стандартов

- система охватывала широкий диапазон звездных величин от ярких до наиболее слабых;
- фотометрическая система, в которой измерены стандарты, была единой по всей небесной сфере;
- фотометрическая система была многоцветной с набором полос в спектральном диапазоне от 300 до 2200 нм.

Многоцветная фотометрическая система, используемая при наблюдениях, также должна удовлетворять современным требованиям. А именно: она должна содержать набор фотометрических полос, предназначенных

- для определения физических параметров звезд и межзвездной среды;
- для определения текущих параметров атмосферы и аппаратуры.

В настоящее время ни такой фотометрической системы, ни такой системы стандартов *не существует!*

При сравнении фотометрических данных, содержащихся в разных каталогах, всегда возникает задача о переводе величин одного каталога в систему другого. В более широкой постановке, это вопрос о том, как сравнить разнородные фотометрические данные (полученные разными авторами, разными методами, в разных обсерваториях, в разных фотометрических системах), как сравнить наблюдательные данные с теоретическими, и с какой точностью это можно сделать. Создание новых фотометрических систем и систем стандартов, а также, разработка новых методов и алгоритмов обработки фотометрических измерений, основанных на достижениях математики и вычислительной техники, должны обеспечить надежное решение современных проблем астрофотометрии.

Существует еще одна очень серьезная организационная проблема.

В настоящее время появилось множество публикаций, содержащих фотометрические данные, полученные с высокой внутренней точностью, и представленные либо в некоторой инструментальной системе, либо переведенные на одну из фотометрических систем, признаваемых общепринятыми. Однако, как правило, из текстов статей нельзя понять ни деталей процесса проведения наблюдений, ни подробностей методики обработки. Авторы не описывают норм, которых придерживаются. Тем не менее, чтобы грамотно сравнить результаты, полученные в различных каталогах, необходимо, чтобы были подробно описаны процедура измерений и методы обработки. Необходимо публиковать не только средние величины, полученные в результате измерений программных звезд, но и все индивидуальные оценки как программных звезд, так и стандартов.

Очевидно, что публиковать такие сведения в существующих печатных и электронных журналах невозможно! Поэтому следует организовать специальный сайт для размещения подобных материалов.

Комиссиям МАС следует вырабатывать рекомендации по использованию стандартизованных методик наблюдений и обработки. Кроме обработки своими способами, следует обрабатывать данные и по стандартизованным методикам. Только при этом возможно будет корректно сравнивать между собой результаты разных авторов, переводить их из системы в систему, оценивать внешнюю точность. Только при этих условиях астрофотометрия вслед за астрометрией действительно станет метрологическим разделом современной астрономии и позволит реализовывать недоступные доселе точности измерений.

Наследие В.Б. Никонова должно послужить нам системой ориентиров на этом пути.

Литература

- “ГАЙА” // GAIA. Concept and Technology Study Report. ESA Publication ESA-SCI. (2000). 4.
“Гиппаркос” // The Hipparcos and Tycho Catalogues. ESA Publication SP-1200. 17 volumes. 1997.
Корнилов В.Г., Волков И.М., Захаров А.И., Козырева В.С., Корнилова Л.Н., Крутяков А.Н., Крылов А.В., Кусакин А.В., Леонтьев С.Е., Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Погрошева Т.М., Семенцов В.Н., Халиуллин Х.Ф. // Труды ГАИШ. Т. 63. Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба. Ред. Корнилов В.Г. М. МГУ. 1991.
Никонов В.Б. // Доклады Академии наук СССР. 1944. Т. 45. С. 151.
Никонов В.Б., Куликовский П.Г. // Астрон. журн. 1939. Т. 16. Р. 54.
Миронов А.В., Захаров А.И. (Mironov A.V., Zakharov A.I.) // Astrophys. Space Sci. 2002. V. 280. No. 1 – 2. Р. 71.