

## ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ОШИБКА ПОЛЯ ТЕЛЕСКОПА

## Photometric Error of the Telescope Field

**Abstract.** The field sensitivity of the telescopes AZT-14 and AZT-2 has been studied with a synchronous two-star *UBVR*-photometer. This allowed us to correct the photometric errors across the telescope field of view inherent to the astronomical photographic photometry, two-star photometry, and field CCD-photometry.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Фотометрические ошибки поля возникают при сравнительной фотометрии звезд, одновременно измеренных в пределах поля телескопа (фотопластинка, многоканальный астрофотометр, ПЗС матрица), и обусловлены уменьшением чувствительности телескопа при удалении от центра поля и другими эффектами. Аналогичное явление хорошо известно в фотоаппаратах. Наиболее распространенными фотометрическими измерениями, при которых возникает ошибка поля, это определение звездной величины звезды относительно других звезд с известными значениями, и исследование переменности выбранной звезды относительно звезд с неизменным блеском в том же поле.

В зависимости от процесса измерений, фотометрическая ошибка поля может быть случайной, систематической с неизвестной величиной и систематической ошибкой известной величины. В последнем случае она может быть полностью исключена.

Впервые учет ошибок поля при фотографической фотометрии был предпринят Стоком [1]. В этой, а также и в последующих работах [2, 3] было отмечено, что ошибки поля вызваны свойствами оптики данного телескопа, дефокусировкой изображений на краях фотопластинки, падением света на пластинку под разными углами и хроматическими искажениями на краях поля. В этих работах даны методики определения формул учета ошибок поля телескопа. Однако, на практике большинство наблюдателей следовали не учету ошибок поля, а уменьшению их. Например, при экспонировании фотопластинок исследуемую звезду и звезду сравнения по возможности размещали на одинаковом расстоянии от центра. Однако, на пластинках имеются изображения многих других звезд, которые могут быть задействованы в других задачах. Кроме того, в фототеках находятся множество пластинок, жестко не привязанных к определенным координатам, на которых интересующая нас звезда может находиться в разных по расположению местах пластинки. Немалые силы и средства сейчас тратятся на оцифровку фотопластинок, чтобы сделать доступным астрономическое прошлое. А какие материальные и человеческие ресурсы уже были потрачены в прошлом на экспонирование фотопластинок – для многих астрономов это стало делом всей жизни. Ситуацию удручает то, что невысокая точность фотографической фотометрии астрономических пластинок ( $0^m 1-0^m 2$ ) может быть еще ухудшена соизмеримыми с нею ошибками поля телескопа.

В области дифференциальной одновременной астрофотометрии с помощью фотоумножителей ситуация оказалась вообще драматической. Создававшиеся в 1970–1980 годы сложнейшие двухзвездные фотометры, имевшие высокоточные фотометрические каналы с фотоумножителями и электроникой быстрого счета фотонов, и предназначенные для высокоточных наблюдений в условиях с изменяющейся прозрачностью атмосферы, оказались в большинстве неосвоенными для наблюдений. Причины в следующем. Во-первых, не применялась методика наблюдений, исключающая изменения чувствительности фотометрических каналов, чего не требуется при наблюдениях с одноканальным фотометром. Во-вторых, по нашему предположению, не учитывались особенности при наблюдениях в разных точках поля телескопа, которые могут внести эффекты, ухудшившие общую точность наблюдений, и которые мы относим к ошибкам поля. Одноканальным фотометрам эти эффекты не присущи, поскольку с их помощью измеряют световые потоки в одной и той же точке поля телескопа, как правило, центральной.

ПЗС матрицы хотя и имеют пока незначительные размеры, но все же изменения чувствительности поля телескопа в некоторых случаях не столь мизерны, чтобы ими пренебрегать. Если используется оптика, изменяющая масштаб изображения на матрице, то она вносит дополнительную лепту в уменьшение чувствительности по краям поля. При калибровке чувствительности матрицы по плоскому, равномерно освещенному экрану перед телескопом или по сумеречному сегменту неба, автоматически учитываются ошибки поля всей оптической системы. Однако, если контрольная засветка осуществляется непосредственно перед матрицей, то в этом случае необходимо учитывать ошибки поля телескопа и дополнительной оптики.

Из трех перечисленных видов техники полевой астрофотометрии: фотографической, синхронно-двухзвездной электрофотометрии и ПЗС-фотометрии, следует выделить фотографическую астрофотометрию, которая оперирует с невозполнимыми наблюдательными ресурсами прошлых лет. В связи с массовой оцифровкой фотопластинок, вопрос учета фотометрических ошибок поля телескопов даже в одном этом случае приобретает в настоящее время, особенно актуальное значение.

## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исключения ошибок поля необходимо знать чувствительность телескопа в разных точках его поля. Для получения этой зависимости можно использовать синхронно-двухзвездный *UBVR*-фотометр. Этот фотометр ориентирован на получение высокоточных фотометрических наблюдений, поэтому в его конструкции и методике наблюдений использован ряд конструкторских, аппаратурных и методических мер для уменьшения погрешностей измерений. Например, светофильтры помещены в термостаты [4], фотоумножители охлаждаются и термостатируются при низкой температуре [5], аппаратура счета фотонов термостабилизирована [6] в наблюдениях используются диафрагмы относительно больших размеров [7] и применяется методика, исключающая дрейф аппаратуры [8]. В конструкции двойного фотометра предусмотрены также меры, исключающие или сводящие к минимуму ошибки поля, которые помимо телескопа может внести сам фотометр. Например, предусмотрены конструкторские решения по уменьшению угловых эффектов [9] и предотвращению виньетирования оптических элементов при измерениях на краях поля, и связанных с этим отклонением светового потока на

незначительный угол от центральной осевой линии телескопа. Максимальный апертурный угол фотометра соответствует относительному отверстию 1:8, а этот параметр для телескопов АЗТ-14 и АЗТ-2 равен соответственно 1:16 и 1:15, и как видно, в этом имеется двойной запас. Для исключения ошибок поля телескопа при наблюдениях с двойным фотометром, измеряемые одновременно пары звезд всегда размещались строго в одних и тех же местах поля, как правило, на равном расстоянии от центра поля телескопа, а при оценке блеска звезд учитывалась полевая чувствительность телескопа относительно центра поля. Кроме того, конструкция двойного фотометра позволяет без специальных ухищрений измерить полевую чувствительность телескопа, поскольку он состоит из двух одноканальных фотометров, размещенных на позиционном подшипнике, а каждый из фотометрических каналов может передвигаться в радиальном направлении от центра до края поля.

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились ночью со стабильной прозрачностью атмосферы, в фильтрах  $B$  и  $V$ , в различных радиальных направлениях. В пределах точности  $0^m.01$  кривая чувствительности оказалась одинаковой для обоих фильтров и разных радиальных направлений. На рисунке 1 дана кривая чувствительности 48-см телескопа АЗТ-14. Кстати, именно на этом телескопе с указанным фотометром, в том числе с учетом ошибок поля был получен ценный наблюдательный материал – вопреки ожиданиям, впервые было доказано, что у молодых быстровращающихся звезд солнечного могут быть пятна по фотометрическому контрасту в 500 раз больше, чем у Солнца [10].

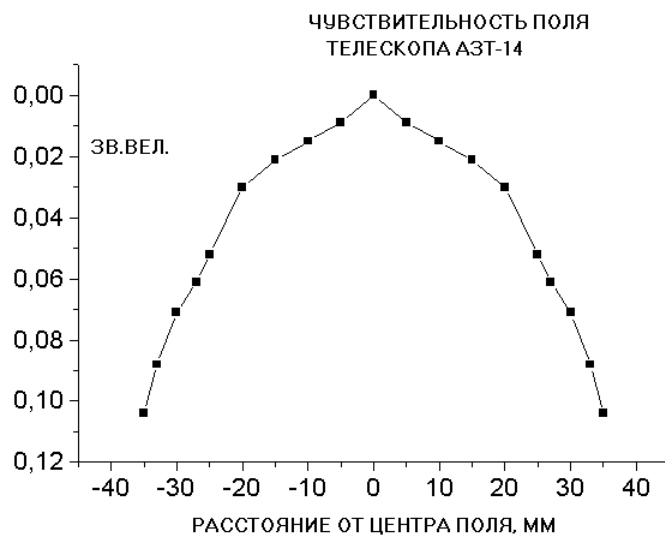


Рис. 1: Чувствительность поля телескопа АЗТ-14.

В фототеке ГАИШ имеется около 10000 фотопластинок, отснятых на 70-см телескопе АЗТ-2, кривая чувствительности которого также измерена с помощью синхронно-двухзвездного  $UBVR$ -фотометра, и приведена на рисунке 2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наивысшую чувствительность оба телескопа имеют в центре поля, а уменьшение ее при удалении от центра носит нелинейный характер. Градиент

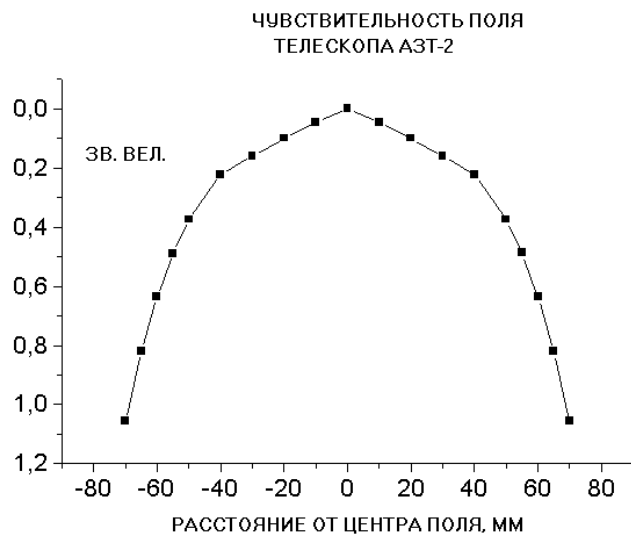


Рис. 2: Чувствительность поля телескопа АЗТ-2.

уменьшения чувствительности к краю поля телескопа АЗТ-14 от центра до расстояния 25 мм составляет примерно  $0^m002/\text{мм}$ , а на расстояниях от 25 до 35 мм –  $0^m006/\text{мм}$ . В целом на краю поля по сравнению с центром чувствительность уменьшается на  $0^m1$ . Это означает, что радиальное смещение на 1 мм двух одновременно фотометрируемых звезд, расположенных по разную сторону от центра поля (именно так измеряются световые потоки с двойными фотометрами) приводит к ошибке от  $0^m004$  до  $0^m012$ , в зависимости от расстояния между звездами. Как видим, ошибки поля АЗТ-14 вполне соизмеримы с точностью фотоэлектрических измерений, и требуют максимально возможной точности установления фотометрических каналов при повторных наблюдениях.

Из сравнения кривых чувствительности полей телескопов АЗТ-14 и АЗТ-2 следует, что характер их изменения в пределах 35–45 мм качественно схож, однако градиент убывания чувствительности АЗТ-2 более чем в два раза выше, чем у АЗТ-14. Так, на расстояниях до 40 мм от центра поля он для АЗТ-2 составляет около  $0^m05/\text{мм}$ , а в пределах от 40 до 50 – уже  $0^m016/\text{мм}$ . При схожих параметрах телескоп АЗТ-2 по сравнению с АЗТ-14 имеет вдвое большее поле, и на расстояниях от 50 до 70 мм градиент чувствительности превышает  $0^m03/\text{мм}$ , а общее уменьшение чувствительности на краю поля составляет  $1^m$ . Полученные результаты должны серьезно насторожить пользователей фотопластинок, поскольку в некоторых случаях фотометрическая ошибка поля может иметь внушительное значение. Как видно из рисунка 2, фотометрическая ошибка поля между двумя звездами, находящимися, например, на разных расстояниях от центра с разницей 30–40 мм в левой половине пластинки может составлять  $0^m5$ . Если те же самые звезды на другой пластинке попадут в правую часть пластинки, то фотометрическая ошибка поля будет иметь противоположный знак. Общий разброс показаний при сравнительной фотометрии составит в этом случае  $1^m$ .

Следует специально обратить внимание на то, что обнаруженный эффект обусловлен свойствами оптики телескопа, а не свойствами двойного фотометра, это сразу себя обнаруживает уже при сравнении кривых чувствительности двух телескопов – они численно отличаются друг от друга. Кроме того, в данной конструкции фотометра преду-

смотрено измерение фона неба путем смещения диафрагмы в фокальной плоскости на расстояние 2.5 мм от центрального положения. При этом чувствительность фотометрического канала уменьшается не более чем на  $0^m02$ . При измерениях же чувствительности поля АЗТ-2 на самом краю поля телескопа – на расстоянии 70 мм от центра поля смещение светового кружка на поверхности линзы Фабри, обусловленное перпендикулярным падением света, составляет менее 1 мм. Это соответственно вызовет уменьшение чувствительности фотометрического канала фотометра менее чем  $0^m01$ , что по сравнению с общим падением чувствительности в  $1^m$  для АЗТ-2 существенно меньше.

## 4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что фотометрические ошибки поля телескопа, в данном случае АЗТ-2, могут в ряде случаев существенно ухудшить точность фотографической фотометрии, однако, знание кривой чувствительности поля телескопа, на котором экспонировались пластинки, позволяет полностью их исключить. Высокоточная фотометрия звезд с помощью синхронно-двухзвездного *UBVR*-фотометра стала возможной при строгом учете изменений чувствительности по полю телескопа АЗТ-14.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Stock, *Astron. Nachr.* **280**, 121 (1951).
2. J. Stock and W. H. Wehlau, *Astron. J.* **61**, 80, (1956).
3. J. Stock and A. D. Williams, В кн.: Методы астрономии, Под ред. Хилтнера. (Москва, 1967; *Astronomical Techniques*, Ed. By W. A. Hiltner, University of Chicago Press, 1962), 345.
4. А. К. Магницкий, *Астрон. циркуляр* 1500, 5 (1987).
5. А. К. Магницкий, *Астрон. циркуляр* 1505, 3 (1987).
6. А. К. Магницкий, *Переменные звезды* **22**, 797 (1988).
7. А. К. Магницкий, *Астрон. циркуляр* 1502, 3 (1987).
8. А. К. Магницкий, *Астрон. журн.* **64**, 1227 (1987).
9. A. T. Young, *Meth. Exp. Phys.* **12**, 103 (1974).
10. А. К. Магницкий, *Письма в Астрон. журн.* **13**, 1080 (1987).

Гос. астрон. ин-т  
имени П.К. Штернберга  
Москва, 119234 Россия

А.К. Магницкий  
А.К. Magnitskij