

**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ  
КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ  
В ПЕРВИЧНОМ ФОКУСЕ 6-м ТЕЛЕСКОПА  
С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СНИМКОВ**

*М. Ф. Шабанов*

Описан метод исследования фотометрической структуры звездных изображений и его первые применения на телескопе. Метод отличается высоким разрешением ( $10^3$ — $10^4$  элементов на изображение звезды) и фотометрической точностью до 1 %, ограничиваемой фотографическими шумами. Представлены фотометрические карты звездных изображений и отмечены их особенности. Кратко рассмотрены возможности применения метода для исследования фотометрических ошибок по полю и качества изображения, формируемого оптикой телескопа и астроклиматом.

A method of investigation of photometrical structure of stellar images and its first applications at the telescope are discussed. This method shows a high resolution ( $10^3$ — $10^4$  elements for a star image) and a photometrical accuracy up to 1 %, limited by photographic noises. Photometrical maps of stellar images are presented and their peculiarities are noted. Possibilities of the method applications for investigations of photometrical errors in the field and an image quality are briefly discussed.

Изучение фотометрической структуры звездных изображений по рабочему полю телескопа необходимо для исследования фотометрических ошибок поля и качества оптики, астроклимата и точности гидирования. Именно качество изображения с учетом диаметра и светосилы телескопа в конечном счете определяют его эффективность. В 24-метровом первичном фокусе БТА качество изображения исследовалось фотоэлектрическим методом, методом Гартмана и путем фотометрии снимков. Сравнительный анализ этих методов с точки зрения исследования оптики дан в работе [1]. Важные результаты по исследованию оптики БТА получены методом Гартмана [2, 3]. Путем обработки снимков первичного фокуса методом эквиденсит исследованы ореолы звезд [4]. Этот метод автор регулярно использовал для контроля качества изображения по рабочему полю БТА. Однако ни один из этих методов не нашел широкого применения для количественного контроля качества изображения по полю.

Для построения детальной фотометрической карты требуется  $10^3$ — $10^4$  независимых отсчетов на изображении звезды, а в случае исследования протяженных ореолов ярких звезд — до  $10^6$  отсчетов [4]. Фотоэлектрический метод и метод Гартмана не обеспечивают такого разрешения. Кроме того, в этих методах каждую звезду надо наблюдать отдельно или перемещать по полю одну звезду, что многократно увеличивает затраты наблюдательного времени и удлиняет обработку. Особенно трудоемка обработка снимков Гартмана. Обработка снимков методом эквиденсит устраняет эти недостатки, но фотометрическая точность не достигает естественного предела, ограничиваемого фотографическими шумами, а затраты труда на фотометрию звездных изображений остаются большими. Только цифровая обработка снимков с применением автоматического микрофотометра АМД-1 [5] позволила успешно начать исследование фотометрической структуры изображений звезд по полю. Введение цифровой обработки потребовало коренного пересмотра методики, начиная от вы-

бора фотоэмульсий для наблюдений до предоставления результатов обработки в удобном виде.

**Выбор фотоэмульсии и объектов для съемки.** Цифровая обработка снимков позволяет достичь предела разрешения фотоэмульсии и естественного предела фотометрической точности, устанавливаемого фотографическими шумами. По этим причинам нужны фотоэмульсии с высоким разрешением и низким уровнем шумов. Среди используемых в астрономии фотоэмульсий лучшей по этим параметрам является фотоэмульсия фирмы «Кодак» (США) типа 2415 [6]. Из отечественных фотоматериалов лучшей является фотоэмульсия Микрат-300. Высокоразрешающие астрофотоэмульсии Кодак 111aJ, 111aF и советские астроэмульсии серии «РП» занимают промежуточное положение. Худшими являются наиболее употребительные высокочувствительные астрофотоэмульсии Кодак 103aO, 103aF и другие советские астроэмульсии серии «у» (см. подробнее характеристики фотоэмульсий [6, 7]).

Фотометрия по снимкам БТА существенно отличается от таковой для короткофокусных телескопов Шмидта, где структура звездного изображения определяется разрешением оптики телескопа и фотоэмульсии [8]. На БТА диаметр звездного изображения определяется астроклиматом [9]. При отличном состоянии атмосферы над БТА диаметр звездного изображения — около  $1''.0$  ( $0.12$  мм). На снимке это соответствует предельной пространственной частоте менее 5 периодов на 1 мм. На этой частоте спад частотно-контрастной характеристики астрофотоэмульсий — не более 3—5 % [7] и ограниченность разрешения их не может существенно влиять на фотометрическую структуру звезды. Благодаря этому для исследования качества изображения можно использовать и снимки на высокочувствительных фотоэмульсиях, получаемых в плановых наблюдениях на БТА. Однако фотометрическая точность на них будет в 3—4 раза хуже, чем для снимков, получаемых на фотоэмульсии типа 2415.

Удобными объектами являются рассеянные звездные скопления, где изображения звезд равномерно покрывают поле снимка. Оптимальная длительность экспозиции на БТА — 1—3 мин. При этом на линейном участке характеристической кривой фотоэмульсии регистрируются звезды  $11^m$ — $17^m$  для высококонтрастных фотоэмульсий и  $12^m$ — $19^m$  для высокочувствительных фотоэмульсий. Мы часто использовали и шаровые скопления, но в их центральной части фотометрия усложняется из-за наложения звездных изображений. Число объектов должно быть минимальным, тогда координаты звезд выбранного объекта измеряются по снимку один раз вручную, а для других снимков того же объекта наведение осуществляется автоматически по координатам. Установлено, что поиск звезд по новому объекту вдвое удлиняет время считывания изображения звезды — с 2—3 до 5—6 мин.

Измеряются непередежанные изображения звезд, где оптическая плотность  $D$  в центре изображения не более чем на  $(2 \div 2.5) D$  выше фоновой. Оптимальная плотность фона от  $0.6 D$  до  $1.2 D$  упрощает калибровку за счет работы на линейном участке характеристической кривой. При такой плотности фона и коротких экспозициях можно проводить наблюдения в сумеречное время и в полнолуние, используя широкий диапазон чувствительности астрофотоэмульсий. Линейный участок характеристических кривых астрофотоэмульсий простирается до  $(4.0 \div 5.0) D$  [6], что обеспечивает оптимальную фотометрию для звезд, яркость которых превосходит фоновую на  $2^m$ — $3^m$ . Лишь для исследования протяженных ореолов необходимы самые яркие звезды, низкий уровень фона и длинные экспозиции (14).

**Считывание фотоизображения и программа обработки.** Изображение звезды представляется в ЭВМ прямоугольной матрицей чисел размером от  $64 \times 64$  до  $256 \times 256$  отсчетов. Строка изображения на снимке соответствует строке матрицы. Координаты каждого отсчета на изображении звезды определяются его номером в строке и номером строки, учитывая, что расстояние между отсчетами и между строками задано. Каждому отсчету на снимке соответствует прямоугольный участок изображения — элемент. Разбиение изображения звезды на элементы выполняется так, чтобы размер элемента был не больше предельного разрешения фотоэмульсии. Для фотоэмульсии 2415 это  $3 \times 3$  мкм (микрона), а для высокочувствительных фотоэмульсий — до  $10 \times 10$  мкм [6]. АД-1 не

обеспечивает высокоточную фотометрию для элемента меньше чем  $10 \times 10$  мкм. Поэтому изображение на фотопленке также считается элементом  $10 \times 10$  мкм с шагом между отсчетами 5 мкм. При этом элементы, соответствующие соседним отсчетам, перекрываются. Минимальный размер деталей на изображении звезды обычно 15—20 мкм. Шаг квантования фотографической плотности выбирается в 2—3 раза меньше, чем величина фотографического шума для заданного размера элемента. На АМД-1 установлен шаг квантования  $0.01 D$  в диапазоне от 0.01 до  $5.12 D$ , что позволяет выполнить это условие даже для фотопленки 2415 при размере элемента не более  $10 \times 10$  мкм.

Используя опыт работы с программами А. Ф. Назаренко для ЭВМ СМ-4 [5], автор написал программу обработки на фортране для ЭВМ ЕС-1035. Это позволило непосредственно получать распределение освещенности и энергии в изображении звезды и детальные фотометрические карты, используя мощную ЭВМ и комплект графических программ «Графор» [10]. Ускоряются измерения на АМД-1 с записью на магнитную ленту. Обработка изображений ведется в пакетном режиме с затратой 10—20 с машинного времени на звезду.

Результаты обработки представляются в виде символьной карты (рис. 1) и распределения освещенности и энергии в цифровом и графическом виде для каждой звезды.

Для каждого снимка представляется изофотометрическая карта (рис. 2), где расположение звезд такое же, как на снимке, а масштаб для изображения звезды увеличивается более чем в 10 раз (на рис. 2 он показан отрезком  $5''$ ). Благодаря этому можно представлять подробные фотометрические карты с заданным числом уровней, но изображения близко расположенных звезд могут пересекаться.

**Фотометрическая и координатная точность.** Естественный предел точности фотометрических и координатных измерений по снимкам ставят мелкомасштабные шумы зернистости фотослоя (микрошумы) и крупномасштабные флуктуации фотографической плотности (макрошумы). Установлено, что с точностью до шумов изоденсам изображения соответствуют изоденсы — линии равной плотности на снимке. Микрошумы превращают изоденсы в размытые полосы, а макрошумы вызывают отклонения изоденс от изофот [11]. Полуширина полосы размытия определяется формулой

$$\sigma_l = \frac{K \sigma_D}{\Delta D / \Delta l},$$

где  $\sigma_D$  — величина микрошума в шкале плотностей;  $\Delta D / \Delta l$  — градиент измерения плотности поперек изофоты;  $K$  — коэффициент вероятности обнаружения.

Аналогичной формулой описывается и среднеквадратичная величина отклонений изоденс от изофот, с той лишь разницей, что величина микрошумов заменяется величиной макрошумов (см. подробнее [11]). Установлено, что хорошо разделяющиеся изоденсы строятся с интервалом в  $3\sigma_D$  ( $K=3$ ), при меньших  $K$  полосы соседних изоденс сливаются и становятся неразделимыми. Величина микрошумов составляет  $(0.02 \div 0.03) D$  для фотопленки типа 2415 и  $(0.06 \div 0.09) D$  для высокочувствительных фотопластинок при  $D=1.0$  и элементе  $10 \times 10$  мкм. Таким образом, для изображений звезд, центральная плотность которых превышает фоновую на  $2.0 D$ , можно построить от 20 до 30 изоденс на фотопленке и 7—10 на высокочувствительных фотопластинках. Для слабых звезд, плотность изображений которых меньше отличается от фоновой, число разрешающихся изоденс уменьшается до 2—3 на фотопластинках. Расстояние между изоденсами равно от 5 до 15 мкм на фотопленке и от 15 до 50 мкм на фотопластинках.

Размытие и искривление изоденс особенно хорошо заметно на рис. 1 для уровней, близких к фону (символы «1» и «.»), где градиент изменения плотности мал. Программа построения изолиний в комплекте «Графор» сглаживает изоденсы. Но отклонения изоденс от изофот из-за макрошумов хорошо прослеживаются для всех звезд на уровнях, близких к фону (рис. 2). За счет подавления шумов можно уменьшить влияние микрошумов в 2—3 раза и сгладить

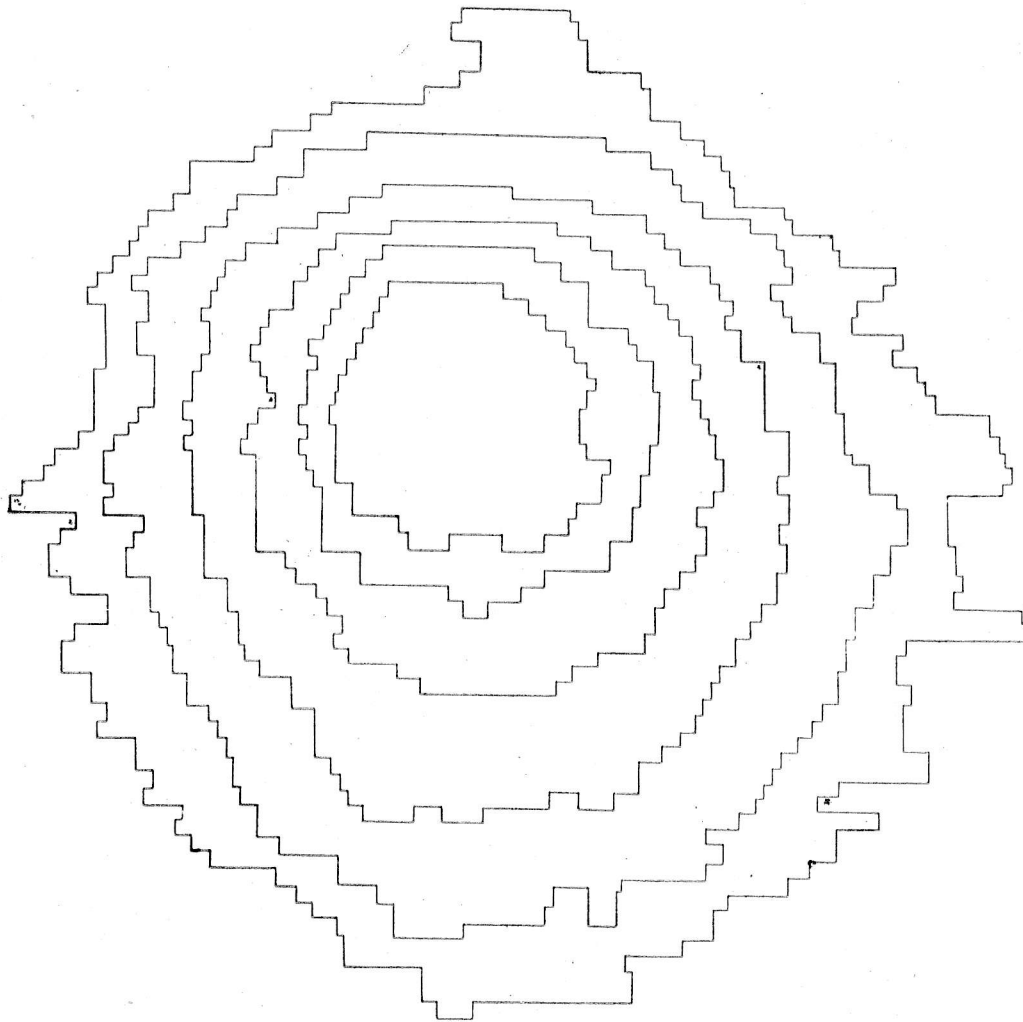
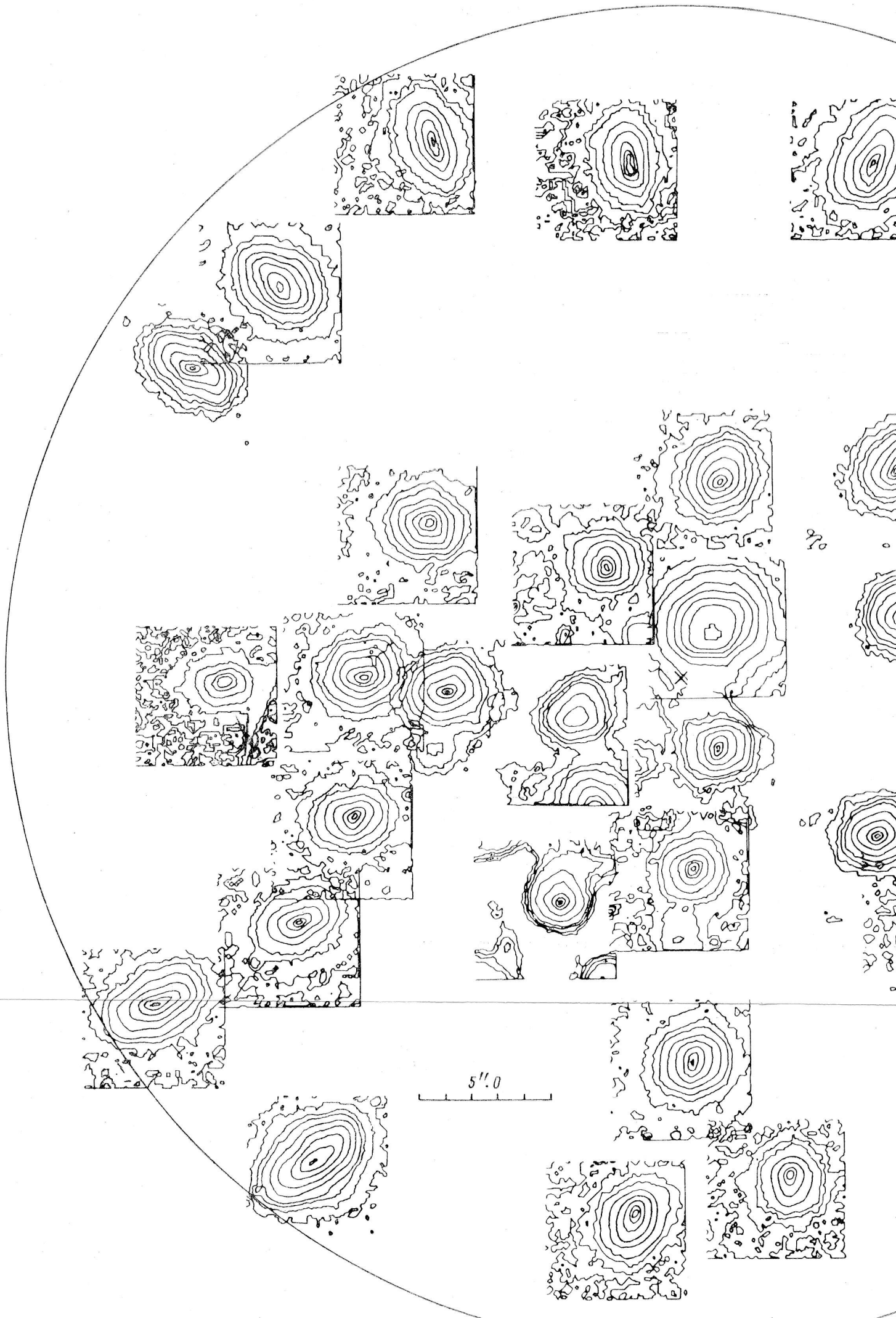
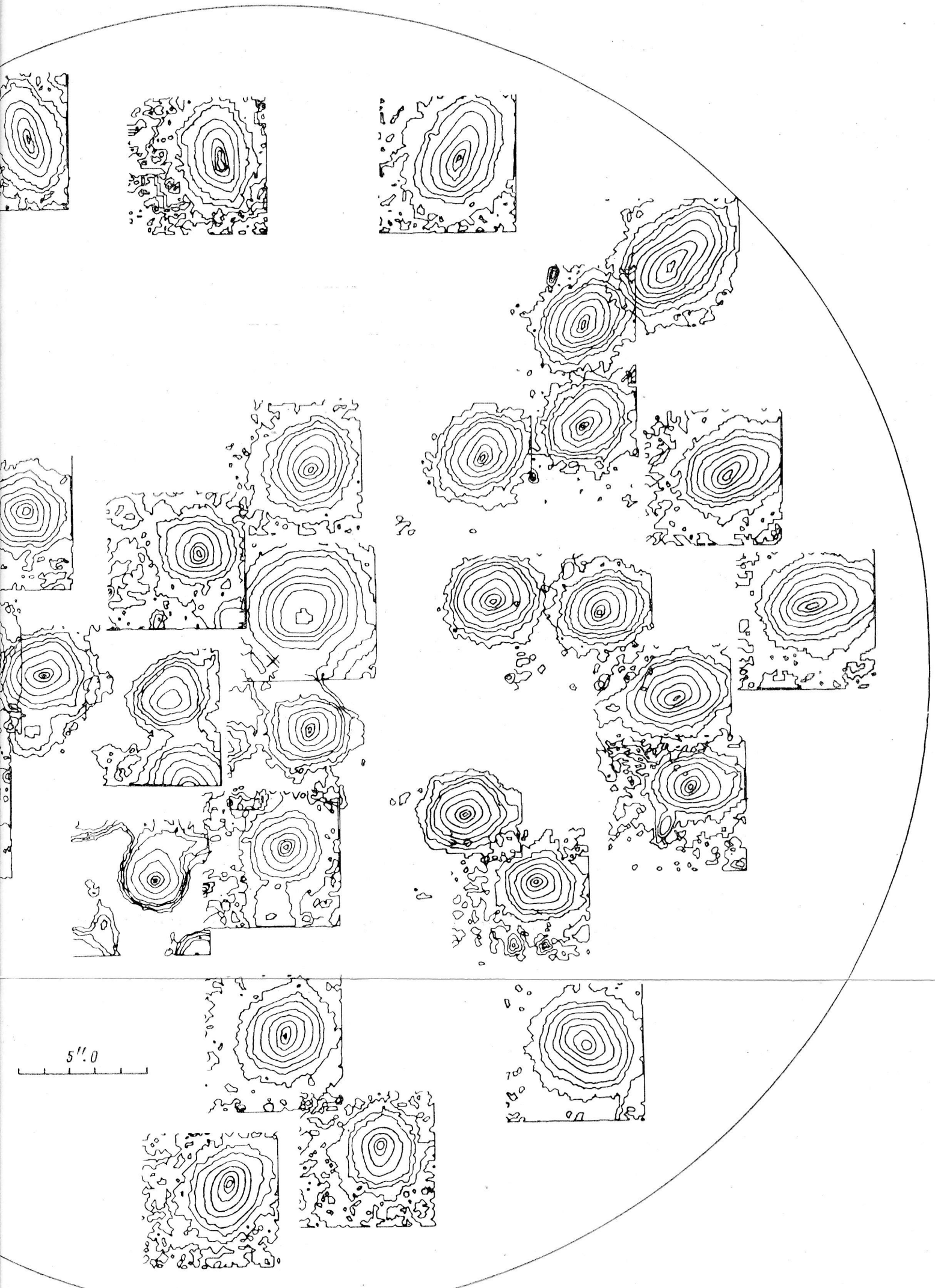


Рис. 1. Исофотометрическая карта звезды на краю поля по снимку без линзового корректора.





изоденсы. Автор использовал двумерный симметричный фильтр из  $3 \times 3$  или  $5 \times 5$  отсчетов с ростом весовых коэффициентов от центра к краю (описание методики фильтрации см. в [5]). Применение фильтра-маски размером более чем  $5 \times 5$  отсчетов позволяет более эффективно подавлять мелкомасштабные флуктуации, но теряется разрешение и искажаются распределения освещенности и энергии для центральной части изображения звезды. Использование фильтра-маски размером до  $30 \times 30$  мкм позволяет выделить изофоты, отличающиеся от фона (плотность фона  $1.0 D$ ) до  $0.5-1\%$  на фотопленке типа 2415 и до  $1.5-2.0\%$  на высокочувствительных фотопластинках. Так, для снимка на фотопластинках ZU-21 ближайшая к фону изофота (рис. 1, обозначена точками) отличается от фона на  $2\%$ , а следующая — на  $5\%$ . Для снимка на фотопленке 2415 (рис. 2) первые изофоты для всех звезд отличаются от фона на  $1\%$ , а вторые — на  $3\%$ . Эффективного подавления крупномасштабных флуктуаций, хорошо заметных на описанных изофотах, можно достичь только путем наложения и суммирования нескольких звездных изображений. Этот резерв повышения точности автором пока не использовался.

При определении уровней изофот возможны еще ошибки калибровки. Автором использовались клины с числом ступеней от 10 до 30. При таком числе ступеней нетрудно построить в ЭВМ характеристические кривые с точностью до  $1\%$ . Но из-за крупномасштабных шумов плотности ступеней измеряются с точностью до  $\pm 1\%$  на фотопленке и  $\pm 2\%$  на фотопластинках для уровня  $D=1.0$ . Это и вносит основную ошибку при определении уровня изофот и распределении освещенности и энергии в изображении звезды.

**Первые результаты применения метода.** Одно из важнейших приложений метода — исследование фотометрических ошибок по полю и их коррекция в процессе цифровой обработки. Измерения нескольких снимков, полученных автором и в последних наблюдениях Н. А. Тихоновым и И. Д. Караченцевым, показали сложную и изменчивую фотометрическую структуру звезд по полю. Она зависит от астроклимата, состояния оптики, положения звезды на снимке и ее яркости. Причем в разных радиальных направлениях зависимость фотометрической структуры звезды от расстояния ее от центра снимка различна. На рис. 2 представлена фотометрическая карта по одному из последних снимков, полученному Н. А. Тихоновым на фотопленке 2415 с линзовым корректором поля. Уже из просмотра карты видно, что фотометрия звезд по заданной изофоте или с помощью приис-фотометра будет содержать систематические ошибки.

Для учета фотометрических ошибок по калибровочному снимку строится зависимость звездная величина — интеграл почернения звезды для центральных звезд и по полю. Так получается карта поправок, которую можно использовать для снимков одной ночи, полученных на одной фотоэмульсии с одинаковым проявлением и очувствлением при небольших изменениях астроклимата и терморегима телескопа. Карта поправок так же изменчива, как и фотометрическая структура звезд по полю. Хуже того, многие снимки имеют ошибки фокусировки и гидирования, а измеряемые снимки часто отличаются от калибровочного по уровню фона, длительности экспозиции, условиям проявления и очувствления. Построение карты поправок с учетом всех существенных эффектов является самостоятельной задачей, выходящей за рамки настоящей работы.

Описываемый метод может использоваться и для исследования оптики телескопа и астроклимата. Благодаря высокому разрешению на фотопленке 2415 получаются изофоты диаметром  $0.15-0.2$  для центра изображения звезды (рис. 2). Любые деформации изображения звезды с амплитудой более  $0.05$  легко обнаруживаются по изофотам. По фотометрической структуре искажений звездных изображений можно определить причину, вызывающую эти искажения. Так, по удлинению изофот и сглаживанию вершины распределения освещенности на некоторых снимках обнаружили ошибки гидирования и ошибки установки фокуса. Оптические aberrации приводят к растяжению звезд, как правило симметричному относительно центра снимка. Это видно и на рис. 2, где растяжение изофот нелинейно возрастает от центра снимка к краю. Термодеформации оптики телескопа и наклоны оптических элементов относительно оптической оси обычно приводят к несимметричным искажениям изображений звезд по полю.

Распределение освещенностей для центральных звезд нескольких снимков без линзового корректора оказалось гауссовым, что согласуется с результатами работы [12] для малых телескопов. Если это подтвердится на большом количестве снимков БТА, то имеется возможность четко разделять влияние атмосферы и оптики телескопа, сравнивая измеренные распределения освещенности с гауссовыми. Так, для нескольких снимков найдено, что введение линзового корректора приводит к сглаживанию вершины распределения освещенности в изображении звезды и соответственно к ухудшению обнаружения слабых звезд на уровне фона. Особенно ценные результаты дает сравнение измерений с расчетной фотометрической структурой изображения звезды, получаемой методом точечных диаграмм с числом точек более  $10^3$ . Подобное сравнение сделано для снимков с линзовым корректором и выявило ряд отличий измеренной структуры изображения звезды от расчетной.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам САО Н. А. Тихонову и И. Д. Караченцеву за предоставление снимков и ценные замечания, Т. В. Дорошенко — за помощь в освоении программ «Графор» на ЕС-1035.

#### Литература

1. Методы исследования астрономической оптики. 1. Анализ комплекса методов / Г. М. Бескин, А. М. Богудлов, Э. А. Витриченко и др. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1975, 7, с. 163—166.
2. Коровяковский Ю. П. Применение метода Гартмана для контроля качества поверхности зеркала БТА. — *Опт.-мех. пром-сть*, 1977, № 11, с. 10—14.
3. Снежко Л. И. Анализ основ метода Гартмана. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1981, 14, с. 3—13.
4. Тихонов Н. А., Шабанов М. Ф. Ореолы звезд в первичном фокусе 6-м телескопа. — *Вестн. Харьк. ун-та*, 1983, № 247, с. 51—54.
5. Назаренко А. Ф. Автоматизированная система обработки панорамных изображений. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1981, 13, с. 98—101.
6. Шабанов М. Ф. Самые эффективные астрономические фотоэмульсии после очувствления в водороде. — *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 1985, 20.
7. Kodak Plates and Films for Science and Industry. USA, Rochester, 1973, Catalog P 315. 85 p.
8. Edwards A. C. The determination and calibration of photographic stellar image profiles. — *Mon. Not. Astr. Soc.*, 1984, 207, p. 517—531.
9. Шабанов М. Ф., Тихонов Н. А. Информативность снимков первичного фокуса БТА. — *Астрон. циркуляр*, 1980, № 1085, с. 5—7.
10. Белковский Ю. М., Михайлова Т. Н., Минаков С. Т. — *Графор: комплексе графических программ на фортране*. — *Препринт ИИМ*, 1972, № 41. 100 с.
11. Шабанов М. Ф. Цифровые и электронно-аналоговые методы изофотометрической обработки астрономических фотографий. — *Астрон. журн.*, 1975, 52, с. 404—414.
12. Двинский М. Л., Колчинский И. Г. О законе распределения флуктуаций направления световых лучей в телескопах. — *Астрометрия и астрофизика*, 1972, № 7, с. 115—122.

Поступила в редакцию 16.05.85