

О природе калибровочной кривой в звездной фотографической фотометрии

Симеон Владимиров

I. Средняя квадратическая ошибка звездной величины, определяемой измерением фотографического изображения звезды (ФИЗ) ирисовым фотометром достигает согласно Холопову [1] значения $\pm 0^m,05$. Такая ошибка является слишком большой для многих современных исследований. Из-за нее фотографический метод совершенно беспомощен при изучении переменности блеска звезд с небольшой амплитудой, например, переменность типа δ Sct. Большая ошибка фотографического метода обязана не фотометрической аппаратуре, а шумам самой фотоэмульсии. Нетрудно убедиться в этом, имея в виду среднюю квадратическую ошибку фотографической фотометрии протяженных объектов. Ошибка эта составляет примерно $\pm 5\%$, что совпадает с ошибкой звездной фотографической фотометрии. Поэтому не лишено смысла общее убеждение, что уже некуда повышать точность фотографической фотометрии звезд. Дальше будет показано, что есть причины не разделять это убеждение.

II. У ФИЗ имеются некоторые особенности по отношению ко всем остальным изображениям.

1. Оптическое изображение звезды (ОИЗ), которое вызывает ФИЗ, является симметричным изображением в случае прецизионного гидирования [2]. Совсем небольшую деформацию вызывает атмосферная дисперсия, но она может быть учтена, если у нас есть хотя бы грубая информация о цвете и блеске звезды [3]. Конечно, речь идет о ОИЗ, интегрированном по достаточно большому интервалу времени. Моментальное ОИЗ, как показал Купревич [4], асимметрическое из-за флюктуации коэффициента преломления атмосферы во времени. В достаточно хорошем приближении мы можем утверждать, что изофоты ОИЗ являются окружностями. Однако эквиденситы ФИЗ асимметричные, как это видно из некоторых полученных нами эквиденсит, показанных на рис. 1. По-видимому, асимметрия эквиденсит обязана фотографическим шумам, поскольку асимметрия ОИЗ, тем более такая, какая видна на рис. 1, не существует.

2. У ФИЗ небольшие размеры. Они всего на порядок до двух больше размеров фотографического зерна. Поэтому чувствительность фотоэмульсии может быть интерпретирована в звездной фотографической фотометрии не параметрами характеристической кривой, а посредством

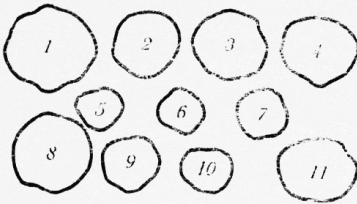


Рис. 1

числа зерен на единице площади, отнесенного к единице освещенности в каждой точке эмульсии. Большое почернение в ядре ФИЗ не может изменить этот смысл чувствительности. Мы должны понимать это так: пусть у нас два совершенно одинаковых ФИЗ. Они попали в разные районы эмульсии. В этих районах разные чувствительности и, соответственно, в двух ФИЗ различное количество серебра, из-за чего получают различные показания фотометра. Но обстоятельства могут быть и

иные: в одном из полученных ФИЗ у ядра несколько меньше зерен за счет периферии, а в другом — наоборот, хотя общая чувствительность в районах двух ФИЗ одинакова, а также одинаковы и остальные характеристики эмульсии. Фотометр, однако, покажет большее почернение для первого ФИЗ, потому что в нем эффект перекрытия зерен будет несколько слабее. В этом состоит и влияние зернистости как шума при определении звездной величины. Но это влияние может быть интерпретировано и как микрофлюктуации чувствительности на участке ФИЗ. Все это показывает, что для целей звездной фотографической фотометрии необходима замена понятия „характеристическая кривая эмульсии“ понятием „совокупность характеристических кривых в окрестности каждой точки эмульсии“. „Интегральная“ фотометрия, в которой делают калибровки на основании информации только для интегрального коэффициента поглощения в районе ФИЗ, не может дать нам возможности учесть эти особенности ФИЗ. Они показывают, что фотографические шумы могут быть „видны“ на изображении каждой звезды. Следовательно, у нас есть еще не использованные параметры ФИЗ, определение которых, быть, может, позволило бы получить большую точность. Но для этого необходим подход к задачам фотометрирования, качественно различный по сравнению с методом определения оптической плотности в районе ФИЗ посредством любого микрофотометра.

Для того, чтобы лучше выяснить идею, необходимо сделать некоторые теоретические рассуждения.

III. Полная энергия, которая ОИЗ отдает фотоэмульсии, является величиной $\varphi = \int_0^{\tau} \int_A \int E(x,y,t) dx dy dt$, где $E(x,y,t)$ — распределение освещенности на площадке A , занятой ОИЗ на фокальной поверхности во время выдержки τ .

Величина φ недоступна для прямого измерения, поскольку фотоэмульсия является нелинейным приемником. С помощью микрофотометра в действительности измеряют величину $D = \lg \int_A T(x,y) dx dy$, где $T(x,y)$ — распределение коэффициента поглощения на площадке A , которая занята ФИЗ. При этом мы предположили, что площадка, занятая

ОИЗ, совпадает с площадкой, занятой ФИЗ. В действительности, это только приближение, достаточное для дальнейших наших рассуждений. Пока можно принять, что под A подразумевается бóльшая из двух площадок.

В дальнейших рассуждениях под характеристической кривой будем понимать зависимость T от $H = \int_0^x E(x,y,t)dt$, а не зависимость D от $\lg H$, как обычно бывает в фотографии. Причина для этого чисто формальная — такой подход более простой и не изменит суть явлений.

Если характеристическая кривая одна и та же для всех точек эмульсии, то ее аналитически можно представить в следующем виде:

$$(1) \quad T(x,y) = H(x,y) \cdot S[H(x,y)].$$

Функция $S(H)$ выражает отклонение зависимости между T и H от линейности, как и ее смещение от начала координат, т. е. в этой функции содержится полная информация о характеристической кривой. Если характеристики фотоэмульсии в каждой точке ее поверхности одинаковы, то значение функции S зависит от x и y только посредством H . Но в реальной фотоэмульсии это не так. Из-за флуктуации характеристик функции S , ее значение зависит от x и y не только посредством H , но и непосредственно. Следовательно, для реальной фотоэмульсии (1) превращается в

$$(2) \quad T(x,y) = H(x,y) \cdot S[x,y, H(x,y)].$$

Имея в виду природу фотоэмульсии, мы можем утверждать, что S является случайной функцией x и y .

Аналитический вид этих основных зависимостей в фотографической фотометрии поможет нам обсудить взаимную связь между ОИЗ и ФИЗ.

Уравнение изофоты является, очевидно,

$$(3) \quad h = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx} = 0, \quad (H = H_0).$$

Уравнение эквиденситы имеет следующий вид:

$$(4) \quad \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx} = 0, \quad (T = T_0 = H_0 \cdot S(H_0)).$$

Из (2) и (4) получаем уравнение эквиденситы в виде

$$(5) \quad \left[S + H \frac{\partial S}{\partial H} \right] \cdot h + H \cdot \sigma = 0,$$

$$\text{где } \sigma = \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx}.$$

Уравнение (5) выражает соответствие между эквиденситами ФИЗ и изофотами ОИЗ. Нетрудно сообразить, что параметр $M = \left| \frac{h}{\sigma} \right|$ является мерой этого соответствия, т. е. мерой информативности фотоэмульсии. Его значение можно определить из (5):

$$(6) \quad \frac{1}{M} = \left| \frac{S}{H} + \frac{\partial S}{\partial H} \right|.$$

Полученные уравнения вызывают следующие выводы.

1. Флюктуации характеристик фотоэмульсии сказываются по-разному на ее информативности в разных точках характеристической кривой. Нетрудно увидеть это после преобразования (6) при помощи (1) и $D = \gamma g T$ для средней характеристической кривой:

$$(6') \quad M(H) = \left| \frac{dD}{d \lg H} \cdot \frac{1}{H^2} \right|^{-1} \cdot 10^{-D}.$$

Это уравнение представляет некоторый практический интерес. Во-первых, в случае фотографирования протяженных объектов, можно получить $M(H)$ для определенного режима проявления и можно определить оптимальную выдержку для получения определенного района объекта, имея в виду его освещенности, для получения максимальной информативности фотоэмульсии для него. Во-вторых, (6') определяет предел контраста эмульсий для звездных снимков, которые фотометрируются по визуальному методу Scheiner [7], основанный на измерении видимого диаметра ФИЗ. Очевидно, для того, чтобы определить лучше „контур“ ФИЗ, необходимо иметь максимальную информативность для небольших плотностей линейной части характеристической кривой. Имея в виду, что для нее выполнено уравнение $D = \gamma \lg \frac{H}{H_0}$, нетрудно увидеть, что $M \sim H^{2-\gamma}$, т. е., для того, чтобы информативность увеличивалась с уменьшением H по линейной части ХК, необходимо делать копию снимка на фотоэмульсии с контрастом $\gamma > 2$.

2. Уравнение изофоты (3) и уравнение эквиденситы (5) удовлетворяются одновременно, когда

$$(7) \quad \sigma = 0,$$

т. е., когда в районе ФИЗ функция S зависит только от H , или, что то же самое, нет флюктуации свойств фотоэмульсии.

В общем случае (7) не выполнено. Из этого следует, что оптическая плотность D , из-за своей природы, не дает возможность получить точную калибровку при определении звездной величины. Еще Van Couter [5] сомневался в оптимальности выбора оптической плотности ФИЗ в качестве калибрующего параметра при определении звездной величины.

Уравнение (7), однако, выполнено не только в случае постоянства свойств фотоэмульсии в каждой точке. Если размеры флюктуаций больше размеров ФИЗ, то уравнение (7) будет выполнено на протяжении некоторых ФИЗ на пластинке. Каждое ФИЗ находилось бы в районе фотоэмульсии, у которого будет свой уровень чувствительности и своя характеристическая кривая. Но в таком случае для каждого ФИЗ будет своя зависимость между эквиденситами и изофотами, т. е. различные ФИЗ нельзя сравнивать, если речь идет о калибровке звездной величины по параметру D . Параметр D , однако, может служить калибрующим параметром для тех ФИЗ, которые попали в районы фотоэмульсии с одинаковыми характеристическими кривыми. Следовательно, калибровочная кривая, которую обычно используют, является суперпозицией калибровочных кривых различных групп ФИЗ, полученных в районах фотоэмульсии с одинаковыми характеристическими кривыми.

В принципе существует возможность выделить группы ФИЗ. Негативно трудно убедиться в этом, исходя из следующих соображений: радиальный градиент освещенности ОИЗ зависит от многих факторов, которые можно объединить в две группы: факторы, зависящие от аппаратуры и атмосферы, т. е. одинаковые для всех ФИЗ, и факторы, зависящие от звезды. Вторая группа состоит всего из одного фактора — это цвет звезды. В исследовании зависимости морфологии ФИЗ от цвета звезды [6] мы изучили 18 параметров морфологии от цвета. Пятнадцать из них показали неплохую зависимость от цвета. Остальные три, которые не зависели от цвета, оказались теми и только теми параметрами, у которых нет связи с морфологией ФИЗ в районах небольших плотностей почернения. Следовательно, морфология ФИЗ в районе больших плотностей не зависит от цвета, а только от аппаратурных и атмосферных факторов, одинаковых для всех звезд. Поэтому мы можем предположить, что градиент освещенности вблизи ядра всех ОИЗ должен быть одним и тем же.

В случае, когда размеры районов фотоэмульсии, внутри которых свойства фотоэмульсии постоянны, больше размеров ФИЗ, изофоты каждого ОИЗ вызывают соответствующие по форме эквиденситы ФИЗ. Возьмем две эквиденситы, соответствующие большим плотностям вблизи ядер ФИЗ и соответствующие двум плотностям, одинаковым для всех ФИЗ на пластинке. Если у нас идеальная фотоэмульсия, то в каждой ее точке характеристическая кривая одна и та же. В таком случае разница диаметров двух эквиденсит будет одна и та же для всех ФИЗ, ибо радиальный градиент освещенности в районе соответствующих изофот тоже одинаков. В реальном случае, когда разные ФИЗ лежат в районах фотоэмульсии с различными характеристическими кривыми, эта разница будет различной для разных ФИЗ. Следовательно, все ФИЗ с одинаковой разницей диаметров двух эквиденсит являются ФИЗ, попавшие в районы фотоэмульсии с одинаковыми характеристическими кривыми, или, по крайней мере, с одной и той же контрастностью. Таким образом, используя эту разницу в качестве параметра, селективирующего районы фотоэмульсии с одинаковыми характеристическими кривыми, на самом деле мы использовали бы часть ОИЗ в качестве испытательного фотометрического клина, экспонированного в районе каждого ФИЗ.

Соображения эти показывают, что не было бы лишено смысла следующее предположение: изучая морфологию ФИЗ, возможно превратить в измеряемые величины некоторые флюктуации характеристик фотоэмульсии, являющиеся существенной составной частью фотографических шумов.

3. Кроме ФИЗ, на протяжении которых характеристическая кривая фотоэмульсии остается постоянной, несомненно существуют на каждой пластинке ФИЗ, попавшие в районы эмульсии, в которых характеристическая кривая изменяется от точки к точке на протяжении изображения. Эквиденситы таких изображений будут вытянутыми. Они не соответствуют изофотам ОИЗ. Поэтому мы должны ожидать на одной и той же пластинке ФИЗ с двумя типами морфологии: симметричной — для ФИЗ, попавших в районы экстремумов или постоянного значения характеристик фотоэмульсии, и асимметричной — для ФИЗ, попавших в районы, в которых характеристики заметно изменяются от точки к точке. Конечно, „симметричность“ и „асимметричность“ эквиденситы относятся к

соответствующей ей „средней кривой“, ибо из-за зернистости у эквиденситы всегда неправильная форма. К первому типу морфологии возможно отнести эквиденситы № 1, 5, 8 и 9 на рис. 1, а ко второму типу — эквиденситы № 2, 3, 10. При этом между двумя типами морфологии не

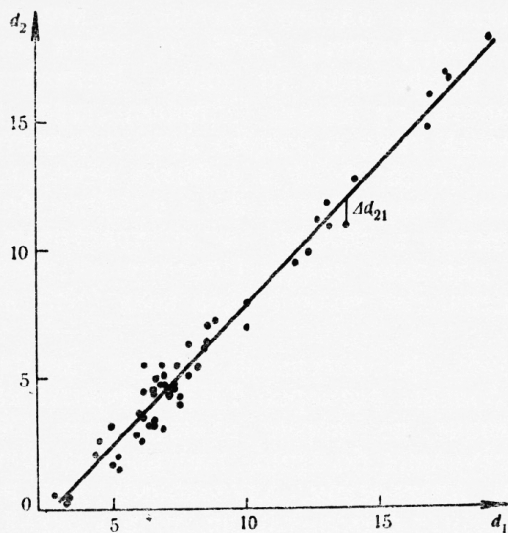


Рис. 2

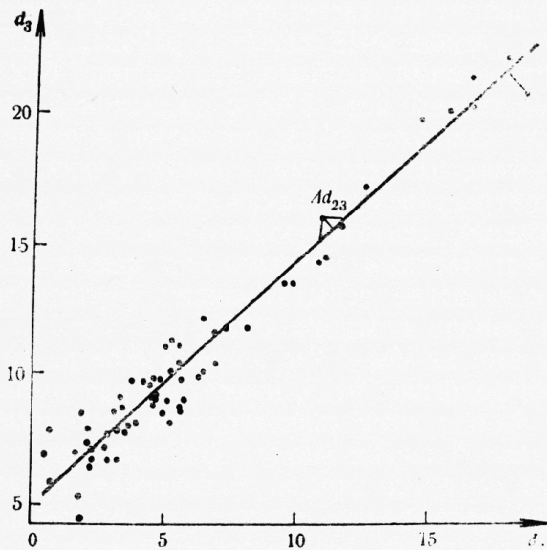


Рис. 3

должно быть резкой границы. Промежуточными могли быть эквиденситы № 4, 6, 7 и 10. Во всяком случае, если наши рассуждения правильны, мы могли бы ожидать бимодальность некоторых параметров, характеризующих морфологию ФИЗ.

Для проверки второго и третьего вывода были использованы 220 ФИЗ, полученных на 4 пластинках с эмульсией ZU-2: пластинка A2151 из стеклотеки ГАИШ, снятая астрографом 400/2000 в Крыму в январе 1961 г., и пластинки В5, В7, В9, снятые автором в марте 1972 г. телескопом АЗТ-5 (максим. диаметр 500/2000 телескоп) в южной станции ГАИШ в Крыму. На пластинках A2151 и В7 снято скопление М 67, а на В5 и В9 — скопление NGC 188. Гидрирование при получении пластинок A2151, В7 и В9 хорошее. ФИЗ на пластинке В5 систематически вытянутые, и мы брали их только для того, чтобы проверить влияние ошибок гидрирования на результаты. Оказалось, что результаты исследования на пластинке В5 совпадают по своему характеру с результатами, полученными для других пластинок, но со значительно большим разбросом.

Были сделаны измерения эффективных диаметров трех уровней плотности ФИЗ: d_1 , d_2 , d_3 (d_1 соответствует самой большой, а d_3 — самой меньшей из трех плотностей). Три уровня одинаковы для всех ФИЗ данной пластинки, но для разных пластинок, естественно, они различны. Методика измерения описана в [6]. Определение эффективного диаметра, согласно этой методике, делается после измерения площади соответствующей эквиденситы посредством сетки ценой деления 7,25 μ . Допустимая ошибка определения эффективного

диаметра 0,2 дел., или 1,45 μ . Полученные результаты даются дальше в единицах измерительной сетки.

А. Чтобы проверить существование бимодальности распределения морфологии ФИЗ, необходимо найти параметр, указывающий на откло-

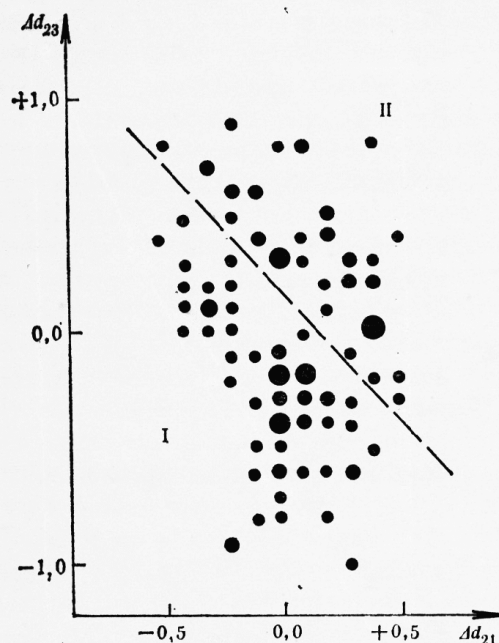


Рис. 4

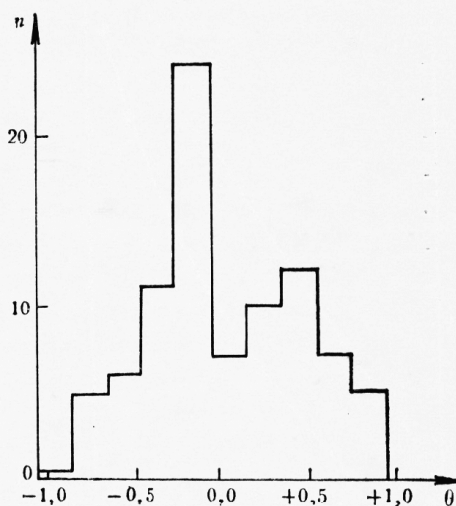


Рис. 5

нение морфологии ФИЗ от „средней“. Такой параметр был получен следующим путем.

Для всех пластинок были исследованы зависимости d_1 от d_2 и d_2 от d_3 . Для пластинки В5 эти зависимости показаны на рис. 2 и 3. Методом наименьших квадратов были определены отклонения от соответствующих линейных зависимостей Δd_{21} и Δd_{23} . На рисунке 4 сопоставлены Δd_{21} на Δd_{23} для пластинки В9. Нетрудно заметить два района повышенной плотности точек. Такой же результат получен для всех пластинок. Посредством поворота координатной системы на разных углах можно показать, что существуют параметры, являющиеся линейными комбинациями Δd_{21} и Δd_{23} , распределение которых бимодально. Среди них есть такой, у которого бимодальность выражена лучше всех. Для пластинки В9 он оказался соответствующим угла поворота 45° и, следовательно, $\theta = \sqrt{2}(\Delta d_{21} + \Delta d_{23})$. Распределение θ показано на рис. 5. Такое же распределение получается для всех пластинок, только θ получается после различных углов поворота координатной системы. Наверное, этот угол зависит от условий проявления и от партии эмульсии. Независимо от этого, бимодальное распределение θ на всех пластинках очевидно. Назовем ФИЗ I типа те ФИЗ на пластинке В9, для которых $\theta \leq 0,0$, а ФИЗ типа II те, для которых $\theta \geq +0,1$.

Экспериментальные результаты вносят, однако, некоторые уточнения в теоретические модели. Населенность двух типов морфологии неодинакова, но одного и того же порядка. Но это означает, что вероятность выполнения условия (7) примерно такая же как и вероятность невыпол-

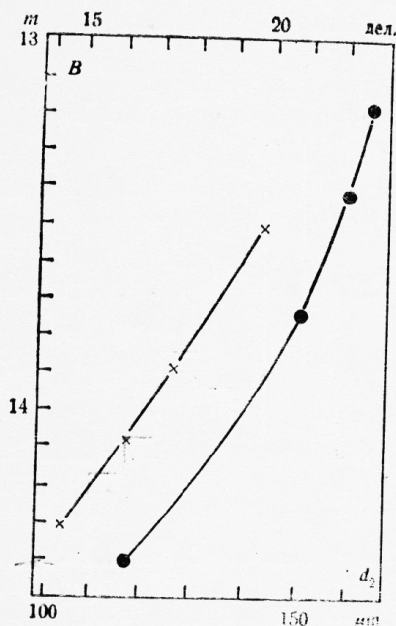


Рис. 6. $x - 1,9 \leq p \leq 2,2$; $\bullet - 2,9 \leq p \leq 3,1$

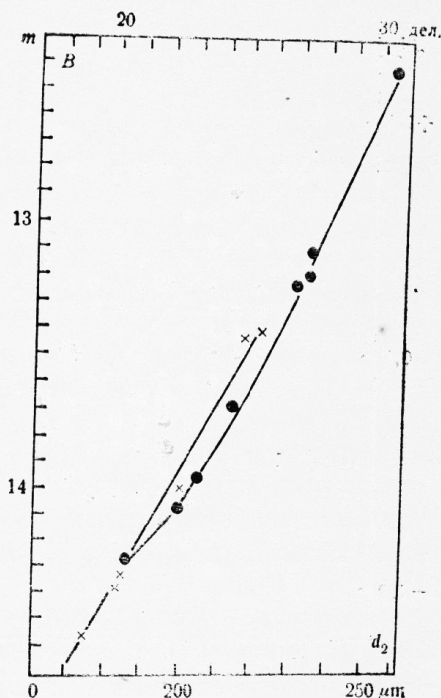


Рис. 7. $x - 2,4 \leq p \leq 2,6$; $\bullet - 2,8 \leq p \leq 2,9$

нения этого условия. Нетрудно осмыслить физически это утверждение: вероятность выполнения условия (7) — это вероятность того, что ФИЗ попало в район экстремума или постоянного значения характеристик фотоэмульсии; вероятность невыполнения условия (7) — это вероятность того, что ФИЗ попало в район изменения характеристик фотоэмульсии от точки к точке. Результаты измерения показывают, что эти две вероятности одного и того же порядка. Следовательно, общая площадь районов экстремумов и постоянства свойств фотоэмульсии примерно такая же, как и общая площадь районов, в которых эти свойства изменяются от точки к точке. С одной стороны, это показывает, что функция S не только случайная, но и непрерывная функция x и y , т. е. мы можем смотреть на эту функцию как на непрерывную функцию пространственного распределения основных характеристик фотоэмульсии. С другой стороны, это показывает, что непрерывность совокупности значений θ реальна физически, а не обязана просто статистическому разбросу. Но непрерывность параметра θ не находится в противоречии с разделением морфологии ФИЗ на два основных типа.

Б. Имея в виду соображения, изложенные в III. 2., в качестве селективирующего параметра был выбран $p = d_2 - d_1$. Мы предположили, согласно этим соображениям, что каждые два ФИЗ с равными значениями

p являются ФИЗ, попавшими в районы фотоэмульсии с одинаковыми характеристическими кривыми. Если это так, то разброс точек на калибровочной кривой, построенной только из ФИЗ с равными значениями p , должен быть значительно меньше разброса, получаемого при построении калибровочной кривой из другой выборки ФИЗ. К тому же мы можем предполагать, что чем больше p , тем меньше контрастность фотоэмульсии в районе ФИЗ. А это должно быть так, потому что „клины“, экспонированные в каждом ФИЗ, одинаковые. Значения B на рис. 6 (пластинка A_{2151}) и рис. 7 (пластинка B_7) взяты из [8]. Из этих рисунков видно, что разброс точек на калибровочных кривых, составленных из ФИЗ с приблизительно равными значениями p , незначительный.

Во время наших исследований мы установили, что калибровочные кривые, построенные отдельно для ФИЗ, принадлежащих к двум типам морфологии, немного различаются — систематически для всех пластинок. Поэтому мы проверили, что может дать двойная селекция посредством параметров θ и p , т. е., селекция не только по контрастности эмульсии, но и по типу морфологии ФИЗ. На рисунке 8 показана зависимость d_2 от B для звезд на пластинке B_9 , для которых $-0,2 \leq \theta \leq -0,1$. Значения B взяты из [9]. Из этой совокупности выделены ФИЗ с приблизительно равными значениями p : группа K1 (крестики) — $1,6 \text{ дел.} \leq p \leq 1,8 \text{ дел.}$; группа K2 (кружки) $1,2 \text{ дел.} \leq p \leq 1,4 \text{ дел.}$; группа K3 (квадратики) — $2,4 \text{ дел.} \leq p \leq 2,2 \text{ дел.}$; точками изображены ФИЗ с другими значениями p , которые не могут быть собраны в узком интервале значений p . Калибровочная кривая, полученная по всем ФИЗ, совпадает с калибровочной кривой для ФИЗ группы K1; однако среднее квадратическое отклонение для всех ФИЗ составляет $\pm 0^m,09$, а только для ФИЗ группы K1 — $\pm 0^m,05$. У ФИЗ групп K2 и K3 свои калибровочные кривые со средними квадратическими отклонениями соответственно $\pm 0^m,04$ и $\pm 0^m,03$.

Все это указывает на справедливость утверждения, что возможно использовать часть ОИЗ в качестве испытательного фотометрического клина и таким образом интерпретировать большую часть фотографических шумов как измеряемых величин. При этом тип морфологии ФИЗ влияет на результаты значительно меньше, чем „длина клина ОИЗ“, в качестве которой выступает параметр p .

IV. Только что приведенные результаты доказывают справедливость наших теоретических рассуждений на основе экспериментальных данных.

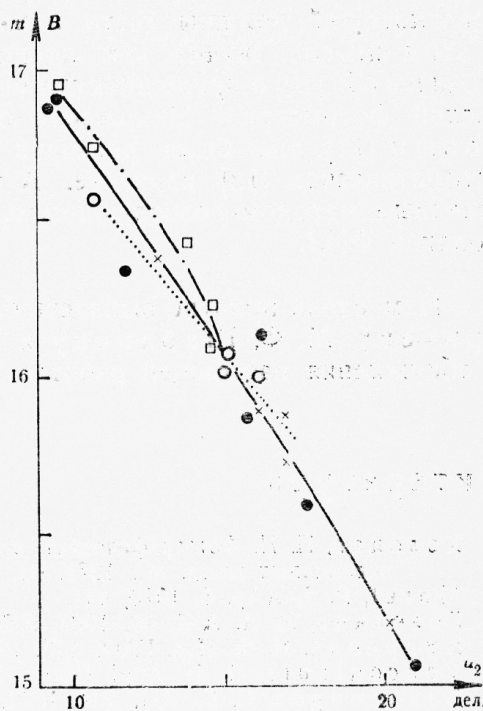


Рис. 8

Но из этого следует, что не лишено смысла обсуждение возможности некоторого совершенствования методов звездной фотографической фотометрии. Наверное, это совершенствование должно выражаться в замене „интегральной“ фотометрии, в основе которой лежат только измерения оптической плотности в районе ФИЗ, фотометрией „параметрической“, в основе которой должны быть и измерения параметров морфологии ФИЗ. В этом смысле звучит как предсказание предположение Брейдо, Ермошиной [10] о приложимости метода эквиденсит в звездной фотографической фотометрии. Независимо от отрицания этой приложимости Жуковым [11], она была доказана как в неавтоматическом [12], так и в автоматическом [13] варианте. А метод эквиденсит является пока единственным методом, позволяющим производить массовые исследования морфологии ФИЗ.

Нам очень приятно выразить благодарность Н. Николову и В. Добричеву, М. Ф. Шабанову и Р. Русеву за критические замечания и обсуждения настоящей работы.

Литература

1. Холопов, П. Н. Фотографическая фотометрия звезд. — В: Методы исследования переменных звезд. М., 1971, 96.
2. Morel, P. J. AAp, 6, 1970, 441.
3. Головина, Л. А. АЖ, 40, 1963, 929.
4. Купревич, Н. Ф. Изв. ГАО, 175, 1964, 144.
5. Vaucouleurs, G. de, Appl. Optics, 7, 1968, 1513.
6. Владимиров, С. Б., АЦ, 734, 1972.
7. Scheiner, J. Die Photographie der Gestirne. Leipzig, 1897.
8. Eggen, O. J., A. R. Sandage. Ap. J., 140, 1964, 130.
9. Sandage, A. R. Ap.J., 135, 1962, 333.
10. Брейдо, И. И., К. П. Ермошина. АЖ, 45, 1968, 865.
11. Жуков, Л. В. АЖ, 46, 1969, 889.
12. Владимиров, С. Б. АЦ, 651, 1971.
13. Царевский, Г. С., А. Я. Хесин, А. В. Никоненко, Б. А. Янсон, И. К. Альен. АЖ, 49, 1972, 204.

On the Nature of the Calibration Curve in Stellar Photographic Photometry

S. Vladimirov

(Summary)

The fluctuations in the photographic emulsion sensitivity cause alterations in the morphology of stellar photographic images. It is shown that the ordinary calibration curve is a superposition of calibration curves for stars of the same morphologies of photographic images. This conclusion is corroborated by the experimental material. A "parametric" photometry is de-

defined as photometry based on the investigation of parameters of the morphology of photographic star images, and not only on the ordinary measurements of the general light absorption in the region of the photographic image.

*Государственный астрономический
институт им. П. К. Штернберга*

*Поступила в августе 1973 г.,
Переработана в апреле 1974 г.,*

*Кафедра астрономии
Софийского университета им. К. Охридского*