

УДК 520.82+520.84,520.876

## Учет атмосферной экстинкции при фотометрии звезд

*В.И. Бурнашев*

НИИ “Крымская Астрофизическая Обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 1 марта 2006 г.

**Аннотация.** Кратко рассмотрены методы учета атмосферной экстинкции при фотометрии звезд, при этом метод Смарта, усовершенствованный В.Б. Никоновым, описан более подробно.

THE CORRECTING STELLAR PHOTOMETRY DATA FOR ATMOSPHERIC EXTINCTION, *by V.I. Burnashev*. The various methods for stellar photometry data correction, from visual to microwave spectral range are considered. The Smarts' method (“the two-stars method”) described in more detail, since it was modified by V.B. Nikonov.

**Ключевые слова:** photometry, stars, atmospheric extinction

---

## 1 Введение

Развитие техники в двадцатом веке сделало доступным для изучения весь спектр электромагнитного излучения с помощью ракет, спутников, баллонов и высотных самолетов. Однако наблюдения с поверхности Земли еще долго не потеряют своего значения, несмотря на связанные с этим трудности и помехи.

В той или иной степени вопрос об учете атмосферной экстинкции затрагивается во многих обзорах, посвященных звездной фотометрии (Страйжис, 1977; Харди, 1962; Чугайнов, 1971; Янг, 1974; Янг и др., 1991, 1994; Никонов, 1976). Несмотря на важность и очевидность учета атмосферной экстинкции для астрофизики, по крайней мере до 50-х годов прошлого века наблюдатели предпочитали пользоваться некоторыми усредненными коэффициентами. В некоторых случаях исследователи вводили в эти коэффициенты поправки, зависящие от времени. В.Б. Никонов одним из первых обратил внимание астрономов на необходимость определения и непрерывного контроля коэффициента прозрачности земной атмосферы в течение всего периода наблюдений. Разработанный им метод нашел широкое применение в фотометрических и спектрофотометрических исследованиях.

До 1945 года, который считается годом рождения радиоастрономии, вся астрономическая информация была получена из сравнительно узкого оптического окна прозрачности (300-1000 нм). Но даже в этом диапазоне значительные помехи в измерения вносят атмосферные газы и пары воды. Уже в ближней инфракрасной области (1-50 мкм) влияние полос атмосферных газов усиливается настолько, что кривые реакции инфракрасных систем определяются “окнами” прозрачности между теллурическими полосами. Практически до предела сантиметрового радиоастрономического диапазона излучение поглощается почти полностью, за исключением нескольких полупрозрачных интервалов в субмиллиметровой области. Радиоастрономическое окно прозрачности приходится

на диапазон длин волн примерно от 1 см до 20-30 м днем, и до 80 м – ночью. Более длинноволновое излучение поглощается ионосферой. Отметим также, что даже в этом диапазоне для астрономических исследований отведены только несколько узких участков. Остальные используются для радиосвязи.

Кривая атмосферной экстинкции в видимом диапазоне характеризуется более или менее плавным ходом с длиной волны. Основной вклад здесь вносит рэлеевское рассеяние на молекулах атмосферных газов, пропорциональное  $\lambda^{-4}$ . В ультрафиолетовой области на рэлеевскую кривую накладываются сильные полосы озона (полосы Хартли и Хиггинса). Широкая и мелкая полоса Шапню вносит дополнительный вклад в поглощение в видимой области (около 5000Å). Кроме того, есть еще несколько полос молекулярного кислорода и воды, оказывающих дополнительное влияние на фотометрию в полосах  $R$  и  $I$ .

## 2 Методы фундаментальной фотометрии

В настоящее время в связи с значительным прогрессом в развитии фотометрической аппаратуры и возросшим объемом получаемой информации, вопрос о влиянии всевозможных редуций на окончательный результат приобретает особое значение для достижения миллимагнитудной точности. Янгом (1992) предложен наиболее общий подход к проблеме редуций. Этот подход характеризуется тем, что спектр звезды и отклик фотометра рассматриваются как вектора в гильбертовом пространстве. Скалярное произведение этих векторов служит критерием, по которому можно судить о влиянии различных факторов, в том числе и атмосферной экстинкции, на оптимальный выбор инструментальной фотометрической системы и близости ее к некоторой канонической.

Для учета атмосферной экстинкции, включающей в себя поглощение и рассеяние, развито несколько методов, которые условно можно разделить на методы *фундаментальной* и *дифференциальной* звездной фотометрии. При применении метода фундаментальной фотометрии (до момента получения конечного результата – каталога внеатмосферных величин звезд выполняемой программы – наблюдателю) ничего заранее неизвестно ни об внеатмосферных величинах, ни о показателях цвета этих звезд, то есть в расчетах не используются ни эти величины, ни производные от них.

Дифференциальные методики предполагают известными эти величины хотя бы для некоторых из наблюдаемых звезд, которые берутся из какого-нибудь каталога. В конечном счете, ошибки использованного каталога войдут в получаемые наблюдательные значения.

В общем случае коэффициент прозрачности атмосферы –  $\alpha$  зависит от ширины полосы  $\Delta\lambda$  и зенитного расстояния  $z$  или, другими словами, воздушной массы –  $F(z)$  (часто ее обозначают также как  $X$ ), распределения энергии в спектре исследуемого объекта –  $E_\lambda$ , а также, особенно при инфракрасных наблюдениях, от азимута и высоты звезды:

$$\alpha = \alpha_\lambda(\Delta\lambda, F(z), E_\lambda, \dots). \quad (1)$$

Разнообразие разработанных методов, вообще говоря, может быть сведено к простому рецепту: функция  $\alpha_\lambda$  разлагается в ряд, из которого берутся на основании опыта (и мнения исследователя) наиболее важные члены. В частности, Элсалу (1967) применил разложение потока принимаемого земным фотоприемником излучения по оптической толщине атмосферы  $M(z)$ :

$$m = m_0 + n + a_1 M(z) + a_2 M^2(z) + \dots \quad (2)$$

Если бы распределение энергии в спектре звезды не обладало особенностями, а можно было бы представить его в виде гладкой функции, зависящей только от температуры, как функция Планка, то и зависимость  $\alpha$  от спектрального класса также можно было бы представить в виде гладкой функции. Однако в действительности, поскольку распределение энергии обладает особенностями, такими как: бальмеровский скачок в ранних звездах, резким спадом и глубокими линиями и

полосами в звездах поздних спектральных классов, то ход  $\alpha_U$  представляет собой сложную неоднозначную функцию. Изменение  $\alpha_{V,B}$ , коэффициента прозрачности в полосах  $B$  и  $V$ , где спектры звезд не имеют существенных особенностей, вплоть до звезд с показателем  $B - V \leq 1.6$ , примерно соответствующим ранним М-звездам, имеет внешне гладкий и прямолинейный ход. В первых своих работах Джонсон принимал, что и  $\alpha_U$  не зависит от спектрального типа звезды. Несмотря на то, что позднее им было показано, что это не так, и ход  $\alpha_U(Sp)$  напоминает двуцветную диаграмму, тем не менее, цветовой коэффициент в УФ-области часто принимался нулевым до последнего времени. Очевидно, это и являлось, вместе с ошибками редукции в стандартную UVV-систему, главным источником больших расхождений между каталогами.

Отметим, что при применении фундаментальных методов предполагается отсутствие азимутальных эффектов. Янг (1974) показал, что при среднем распределении влажности, температуры и скорости ветра по высоте это условие действительно выполняется. При описании различных методов, для простоты мы будем рассматривать в основном монохроматические коэффициенты экстинкции, то есть не включающие цветовой член и эффект Форбса. Эти члены мы будем вводить только для иллюстрации тех методов, где это необходимо.

1. Широко известным и применяемым до настоящего времени является **метод Буге**, предложенный им в 19 веке. Наблюдая экстинкционную звезду на разных зенитных расстояниях или, другими словами, на разных воздушных массах  $F(z)$ , строят так называемую бугеровскую прямую, наклон которой и определяет искомую величину экстинкции:

$$\alpha(m) = \frac{m_n - m_0}{F(z)}, \quad (3)$$

где  $m_n$  и  $m_0$  – наблюдаемая и внеатмосферная звездная величина, соответственно. Метод основан на предположении, что изменениями экстинкции в течение ночи можно пренебречь. Это предположение, однако, выполняется лишь в немногих пунктах. Например, в некоторых из них нефотометрической считается ночь, в которую изменение экстинкции превысило  $0.^m01$ . Для большинства обсерваторий такое предположение заведомо не выполняется, поэтому были разработаны другие методы.

2. **Метод Смарта или “метод пары звезд”** был предложен еще в 1934 году (Смарт, 1934), но, к сожалению, не был оценен современниками. Здесь мы опишем несколько адаптированный метод Смарта, предназначенный для определения внеатмосферного блеска двух звезд, восходящей (1) и заходящей (2). Идея усовершенствования метода принадлежит В.Б. Никонову и была проверена в Крымской обсерватории в 70-х годах.

Имеем два очевидных соотношения:

$$m_{01} + \alpha(S_1) \cdot X_1 = m_1(X_1), \quad (4)$$

$$m_{02} + \alpha(S_2) \cdot X_2 = m_2(X_2), \quad (5)$$

где  $m_{01}$  и  $m_{02}$  – внеатмосферный блеск звезд,  $X_1$  и  $X_2$  – их воздушные массы,  $\alpha(S_1)$  и  $\alpha(S_2)$  – факторы экстинкции в моменты звездного времени  $S_1$  и  $S_2$ ,  $m_1(X_1)$  и  $m_2(X_2)$  – полученные из наблюдений значения блеска.

Если звезды наблюдаются в один и тот же момент времени и отсутствует азимутальный эффект, то, умножая первое уравнение на  $X_2$ , а второе – на  $X_1$ , и вычитая одно из другого, получаем:

$$m_{01}X_2 - m_{02}X_1 = m_1(X_1)X_2 - m_2(X_2)X_1, \quad (6)$$

или

$$m_{01} - \eta m_{02} = m_1(X_1) - \eta m_2(X_2), \quad (7)$$

где  $\eta = X_1/X_2$ , а значение  $C = m_1(X_1) - \eta m_2(X_2)$  – получается из наблюдений.

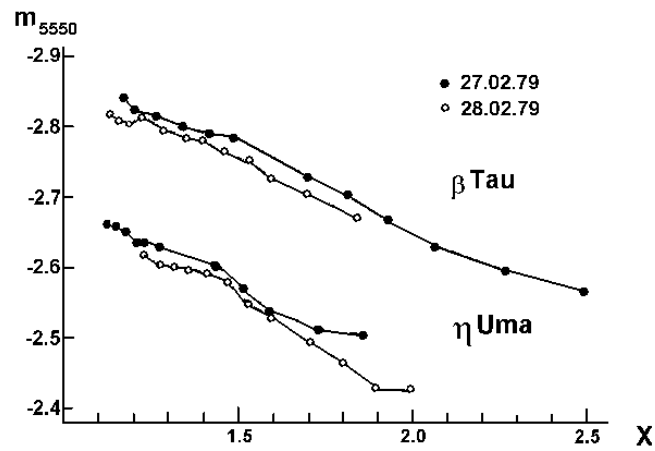


Рис. 1. Бугеровские линии для квазимонохроматических наблюдений, определенные по двум звездам в феврале 1979 г. в Крыму

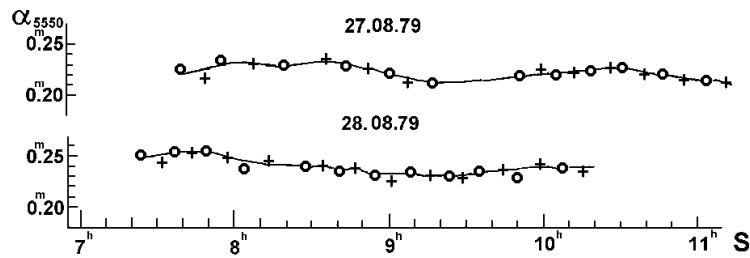


Рис. 2. Ход монохроматической экстинкции со временем, определенный методом Смарта

Уравнения (7) не зависят от экстинкции, поэтому можно объединить их в одну систему условных уравнений. Решая эту систему методом наименьших квадратов, получим искомые значения внеатмосферного блеска  $m_{01}$  и  $m_{02}$  обеих экстинкционных звезд.

Практика применения метода Смарта такова. На основании наблюдений обеих звезд строятся фактические, не сглаженные, линии Буге. Для момента каждого наблюдения вычисляются значения  $\eta = X_1/X_2$ . Для той звезды, которая наблюдалась в данный момент, берется непосредственно полученное из наблюдений значение  $m_i X_i$ . Для другой – значения  $m_j X_j$  интерполируются с ее линий Буге для значений  $X_j$ , соответствующих данному моменту времени. Как показывает опыт, достаточно ограничиться линейной интерполяцией. Таким образом строятся уравнения (7), которые и образуют нужную систему условных уравнений. Для иллюстрации на рисунке 1 показаны фактические линии Буге для двух звезд,  $\eta$  Uma и  $\beta$  Tau, восходящей и заходящей соответственно. Всего было получено 23 наблюдения в первую ночь и 24 – во вторую. Как видно, линии Буге отнюдь не являются прямолинейными, что указывает на изменение прозрачности в течение обеих ночей. В целях оценки надежности получаемого результата для каждой ночи системы условных уравнений решались отдельно. Полученный результат показывает, что точность определения внеатмосферного блеска звезд вполне удовлетворительная: по наблюдениям для отдельной ночи она меньше  $0.^m01$ . Сходимость результата по двум ночам оказалась в пределах точности отдельных ночей. Зная

внеатмосферные значения блеска, можно оценить и изменения прозрачности в зависимости от звездного времени  $S$ :

$$\alpha(S) = \frac{m(X) - m_0}{X} \quad (8)$$

График изменения  $\alpha(S)$  показан на рисунке 2. Для внеатмосферного блеска звезд были взяты средние значения  $m_0$  из наблюдений обеих ночей. Видно, что для этих наблюдений азимутальный эффект отсутствовал. Между тем, заметны кратковременные, с характерным временем несколько минут, небольшие (в пределах нескольких тысячных долей звездной величины) изменения экстинкции. По инициативе В.Б. Никонова в свое время были проведены специальные измерения атмосферной экстинкции на разных телескопах в Крымской обсерватории. Как показали эти наблюдения, существующие колебания прозрачности с характерным временем 4-7 мин., с амплитудой, достигающей  $0.^m02$ , по-видимому, являются основной преградой на пути достижения максимальной точности фотометрических измерений (Никонов и др., 1988, Бурнашев и др., 1991).

**3. Метод контрольных звезд Никонова** позволяет контролировать как изменения прозрачности в течение ночи, так и возможные изменения применяемой фотометрической системы. Этот метод, предложенный В.Б. Никоновым (1953, 1976), традиционно применяется в Крымской астрофизической обсерватории на протяжении многих лет. Метод основан на определении экстинкции в течение ночи по регулярным наблюдениям специально выбранной экстинкционной звезды. Вначале определяется, например, по прямым Буге, приближенное значение внеатмосферного блеска этой звезды:

$$m'_{oe} = m_{oe} - \delta m_{oe}, \quad (9)$$

где  $\delta m_{oe}$  – неизвестная пока поправка, которую надо определить. Определенные с помощью  $m'_{oe}$  значения фактора экстинкции  $\alpha'(t_e)$  для момента времени  $t_e$ , по сравнению с истинным коэффициентом экстинкции  $\alpha(t_e)$ , содержат дополнительный член, зависящий от воздушной массы в момент наблюдения:

$$\alpha'(t_e) = \frac{m_{oe} - m'_{oe}}{X_e} = \alpha(t_e) + \frac{\delta m_{oe}}{X_e} \quad (10)$$

Таким образом, ошибка в определении коэффициента экстинкции  $\delta\alpha(t_e) = \frac{\delta m_{oe}}{X_e}$  зависит как от величины поправки  $\delta m_{oe}$ , так и от воздушной массы звезды. Для оценки  $\delta m_{oe}$  выбираются специальные контрольные звезды, для которых можно получить из наблюдений приближенные внеатмосферные значения:

$$m'_{ok} = m_{ok} - \eta \delta m_{oe}, \quad (11)$$

где  $\eta = \frac{X_k}{X_e}$  – отношение воздушных масс звезд, контрольной и экстинкционной, в момент наблюдения.

Программу наблюдений контрольной звезды составляют таким образом, чтобы диапазон изменения  $\eta$  был возможно более широким. На практике обычно получается  $\eta = 0.5 \div 2.5$ . В течение наблюдательного периода набирается достаточно наблюдений для составления системы условных уравнений, из решения которой получают величину поправки для экстинкционной звезды  $\delta m_{oe}$ , а, следовательно, и ее внеатмосферную величину  $m_{oe} = m'_{oe} + \delta m_{oe}$ , а также и внеатмосферную величину контрольной звезды  $m_{ok} = m'_{ok} + \eta \delta m_{oe}$ .

На практике не ограничиваются одной контрольной звездой, тем более, что такой звездой может считаться любая непременная звезда, для которой в период наблюдений был перекрыт достаточный диапазон отношения воздушных масс.

Метод Никонова позволяет, в принципе, контролировать возможные изменения инструментальной фотометрической системы в течение наблюдательного периода (Никонов, 1976).

**4. Метод Шарова и Архиповой** (1964) является модификацией метода Никонова. В этом методе используются наблюдения всех непременных звезд программы. Суть метода заключается

в том, что используются все уравнения типа (7) для всех непериодических звезд программы. Конечно, программа наблюдений должна быть составлена наилучшим для этого образом.

5. **Метод Сарычева (1968)** также не предполагает для измерения прозрачности использования какой-то определенной экстинкционной звезды. Однако для успешного применения этого метода так же, как и в методе контрольных звезд, необходимо заранее спланировать наблюдения так, чтобы повторные наблюдения каждой звезды происходили при существенно различных воздушных массах. При этом надо помнить и о предполагаемой связи уравнений, получаемых в разные ночи. Считается, как и в методе Никонова, мгновенный коэффициент прозрачности одинаковым на всем небосводе.

6. **Метод Стока (Дельта-дельта метод)**. Этот метод учета экстинкции также предполагает одинаковое значение экстинкции по всему небу, т. е. отсутствие азимутального эффекта. Этот метод был предложен Стоком (1968).

Экстинкция определяется с помощью набора экстинкционных звезд разного цвета, равномерно распределенных по прямому восхождению. В этом методе используются наблюдения 2-х звезд,  $A$  и  $B$ , с примерно одинаковым склонением и разницей по прямому восхождению около 4-х часов. Коэффициент экстинкции:

$$\alpha(t, \tilde{C}) = (m_A - m_B) - (m_A - m_B) / [F(z_A) - F(z_B)] - [F(z_A) - F(z_B)]. \quad (12)$$

7. **Метод Зданавичуса (использование Q-диаграмм)**. Наиболее глубоко, доведенным до наблюдения, вопрос об учете атмосферной экстинкции в широком спектральном диапазоне был разработан Зданавичусом (1975) как в приложении к системе UBVR, так и для среднеполосной вильнюсской системы.

Суть метода заключается в применении расчетных коэффициентов и Q-параметров. В широкополосных системах уже следует учитывать эффект Форбса:

$$C_{U-B}(z) - C_{U-B}^o = \alpha'_{UB} \cdot X + r_{UB} \cdot X^2, \quad (13)$$

здесь  $C_{U-B}^o$  - внеатмосферный показатель цвета,  $C_{U-B}(z)$  - измеренный показатель цвета,  $X$  - воздушная масса,  $r_{UB}$  - коэффициент Форбса.

Как показывают расчеты, можно принять:

$$r_{UB} = -0.028\alpha'_{UB}, \quad (14)$$

отсюда:

$$\alpha'_{UB} = \frac{C_{U-B}(z) - C_{U-B}^o}{X \cdot (1 - 0.028 \cdot X)}. \quad (15)$$

Для того, чтобы исключить влияние межзвездного покраснения, вычисляются не зависящие от межзвездного покраснения коэффициенты экстинкции:

$$\kappa_{UB} = \alpha'_{UB} + g_{UB} \cdot (U - B), \quad (16)$$

где

$$g_{UB} = \frac{d\alpha_{UB}}{dE_{U-B}} \quad (17)$$

характеризует наклон линий покраснения на диаграмме  $(\alpha_{UB}, U - B)$ .

Расчетным путем получено, что  $g_{UB} = -0.012$ , а с помощью Q-параметров значения коэффициента  $\kappa$  можно с точностью до  $0.002$  представить в виде:

$$\kappa_{UB} = 0.37 - 0.067 \cdot Q_{UBV} + 0.073 \cdot Q_{BUR}. \quad (18)$$

Аналогично вычисляются коэффициенты экстинкции  $\alpha_{BV}$ , так как для показателя (B-V) также существенен эффект Форбса:

$$C_{B-V}(z) - C_{B-V}^o = \alpha'_{BV} \cdot X + r_{BV} \cdot X^2, \quad (19)$$

где

$$r_{BV} = -0.02 \cdot \alpha'_{BV}, \quad (20)$$

так что

$$\alpha'_{BV} = \frac{C_{B-V}(r) - C_{B-V}^o}{X \cdot (1 - 0.02 \cdot X)}. \quad (21)$$

Эффект Форбса несущественен уже для коэффициента  $\alpha_{VR}$ :

$$\alpha_{VR} = \frac{C_{V-R}(z) - C_{V-R}^o}{X}. \quad (22)$$

Как показывает опыт, точность определения коэффициентов экстинкции предложенным методом составляет  $\pm 0^m.01$ .

**8. Одновременное определение коэффициентов экстинкции и коэффициентов трансформации фотометрической системы.** Редукция фотометрических наблюдений, вообще говоря, состоит из 2-х операций: учета атмосферной экстинкции и трансформации фотометрической системы. Если различие систем невелико, можно использовать линейные соотношения:

$$m_o^{(1)} = m_o^{(2)} + A_m + B_m \cdot c_o^{(1)}, \quad (23)$$

$$c_o^{(1)} = A_c + B_c \cdot c_o^{(2)}, \quad (24)$$

где: 1 – стандартная система, 2 – инструментальная система, индексы  $m$  и  $c$  относятся к звездным величинам и показателям цвета, соответственно; нулевые индексы относятся к внеатмосферным значениям.

Для контроля фотометрической системы служит ряд стандартных звезд, которые регулярно наблюдаются в течение всего периода наблюдений (Харди, 1967, Ежикевич, 1966). Коэффициент экстинкции также линейно зависит от цвета звезды. Таким образом, в инструментальной системе:

$$m_o^{(1)} = m^{(2)}(z) - [a_m + b_m \cdot c^{(2)}(z)] \cdot F(z) + A_m + B_m \cdot c_o^{(2)}, \quad (25)$$

$$c_o^{(1)} = A_c + B_c \cdot \{c^{(2)}(z) - [a_c + b_c \cdot c(z)] \cdot F(z)\}. \quad (26)$$

На практике наблюдения комбинируют таким образом, чтобы уменьшить число уравнений и увеличить точность определения отдельных коэффициентов. Например, для оценки цветовых членов второго порядка, зависящих от цвета, наблюдают на близких зенитных расстояниях звезды разного цвета. Для определения главных членов экстинкции берут звезды близкие по цвету, и наблюдения планируют таким образом, чтобы разность воздушных масс была как можно больше, и т.д.

Подобный алгоритм обработки, включающий определение коэффициентов экстинкции и связи между фотометрическими системами, реализован в пакете IRAF.

### 3 Методы дифференциальной привязки

Большое число высококачественных фотометрических и спектрофотометрических данных позволяет значительно упростить процесс наблюдений и последующей обработки без существенной потери точности. Поскольку для монохроматических величин цветовыми коэффициентами можно пренебречь, то уравнения значительно упрощаются. Случае, если для двух звезд, выбранных в качестве экстинкционных, известны их внеатмосферные монохроматические величины, то коэффициент экстинкции определится как:

$$\alpha(\lambda) = \frac{m_1(\lambda) - m_2(\lambda) - (m_{o1}(\lambda) - m_{o2}(\lambda))}{X_1 - X_2} = \frac{\Delta m - \Delta m_0}{\Delta X}. \quad (27)$$

Такой упрощенный способ Харди-Ежикевича, названный дельта-методом, был успешно применен при спектрофотометрических наблюдениях на Памире и в Армении пулковскими наблюдателями (Алексеева, 1980).

Получившие широкое распространение в последние годы панорамные светоприемники потребовали разработки и осуществления гибких алгоритмов учета атмосферной прозрачности и редукции к стандартным фотометрическим системам. В качестве примера рассмотрим фотометрическую калибровку SLOAN (Смит и др., 2002).

Эта фотометрическая система состоит из 5 широких полос, простирающихся от  $\lambda = 3000 \text{ \AA}$  до  $\lambda = 10500 \text{ \AA}$  (эффективные длины волн:  $3450(u')$ ,  $4750(g')$ ,  $6222(r')$ ,  $7632(i')$ ,  $9049(z')$   $\text{\AA}$ ). Особенность примененной системы в том, что в ней нет полосы, аналогичной V, для того, чтобы избежать влияния авроральных линий. Вместо нее применена полоса ( $g' 4750$ ).

Фундаментальным стандартом, определяющим нуль-пункт системы, является субкарлик  $BD + 17^\circ 4708$ . Вспомогательные фундаментальные стандарты:  $BD + 26^\circ 2606$ ,  $BD + 21^\circ 0607$ . Через каждые 90 минут наблюдался по крайней мере один фундаментальный стандарт для определения нуль-пункта и подтверждения стабильности атмосферы. Кроме того, подобрана система 155 звезд (названных первичными стандартами), покрывающая все северное полушарие. Вторичными стандартами названы те, которые подобраны в областях неба, где в ближайшей окрестности нет первичного стандарта.

Для каждой фотометрической полосы составлено уравнение связи, которые совершенно аналогичны друг другу. Для примера приведем только уравнение для полосы  $u'$ .

Для измеренной  $u'_{inst}$ :

$$u'_{inst} = u'_o + a_u + b_u \cdot (u' - g')_o + k_u \cdot X + c_u \cdot [(u' - g')_o - (u' - g')_{o,zp}] \cdot (X - X_{zp}), \quad (28)$$

где:  $u'_o$  – внеатмосферная звездная величина,  $(u' - g')_o$  – внеатмосферный цвет,  $a_o$  – нуль-пункт для данной ночи,  $X$  – воздушная масса,  $k_u$  – коэффициент экстинкции.

Константы нуль-пункта  $X - X_{zp}$  и  $(u' - g')_{o,zp}$  определены по отношению к наблюдениям на средней воздушной массе  $\langle X \rangle = 1.3$  и некоторому среднему “космическому цвету”:  $u' - g' = 1,42 \pm 0.82$ , определенного по 4428 объектам в интервале  $19 < r < 20$  в полях NN 11-100. Использование этих констант упрощает фотометрические уравнения.

Обращает на себя внимание, что весь массив был разбит на блоки, округленные по времени до ближайших 0<sup>d</sup>01. Каждая ночь проверялась на перерыв в наблюдениях: восток-запад; Луна; облака; до и после полуночи и т.д. Блок должен был содержать около 10 наблюдений в каждой полосе примерно за 1<sup>h</sup>5 наблюдательного времени. Средняя длительность блока равна 3<sup>h</sup>. На момент опубликования в 2002 году получилось 109 блоков за 61 ночь (Смит, 2002).

### 4 Учет атмосферной экстинкции в области теллурических полос

Существенное ограничение на точность получаемых результатов при выполнении фотометрических и спектрофотометрических наблюдений в ближней инфракрасной области накладывает существование сильных теллурических полос поглощения атмосферных газов.



С 1959 года Джонсоном постепенно были введены фотометрические полосы, в инфракрасной области соответствующие окнам прозрачности земной атмосферы, которые и определяют их положение:  $U(0.36\mu m)$ ,  $B(0.44\mu m)$ ,  $V(0.55\mu m)$ ,  $R(0.70\mu m)$ ,  $I(0.88\mu m)$ ,  $J(1.25\mu m)$ ,  $H(1.62\mu m)$ ,  $K(2.2\mu m)$ ,  $L(3.5\mu m)$ ,  $M(5.0\mu m)$ ,  $N(10.4\mu m)$ ,  $Q(20.0\mu m)$ . Позднее Лоу ввел еще одну величину  $Z(\lambda_o = 34\mu m)$ .

Вода – наиболее изменчивый компонент атмосферы. Ее концентрация может заметным образом изменяться в воздухе в зависимости от локальных атмосферных условий. В то же время полосы воды являются основным поглощающим агентом в инфракрасной и субмиллиметровой областях спектра.

Кроме того, некоторый вклад в атмосферное поглощение в инфракрасной области вносят другие газы: молекулярный кислород, метан, двуокись азота, углекислый газ и др.

Интенсивность полос  $O_2$ , возникающих во всей толще атмосферы, мало изменяется со временем, зависит только от воздушной массы, при которой произведено наблюдение. Полосы воды, напротив, сильно зависят от условий в низких слоях атмосферы. Кроме того, распределение паров воды на небесной сфере крайне неравномерно, то есть поглощение в полосах воды носит “пятнистую” структуру, что еще более затрудняет учет атмосферной экстинкции в районе этих полос.

Влияние атмосферных газов  $CH_4$  и  $N_2O$  сказывается на коротковолновых границах фотометрических полос  $N$  и  $M$ , в то время как поглощение, вызванное углекислым газом, затрагивает коротковолновый край полосы  $M$  и длинноволновый край полосы  $L$ .

По мере продвижения в инфракрасную область точность измерений падает, так как помимо влияния теллурических полос, существенно влияние собственного излучения атмосферы. Так, например, в полосе  $Q$  приемлемой можно считать точность до 20%.

Поглощение в теллурических полосах изменяется сложным образом: интенсивность некоторых линий, составляющих полосы поглощения, растет пропорционально количеству поглощающих молекул, другие линии уже достигли насыщения и находятся на пологом участке кривой роста и т. д. Таким образом, поглощение можно выразить как:  $\Delta m \sim (\Delta X)^\beta$ , где  $\beta$  меняется от 1 (линейный участок) до 0 (насыщение).

Часто принимают, что поглощение в полосе:

$$W = \alpha \cdot X + s, \quad (29)$$

где  $s$  – член, учитывающий насыщенные линии, не меняющиеся с воздушной массой. Эта составляющая войдет как дополнительное слагаемое в коэффициент спектральной чувствительности аппаратуры.

Ховардом и др. (1956) рассмотрено поглощение в теллурических полосах кислорода и воды и предложены простые формулы учета полного поглощения в полосе. Практическим развитием метода является представление поглощения в полосе, выраженное в звездных величинах:

$$m_\lambda - m_\lambda^0 = c_\lambda \omega^{\mu_\lambda}. \quad (30)$$

Параметры  $c_\lambda$  и  $\mu_\lambda$  могут быть определены из наблюдений (Галкин и Архаров, 1981).

Отметим еще раз, что прозрачность в ИК-области быстро изменяется как по времени, так и по направлению, поэтому наивысшую точность при проведении спектрофотометрических наблюдений в ближней ИК-области, по-видимому, могут дать только дифференциальные методы учета атмосферной экстинкции.

Майолино и др. (1996) применили при обработке наблюдений, полученных на ММТ со спектрографом FSPEC в области  $\lambda 1.6\mu$  (разрешение 2200) и  $\lambda 2.3\mu$  (разрешение 3500), метод учета в теллурических линиях, основанный на наблюдении рядом с объектом звезды типа  $G5$  до  $F6$ . При этом спектр исследуемой звезды делится на спектр звезды сравнения. Частное от деления уже свободно от теллурических линий, но на месте спектральных особенностей в звезде сравнения возникают “пики” или “эмиссии”, которые убираются путем умножения полученных чисел на спектр Солнца ( $G2V$ ).

Дальнейшим успешным развитием этого метода можно считать методику учета теллурических линий, принятую при обработке спектров, полученных на UKIRT на Мауна-Кеа (Вейк и др., 2003).

Основной особенностью применяемой ими методики является использование в качестве звезды сравнения (“Telluric standard star”) звезды AOV. Преимущества этого метода заключаются прежде всего в том, что сравнительно малочисленные линии, содержащиеся в спектрах звезд AOV, имеют малую интенсивность и мало искажают звездный континуум, который в рассматриваемой спектральной области ( $1-5\mu$ ) может быть представлен излучением черного тела с температурой  $\sim 10000$  К. Кроме того, для А-звезд с малым межзвездным покраснением абсолютные потоки во всех длинах волн могут быть легко вычислены на основании известных V-величин. Основным недостатком А-звезд в качестве стандартов – наличие в их спектрах сильных водородных линий, часто уширенных вращением до 300 км/сек. Особенно это неприятно, когда целью работы является именно изучение водородных линий.

В результате обработки получается сразу распределение энергии объекта, выраженное в абсолютных единицах. (Разумеется, процедуры наблюдения исследуемого объекта и звезды-стандарта должны быть выполнены при одинаковых условиях.) Предложенная дифференциальная методика состоит из следующих этапов:

1. Нормализации наблюдаемого спектра звезды AOV в области подходящих абсорбционных особенностей.
2. Определение лучевой скорости звезды-стандарта.
3. Сдвиг модельного спектра Веги на величину этой скорости.
4. Учет покраснения и разности звездной величины Веги и звезды-стандарта.
5. Конструирование ядра свертки  $K(\lambda) = \Theta(\lambda) * P(\lambda)$  из наблюдений малой области абсорбционных особенностей звезды-стандарта AOV и модельного спектра Веги. Здесь:  $\Theta(\lambda)$  – функция, учитывающая разность в лучевых скоростях, скорости вращения и т. д. для Веги и звезды-стандарта.  $P(\lambda)$  – инструментальный профиль.
6. Свертка ядра с преобразованным согласно пунктам 3) и 4) модельным спектром Веги.
7. Учет разности эквивалентных ширин сильных водородных линий в спектрах Веги и звезды-стандарта.

Программа обработки ИК-наблюдений *xtellor* доступна на Веб-сайте IRTF:

<http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/Facility/spex>.

В субмиллиметровой области имеется несколько полупрозрачных окон. На основании опыта работы на субмиллиметровом телескопе JCMT были обнаружены некоторые специфические особенности атмосферной экстинкции в субмиллиметровой области, и выработаны способы учета влияния земной атмосферы на результаты измерений (Арчибальд и др., 2002).

1. Для учета атмосферной экстинкции применен так называемый метод погружения (*v*) небо *Skydip*.

Суть метода заключается в измерении эмиссии от неба как функции воздушной массы с последующим выводом отсюда излучения атмосферы в зените, и, следовательно, определением атмосферной оптической толщи и количества осажденной воды.

По закону Кирхгофа излучательная способность  $\epsilon_\nu$  и абсорбция  $a_\nu$  на частоте  $\nu$  соотносятся как  $\epsilon_\nu = a_\nu = I_\nu^{abs}/I_\nu^{obj}$ . Следовательно, пропускание атмосферы:  $I_\nu^{obj} - I_\nu^{abs}/I_\nu^{obj} = 1 - a_\nu = 1 - \epsilon_\nu$

Поэтому регулярно производят измерения яркости неба как функции зенитного расстояния на вспомогательном инструменте для калибровки атмосферного пропускания. Была обнаружена корреляция между поглощением в полосах 225 ГГц (1.3 мм) и полосами 450 мкм и 850 мкм.

Поглощение в полосе 225 ГГц (1.3 мм) регулярно измеряют на расположенном поблизости вспомогательном телескопе *Caltech Submillimetre Observatory-monitor*, который автоматически записывает результаты таких измерений (Эмерсон, 1994).

2. Существует корреляция между шумом неба и качеством изображения, а также между атмосферным поглощением и шумом неба.

3. Шум неба в полосах 450 мкм и 850 мкм явно коррелирует, но иногда корреляция пропадает.

4. Угловое разрешение JCMT не ухудшается из-за эффекта видимости.

5. Нет явной корреляции между видимостью и дрожанием.

6. Смещение обтюратора “фон-объект” до 180 угловых секунд не влияет на чувствительность инструмента.

## 5 Заключение

Земная атмосфера препятствует высокоточным фотометрическим измерениям. Тем не менее, как показали классики астрофотометрии, в том числе и В.Б. Никонов, потерю точности, связанную с атмосферной экстинкцией, можно значительно уменьшить за счет хорошо продуманной методики наблюдений, предусматривающей контроль атмосферной прозрачности в течение всего процесса проведения наблюдений. Особенно это важно для обсерваторий, построенных в местностях со средним качеством астроклимата. Особенным примером получения большого массива высокоточных фотометрических данных является еще не законченный проект SLOAN, выполняемый в условиях превосходного астроклимата с помощью рафинированной методики.

За последние годы достигнут значительный прогресс в деле учета атмосферной экстинкции в инфракрасной и субмиллиметровой областях, выполнена фотометрия огромного числа объектов. Здесь своеобразное воплощение нашла высказанная в свое время В.Б. Никоновым идея применения вспомогательного инструмента для оценки атмосферной экстинкции. Применение вспомогательного телескопа "CSO-monitor" значительно улучшило качество получаемой информации в субмиллиметровой области.

## Литература

- Алексеева Г.А. // Известия ГАО. 1980. №. 198. С. 18.
- Арчибальд и др. (Archibald E.N., Jenness T., Holland W.S et al.) // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2002. V. 336. P. 1.
- Бурнашев В.И., Бурнашева Б.А., Меркулова Н.И., Мегик Л.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1991. Т. 83. С. 156.
- Вейк и др., (Vassa W.D., Cushing M.C., Rainer J.T.) // Publ. A.S.P. 2003. V. 115. P. 389.
- Ержикиевич, Серковский (Jerzykievicz M., Serkovski K.) // Lowell Obs. Bull. 1966. V. 6. No 18. P. 295.
- Зданавичус К. // Бюлл. Вильнюсск. обс. 1975. №. 41 С. 3.
- Никонов В.Б. // Бюлл. Абастуманской астрофиз. обс. 1953. №. 14. С.3.
- Никонов В.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1976. Т. 54. С. 3.
- Никонов В.Б., Бондарь Н.И., Букач А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1988. Т. 79. С. 111.
- Руфенер (Rufener F.) // Publ. l'Obs. de Geneve. 1964. Ser. A. V. 16. P. 413.
- Рыбка (Rybka E.) 1963 // Acta astron. 1963. V. 13. P. 169.
- Сарычев А.П. // в сб. "Атмосферная оптика". 1968. М. "Наука". С. 154.
- Смарт (Smart W.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1934. V. 94. P. 839.
- Сток (Stock J.) // Vistas in Astron. V. 11. P. 127.
- Старк и др. (Stark A.A., Bally J., Balm S.P. et al.) // Publ. Astron. Soc. Pacific. 2001. V. 113. P. 567.
- Смит и др. (Smith J.A. et al.) // Astron. J. 2002. V. 123. P. 2121.
- Страйжис В. // Многоцветная фотометрия звезд. 1977. Вильнюс. Моклас. С. 311.
- Харди (Hardie R) // in "Star and Stellar Systems. Astronomical techniques". 1962. ed. W.A. Hiltner. Chicago. The Univ. Press. chap. 8. (Методы астрономии (перев. с англ.). (В. Хилтнер, ред.) М. Мир. 1967. С. 157).
- Чугайнов П.Ф. // в кн. "Методы исследования переменных звезд" (В.Б. Никонов, ред.) 1971. М. Наука. С. 117.
- Шаров А.С., Архипова В.П. // Сообщ. ГАИШ. 1964. N. 130. С. 3.
- Эмерсон (Emerson J.P.) // "Stars formation and techniques in infrared and mm-wave astronomy. Lectures 5. EADN Predoctoral Astrophysics School". (Berlin, Germany, 21 Sept.-2 Oct. 1992). T.R. Ray. S.V.W. Becklin (eds). Lecture Notes Phys. 1994. V. 431. P. 125.
- Элсалу Х. // Публ. Тартусск. обс. 1967. Т. 36. No 1-2. С. 92. 1960. Т. 33. No 4. С. 296.
- Янг (Young A.) // in "Methods of Experimental Physics". 1974. V. 12 A. (Astrophysics, Optical and Infrared). ed. N. Carleton. (New-York, Academic Press). P. 123.
- Янг и др., (Young A.T., Genet R.M., Boyd L.J. et al.) // Publ. A.S.P. 1991. V. 103. P. 221.
- Янг и др. (Young A.T., Milone E.F., Stagg C.R.) // Astron. Astrophys. Suppl. 1996. V. 105. P. 259.