

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 121, № 1, 14–31 (2025)

УДК 520.8, 520.82, 520.8.07

Общий подход к обработке многоцветной фотометрии звезд

*К.Н. Гранкин*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
konstantin.grankin@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 14 февраля 2025 г.

Аннотация. Обсужден общий подход к обработке многоцветной фотометрии звезд в широкополосной системе *UBVRI*. Приведены основные формулы для вычисления звездных величин и показателей цвета исследуемых объектов, учета атмосферной экстинкции и определения коэффициентов редукции к стандартной фотометрической системе. Обсуждены свойства процедур и функций, реализованных в пакете программ НММ. Подробно описан дифференциальный метод вычисления блеска и показателей цвета исследуемого объекта в стандартной фотометрической системе *UBVRI*. Отмечено, что пакет программ НММ позволяет обрабатывать различные типы фотометрических данных: (1) мониторинговые наблюдения одного объекта, (2) наблюдения нескольких объектов, расположенных в компактной области неба, (3) продолжительные наблюдения нескольких объектов, находящихся в различных участках неба, (4) специальные наблюдения с целью создания фундаментального фотометрического каталога.

Ключевые слова: методы исследования переменных звезд, редукция фотометрических данных, атмосферная экстинкция

1 Введение

Фотометрия является одним из основных методов исследования физики различных типов астрономических объектов, в том числе и молодых переменных звезд. Массовые многоцветные фотометрические наблюдения десятков молодых звезд в нескольких областях звездообразования были приняты в 80–90-х годах прошлого века в рамках различных наблюдательных программ (Rydgren, Vrba, 1983; Herbst et al., 1987; Bouvier et al., 1988; Шевченко, 1989; Гранкин и др., 1995; Bouvier et al., 1997). В результате реализации этих программ были получены сотни тысяч оценок блеска в широкополосной фотометрической системе *UBVRI*. Поскольку эти программы выполнялись различными научными группами, на различных телескопах и с различными приемниками излучения, то вполне очевидно, что алгоритмы самих фотометрических наблюдений и дальнейшей обработки полученных данных были разными. Тем не менее все исследователи придерживались достаточно общих идей и подходов к методике выноса широкополосных наблюдений за атмосферу и к процедуре перевода инструментальных измерений в стандартную фотометрическую систему. Эти методики и процедуры последовательно изложены Х. Харди в “Методах астрономии” (1967), П.Ф. Чугайновым в “Методах исследования переменных звезд” (1971), В.Б. Никоновым в “Курсе астрофизики и звездной астрономии” (1973), Д.Я. Мартыновым в “Курсе практической астрофизики” (1977), В.Л. Страйжисом в монографии “Многоцветная фотометрия звезд” (1977). Более систематизированное и подробное описание методов звездной фотометрии приведено А.В. Мироновым в книге “Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотометрии звезд” (2008).

Следует упомянуть такие хорошо известные процедуры выноса широкополосных наблюдений за атмосферу, как метод пары, метод Стока, метод Харди–Ежикевича, метод Никонова, метод Сарычева (Чугайнов, 1971; Миронов, 2008). П.Ф. Чугайнов справедливо заметил, что выбор того или иного метода учета атмосферной экстинкции должен определяться теми конкретными задачами, которые стоят перед наблюдателем. Это могут быть: (1) непрерывные наблюдения одной переменной и нескольких звезд сравнения в течение нескольких часов; (2) одновременные наблюдения переменных звезд или стандартных звезд в компактном звездном скоплении; (3) продолжительные наблюдения

большого числа переменных звезд, расположенных в различных участках неба. Кроме этого, выбор метода зависит от качества атмосферы на конкретной обсерватории. Например, метод Никонова или гетерохромный метод Тянь-Шаньской обсерватории применимы на высокогорных обсерваториях с очень хорошим и стабильным астроклиматом.

Автор настоящей статьи принимал участие в длительных фотометрических наблюдениях молодых звезд, которые проводились в рамках программы ROTOR на Майданакской обсерватории в Узбекистане на протяжении более двадцати лет (1984–2006 гг.). Майданакская обсерватория расположена на высоте 2700 м над уровнем моря и характеризуется великолепным астроклиматом (Эгамбердыев и др., 2000). Первоначально основные цели программы ROTOR заключались в исследовании причин нестационарности 88 Ae/Be звезд Хербига (HAeBe) (Шевченко, 1989). Позднее в программу ROTOR были включены молодые звезды малых масс типа Т Тельца (TTS) и родственные им объекты (Гранкин и др., 1995). Наблюдения осуществлялись каждую ночь на двух 60-см телескопах фирмы Цейсс и одном 48-см телескопе АЗТ-14. Все телескопы были оснащены идентичными одноканальными фотометрами на счете импульсов, которые имели сходные технические характеристики. Подробное описание характеристик фотометров, питающей и приемной аппаратуры можно найти в диссертации Н.Н. Килячкова (1980). Как правило, каждая переменная звезда измерялась один раз в ночь на минимальной воздушной массе. В результате было получено от 12 до 120 оценок блеска и показателей цвета для каждого объекта в течение наблюдательного сезона, который длился несколько месяцев в году. Благодаря реализации этой программы было получено более ста тысяч UBVR-измерений для 370 объектов из различных областей звездообразования (Herbst, Shevchenko, 1999; Grankin et al., 2007, 2008; Grankin, 2013).

Для учета атмосферной экстинкции применялся метод Никонова (1976). Использование этого метода позволяет отказаться от наблюдений большого количества звезд сравнения и значительно увеличить время наблюдений программных звезд. В течение ночи мы наблюдали несколько стандартных звезд через каждые 1–1.5 часа, а в остальное время – программные звезды. При таком режиме наблюдений около 90% наблюдательного времени используется для измерений программных звезд и фона. Практическое применение этого метода показало, что за один час наблюдательного времени можно измерять от 6 до 10 программных звезд на каждом телескопе. Метод Никонова использовался для большинства фотометрических ночей в течение лета и осени. В зимний период при облачности около одного балла или в случае измерений на больших воздушных массах мы использовали дифференциальный метод наблюдений (Страйжис, 1977). В качестве первичных стандартов были использованы звезды из экваториальных площадок Ландольта (2009). Наблюдения этих звезд применялись для измерений экстинкции, для определения звездных величин вторичных стандартов и для вычисления коэффициентов трансформации из инструментальной системы в стандартную фотометрическую систему. Формальная точность редукции инструментальных величин в стандартную фотометрическую систему была не хуже $\pm 0.^m01$.

В 1986–1996 гг. обработка наблюдений осуществлялась на базе ЭВМ “Электроника 100-25” и “СМ-4”. Для этого использовался пакет прикладных программ, написанный Л.Н. Бердниковым на языке Fortran. После перехода на более современные персональные компьютеры, в период с 1997 по 2007 г., была использована обновленная программа обработки, созданная В.Б. Кондратьевым на языке C++. Начиная с 2007 г. автор статьи работает в Крымской астрофизической обсерватории (КрАО), астроклиматические параметры которой значительно отличаются от параметров астроклимата горы Майданак. Кроме того, в КрАО имеется более широкий спектр навесного фотометрического оборудования: от пятиканального фотометра-поляриметра В. Пииролы (Piirola, 1975; Бердюгин и Шаховской, 1993) до целого парка фотометров на базе ПЗС. Все это стимулировало автора статьи к созданию более современного пакета программ обработки различных фотометрических данных, которые получены: (1) на разных телескопах, (2) с различным фотометрическим оборудованием и (3) в менее благоприятных астроклиматических условиях. В настоящей статье приводится описание универсального пакета программ обработки фотометрических данных, полученных в рамках разнообразных наблюдательных программ на различных телескопах КрАО.

2 Основные формулы звездной фотометрии

Какой бы алгоритм обработки фотометрических измерений не использовался, на начальном этапе рекомендуется учесть нелинейность приемной аппаратуры и вычесть помехи (фон неба, темновой

ток и другие паразитные сигналы). После этого фотометрический отсчет преобразуется в инструментальную звездную величину

$$m = -2.5 \lg[(n_s(1 + kn_s) - n_f(1 + kn_f))] + const, \quad (1)$$

где k – коэффициент нелинейности, n_s – фотометрический отсчет на звезду + фон (измеренный фотометрический поток, приведенный к одной секунде), n_f – отсчет на фон за одну секунду. Например, в случае использования одноканального фотометра с фотоумножителем ФЭУ-79 на 60-см телескопе коэффициент нелинейности $k = (7.5 \pm 0.6)10^{-7}$. В этой формуле $const$ – произвольная константа. Ее значение выбирают таким образом, чтобы вычисленные значения m находились в обычном интервале звездных величин.

Следующим этапом первичной обработки наблюдений является процедура вычисления воздушной массы для всех объектов, измеренных в конкретные моменты времени. Относительная воздушная масса, выраженная через толщину слоя воздуха в зените, с высокой точностью вычисляется через секанс зенитного расстояния z :

$$X(z) = \sec z - 0.0018167(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 - 0.0008083(\sec z - 1)^3, \quad (2)$$

$$\sec z = (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos T)^{-1}, \quad (3)$$

где ϕ – широта обсерватории, δ – склонение звезды и T – часовой угол звезды в момент ее наблюдения, который определяется как разность между текущим звездным временем на меридиане наблюдателя и прямым восхождением звезды.

Основной этап обработки наблюдений связан с процедурой учета ослабления света в земной атмосфере, которая позволяет вычислить внеатмосферное значение звездной величины m° :

$$m^\circ = m(z) - \alpha(c^\circ)X(z), \quad (4)$$

где $m(z)$ – измеренная инструментальная звездная величина на определенном зенитном расстоянии z , которому соответствует конкретная воздушная масса $X(z)$, а $\alpha(c^\circ)$ – коэффициент экстинкции, который зависит от заатмосферного показателя цвета звезды c° . Исследования показали, что зависимость атмосферной экстинкции от показателя цвета звезды остается линейной в широком диапазоне спектральных классов для фотометрических полос V , R , I .

Рассмотрим самый общий случай фотометрических наблюдений, следуя терминологии и обозначениям А.В. Миронова (2008). Предположим, что в течение некоторого времени были выполнены измерения блеска двух стандартных звезд с номерами 1 и 2 с разными внеатмосферными показателями цвета c_1° и c_2° и на различных воздушных массах $X(z_1)$ и $X(z_2)$. В результате таких наблюдений получены инструментальные звездные величины $m_1(z_1)$ и $m_2(z_2)$. Необходимо отметить, что эти измерения выполнены при различных значениях коэффициента экстинкции $\alpha(c_1^\circ)$ и $\alpha(c_2^\circ)$. Тогда, согласно формуле (4), внеатмосферные инструментальные величины обеих звезд можно вычислить по формулам

$$m_1^\circ = m_1(z_1) - \alpha(c_1^\circ)X(z_1), \quad (5)$$

$$m_2^\circ = m_2(z_2) - \alpha(c_2^\circ)X(z_2). \quad (6)$$

Из предположения о линейной зависимости коэффициентов экстинкции от распределения энергии в спектре звезды и, как следствие, от ее показателей цвета, следует, что

$$\alpha(c_2^\circ) = \alpha(c_1^\circ) + \gamma(c_2^\circ - c_1^\circ), \quad (7)$$

где $\gamma(c_2^\circ - c_1^\circ)$ – некоторая поправка, пропорциональная разности показателей цвета этих звезд. Если вычесть выражение (6) из выражения (5) и учесть выражение (7), то внеатмосферную разность звездных величин двух стандартных звезд Δm_{1-2}° можно записать следующим образом:

$$\Delta m_{1-2}^\circ = m_1(z_1) - m_2(z_2) - \alpha(c_1^\circ)\Delta X(z) - \gamma\Delta c^\circ X(z_2), \quad (8)$$

где $\Delta m_{1-2}^o = m_1^o - m_2^o$, $\Delta X(z) = X(z_1) - X(z_2)$, $\Delta c^o = c_2^o - c_1^o$. В этом общем уравнении разность измеренных инструментальных величин $m_1(z_1) - m_2(z_2)$ определяется непосредственно из наблюдений, а значения $\Delta X(z)$ и $X(z_2)$ легко вычисляются.

Из уравнения (8) видно, что для определения коэффициента экстинкции α достаточно измерить две стандартные звезды с близкими, а лучше одинаковыми показателями цвета на достаточно различных воздушных массах. В этом случае $\Delta c^o = 0$ и выражение $\gamma \Delta c^o X(z_2)$ обращается в ноль. Напротив, чтобы вычислить цветовую поправку γ , следует подобрать две стандартные звезды с различными показателями цвета и измерить их на одинаковых зенитных расстояниях. В этом случае $\Delta X(z) = 0$, член $\alpha(c_1^o) \Delta X(z)$ обратится в ноль, и можно будет легко определить значение γ . Само собой разумеется, что измерения звезд сравнения желательно выполнить одновременно или квазисовременно. В своей книге А.В. Миронов предлагает называть этот метод определения параметров экстинкции гамма-методом (Миронов, 2008). Гамма-метод получил широкое применение в различных астрономических обсерваториях.

До сих пор речь шла о фотометрических измерениях в некоторой инструментальной фотометрической системе, свойства и особенности которой определяются коэффициентами пропускания (и/или отражения) оптических узлов телескопа и используемых фильтров, спектральной чувствительностью приемника излучения и другими факторами. Поэтому на заключительном этапе обработки наблюдений важно выполнить перевод инструментальных звездных величин и показателей цвета в стандартную фотометрическую систему. Если различия инструментальной и стандартной систем невелики, то связь между ними можно описать простыми линейными уравнениями для каждой фотометрической полосы

$$M^o = m^o + J_m + K_m C^o \quad (9)$$

и для каждого показателя цвета

$$C^o = J_c + K_c c^o, \quad (10)$$

где заглавными буквами M^o и C^o обозначены соответственно заатмосферные значения блеска и показателя цвета в стандартной системе, а J_m , K_m , J_c , K_c – коэффициенты трансформации к стандартной системе.

Подставляя уравнение (5) в уравнение (9), можно получить следующее выражение:

$$M^o = m(z) - \alpha(c^o)X(z) + J_m + K_m C^o, \quad (11)$$

которое связывает заатмосферную звездную величину в стандартной системе M^o с измеренным блеском $m(z)$ в инструментальной системе.

По аналогии с уравнением (5) мы можем записать уравнение для заатмосферного показателя цвета звезды в инструментальной системе c^o через измеренный показатель цвета $c(z)$:

$$c^o = c(z) - \alpha_c(c^o)X(z), \quad (12)$$

где $\alpha_c(c^o)$ – цветовой фактор экстинкции. Подставляя уравнение (12) в уравнение (10), получим следующее выражение:

$$C^o = J_c + K_c [c(z) - \alpha_c(c^o)X(z)], \quad (13)$$

которое связывает заатмосферный показатель цвета в стандартной системе C^o с измеренным цветом $c(z)$ в инструментальной системе. Поскольку на практике коэффициенты экстинкции определяются с использованием измеренных инструментальных показателей цвета, то в уравнениях (11) и (13) вполне допустимо сделать замену $\alpha(c^o)$ на $\alpha(c)$ и $\alpha_c(c^o)$ на $\alpha_c(c)$. Тогда получаем окончательную систему уравнений

$$\begin{cases} M^o = m(z) - \alpha(c)X(z) + J_m + K_m C^o \\ C^o = J_c + K_c [c(z) - \alpha_c(c)X(z)], \end{cases} \quad (14)$$

которая связывает измеренные инструментальные величины $m(z)$ и показатели цвета $c(z)$ с заатмосферными величинами M^o и показателями цвета C^o в стандартной системе. Чтобы совершить

переход от инструментальной фотометрической системы к стандартной, необходимо знать еще и коэффициенты трансформации J_m, K_m, J_c, K_c от инструментальной системы к стандартной. Они надежно определяются путем решения систем линейных уравнений (9) и (10), составленных по измерениям большого числа стандартных звезд, значения блеска и показатели цвета которых значительно различаются. Как правило, для определения коэффициентов трансформации к стандартной фотометрической системе *UBVRI* проводятся массовые измерения стандартных звезд из площадки Ландольта (2009). Для повышения точности таких измерений желательно наблюдать площадки Ландольта на минимальных воздушных массах (около кульминации) и в лучшие фотометрические ночи. В некоторых случаях бывает удобнее определить коэффициенты редукции от стандартной системы к инструментальной; обозначим их маленькими буквами: j_m, k_m, j_c, k_c . Они связаны с коэффициентами J_m, K_m, J_c, K_c следующими выражениями:

$$J_c = -\frac{j_c}{k_c}, K_c = \frac{1}{k_c}, J_m = -(j_m - \frac{k_m}{k_c} j_c), K_m = -\frac{k_m}{k_c}. \quad (15)$$

3 Базовые свойства пакета программ

Пакет программ обработки фотометрических данных реализован в среде программирования *Delphi* с использованием принципов объектно-ориентированного программирования и возможностей работы с динамическими массивами. По аналогии с наименованием предыдущего пакета программ, который назывался *DMM* (Differential Magnitude Method), он получил обозначение *HMM* – Heterochromatic Magnitude Method. Пакет программ состоит из одного основного модуля *HMM4* и трех дополнительных модулей: *Astro*, *Reduction* и *Matfunc*.

Небольшой модуль *Matfunc* включает в себя несколько математических функций, которые не реализованы в самом *Delphi*. Кроме того, в этом модуле представлено несколько полезных процедур: процедура поиска максимального и минимального значения в вещественном массиве (*MinMax*) и процедура быстрой сортировки трех связанных вещественных массивов (*QuickSort*). Помимо этого, в модуле *Matfunc* имеется еще несколько математических процедур, которые не используются в модуле *HMM4*.

Модуль *Astro* состоит из 60 процедур и функций, которые реализуют различные астрономические вычисления и преобразования. На рис. 1 представлен начальный фрагмент этого модуля, где можно видеть определение некоторых констант и начальное описание таких функций, как *HMS_H* (преобразование часов, минут и секунд в часы и доли часа), *DMS_D* (преобразование градусов, угловых минут и секунд в градусы и доли градуса), *JDate* (вычисление юлианской даты), *IntTime* (вычисление интервала времени, прошедшего с января 1900 года), *NEclipt* (определение наклона эклиптики), *DA* (приведение реального числа к диапазону 0–360 градусов), *LSo* (определение истинной долготы Солнца). Объем статьи не позволяет перечислить все 60 процедур и функций этого модуля. Можно отметить только, что в пакете программ *HMM* чаще всего используются следующие функции из модуля *Astro*: *SmUT* (вычисление звездного времени на момент наблюдения, выраженного в UT), *TimeAngl* (вычисление часового угла объекта), *AirMass* (вычисление воздушной массы объекта с использованием функции *SecZ*) и еще целый набор функций, которые реализуют вычисления по формулам, приведенным в предыдущем разделе.

Основные идеи и методы пакета программ *HMM4* реализованы в отдельном модуле *Reduction*, который содержит 19 различных процедур. Его возможности будут представлены в следующем разделе. Здесь только стоит отметить, что в нем определяются три родственных объекта или записи: *Fon* (запись для объекта типа “фон”), *Star* (запись для объекта типа “звезда”) и *Ext* (запись для объекта типа “экстинкция”). Каждому объекту типа *Fon* или *Star* поставлены в соответствие определенные поля (некоторые его характеристики), такие как код объекта, дата наблюдения, время наблюдения, небесные координаты, часовой угол, воздушная масса и т. д. Процедуры, реализованные в этом модуле, выполняют все необходимые действия для работы с объектами *Fon*, *Star* и *Ext*. Например, они читают файлы с исходными данными и заполняют соответствующие им поля в объектах, вычисляют коэффициенты экстинкции и коэффициенты трансформации к стандартной системе, выносят значения инструментального блеска и показателей цвета за атмосферу и т. д.

Основной модуль *HMM4* отвечает за графическую оболочку пакета программ, координирует работу всех процедур и функций из модуля *Reduction*: позволяет читать файл с наблюдениями, вычислять коэффициенты экстинкции или редукции, получать значения блеска и показателей цвета всех

```

UNIT Astro;
      { A product of Grankin K.N. 1997-2010 }
      {                                     }
{-----}
                        INTERFACE
{-----}
Uses Matfunc, Math;
Const
  Names_of_Monthes : array [1..12] of string[3] =
    ('Jan','Feb','Mar','Apr','May','Jun',
     'Jul','Aug','Sep','Oct','Nov','Dec');

  JDHP : integer = 4;      { число знаков после запятой в JDH }
  Fi   : real = 44.726944; { широта КраО в градусах }
  Long : real = 2.2678;    { долгота КраО в часах }
  CN   : real = 14.0E-7;  { коэффициент нелинейности для АЗТ-14 }
  NH   : real = 1.0;      { полуинтервал поиска фона и зв. ср. }
{ Значения этих констант можно переопределить, если присвоить им }
{ новые значения в вызывающей программе ! }
Type
  Float = double;
{-----}
Function HMS_H(Hour,Minute : integer; Second : Float) : Float;
{ Функция преобразует часы, минуты и секунды в часы }
{-----}
Function DMS_D(Degree,AngMin : integer; AngSec : Float) : Float;
{ Функция преобразует градусы, угловые минуты и секунды в градусы }
{-----}
Function JDate(Year,Month,Date : integer; UT : Float) : Float;
{ Функция для определения JD. }
{-----}
Function IntTime(Year,Month,Date : integer; UT : Float): Float;
{ Интервал времени, осчитываемый от 1900, января 0.5 и выраженный в }
{ столетиях. Применяется для вычисления координат Солнца и наклона }
{ эклиптики }
{-----}
Function NEclipt(Year,Month,Date : integer; UT : Float): Float;
{ Функция для определения наклона эклиптики }
{-----}
Function DA( A : Float): Float;
{ Функция для приведения числа к диапазону 0-360 градусов }
{-----}
Function LSon(Year,Month,Date : integer; UT : Float): Float;
{ Функция для определения истинной долготы Солнца }
{-----}

```

Рис. 1. Фрагмент модуля *Astro* с определением некоторых констант и начальным описанием астрономических функций

объектов в стандартной системе и записывать результаты вычислений в текстовые файлы. Этот модуль реализует основные принципы объектно-ориентированного программирования и возможности работы с динамическими массивами. В частности, во время загрузки файла с наблюдениями модуль *HMM4* создает несколько динамических массивов записей: массив записей с фоном, массив записей с переменными звездами, массив записей со звездами сравнения (или со звездами-стандартами). Каждый элемент такого динамического массива представляет собой одну запись, в которой содержится объект со всеми своими полями (характеристиками). Дальнейшая работа модуля организована по единой схеме: в зависимости от выбранного действия (вычисление экстинкции, редукции или звездных величин) происходит последовательное чтение очередной записи из динамического массива и для этой выбранной записи (объекта) осуществляются необходимые действия. Например, производятся такие действия, как поиск фона или звезды сравнения по определенным критериям, вычисление звездных величин и показателей цвета и т. п. Более подробно возможности и свойства этого модуля будут представлены в отдельном разделе.

Для более гибкой настройки возможностей модуля *HMM4* многие необходимые для его работы параметры записаны в нескольких текстовых файлах. Так, информация о переменных звездах содержится в файле *varstars.hmm*, а информация о звездах сравнения и стандартных звездах – в файле *cmpstars.hmm*. Оба этих файла имеют схожую структуру. Каждая строка содержит информацию об одной звезде: пятизначный цифровой код звезды, ее координаты на 2000 год, имя звезды, значения блеска в полосе V и показателей цвета $U-B$, $B-V$, $V-Rc$ и $V-Ic$ в системе Крона – Кузинса. Основное отличие этих файлов состоит в том, что в последнем столбце в файле *varstars.hmm* приводится цифровой код предпочтительной звезды сравнения, относительно которой необходимо обрабатывать

значения блеска и показателей цвета той или иной переменной звезды. Алгоритм программы построен таким образом, что для каждой переменной звезды осуществляется поиск той звезды сравнения, цифровой код которой указан в последнем столбце в файле `varstars.hmm`. Меняя код звезды сравнения в этом файле, можно заставить программу обрабатывать значения блеска и показателей цвета переменной звезды относительно различных звезд сравнения.

В текстовом файле `mean_ext.hmm` содержатся значения среднемесячных коэффициентов экстинкции $\langle \alpha_V \rangle$, $\langle \alpha_{U-B} \rangle$, $\langle \alpha_{B-V} \rangle$, $\langle \alpha_{V-R} \rangle$ и $\langle \alpha_{V-I} \rangle$. Если программа обнаружит, что в течение наблюдательной ночи измерения экстинкции не производились, она обратится к этому файлу и загрузит из него средние для данного месяца значения экстинкции в соответствующие переменные. В текстовом файле `option.hmm` содержатся географические координаты того или иного телескопа, разница между всемирным и местным временем, а также временные интервалы для поиска измерений фона, звезды сравнения, экстинкционной и редуccionной звезд. Параметры, приведенные в этом файле, позволяют корректно вычислять звездное время, воздушную массу, часовой угол, юлианскую дату и корректировать процедуры выбора выбора как измерений фона, так и измерений звезд сравнения, редуccionных и экстинкционных звезд.

В файле `telescop.hmm` содержится информация с именем телескопа, коэффициентами нелинейности его приемной аппаратуры, временными интервалами (обозначающими наблюдательные сезоны) и соответствующими им коэффициентами трансформации от стандартной фотометрической системы к инструментальной: k_V , k_{UB} , k_{BV} , k_{VR} , k_{VI} , k_{2V} . Последний коэффициент используется в том случае, если вынос за атмосферу и редуccion к стандартной системе осуществляются с использованием измерений показателя цвета $V - R$, а не $B - V$. Обычно его применение оправдано при обработке ПЗС-наблюдений, когда измерения осуществлялись только в двух фотометрических полосах V и R .

4 Дифференциальный метод модуля Astro

Как было отмечено выше, в модуле `Astro` содержится 60 различных астрономических процедур, используемых в программе обработки фотометрических наблюдений. Как правило, они реализуют хорошо известные астрономические вычисления и нет необходимости в их подробном обсуждении. Тем не менее описанию возможностей нескольких процедур следует уделить некоторое внимание по той причине, что они позволяют реализовать так называемый дифференциальный метод обработки фотометрических наблюдений. Как показал опыт многолетних наблюдений в КрАО, параметры атмосферной экстинкции в этой обсерватории могут значительно изменяться не только от ночи к ночи, но и в течение нескольких часов или даже десятков минут. В таких условиях надежные оценки блеска и показателей цвета можно получить исключительно с помощью дифференциального метода.

Реализация дифференциального метода предполагает проведение квазиодновременных или одновременных (в случае использования ПЗС-фотометра) наблюдений переменной звезды и соседней с ней звезды сравнения. Такая методика позволяет практически исключить влияние переменной экстинкции. Предположим, что имеются наблюдения блеска переменной звезды в полосах V и R в инструментальной системе. Обозначим их измеренные значения как v_* и r_* . Тогда по аналогии с системой уравнений (14) для нее можно записать

$$\begin{cases} V_*^o = v_* - \alpha_{V_*} X_* + J_V + K_V(V - R)_*^o \\ (V - R)_*^o = J_c + K_c[(v - r)_* - \alpha_{VR_*} X_*], \end{cases} \quad (16)$$

где v_* и $(v - r)_*$ – измеренные значения блеска и показателя цвета переменной звезды в инструментальной системе, V_*^o и $(V - R)_*^o$ – заатмосферные значения блеска и цвета переменной звезды в стандартной системе, которые необходимо определить. Точно такую же систему уравнений можно записать для наблюдений блеска и показателя цвета звезды сравнения (стандарта), которые мы обозначим индексом s :

$$\begin{cases} V_s^o = v_s - \alpha_{V_s} X_s + J_V + K_V(V - R)_s^o \\ (V - R)_s^o = J_c + K_c[(v - r)_s - \alpha_{VR_s} X_s]. \end{cases} \quad (17)$$

Здесь следует отметить, что системы уравнений (16) и (17) записаны для самого общего случая, когда переменная и стандартная звезды измерялись в разное время и на различных воздушных

массах. Поэтому имеются два значения воздушной массы X_* и X_s . По той же причине имеются два значения экстинкции α_{V_*} и α_{V_s} и два цветовых фактора экстинкции α_{VR_*} и α_{VR_s} .

Вычитая первое уравнение системы (17) из первого уравнения системы (16) и проводя простые преобразования, можно получить следующее выражение:

$$V_*^o = V_s^o + \Delta v - \alpha_{V_*} X_* + \alpha_{V_s} X_s + K_V \Delta(V - R)^o, \quad (18)$$

где $\Delta(V - R)^o = (V - R)_*^o - (V - R)_s^o$ – разность показателей цвета переменной звезды и звезды сравнения в стандартной фотометрической системе, а $\Delta v = v_* - v_s$ – разность измеренных значений блеска переменной звезды и звезды сравнения. Учитывая, что значения α_{V_*} и α_{V_s} связаны соотношением (7), можно записать

$$\alpha_{V_*} = \alpha_{V_s} + \gamma_V [(v - r)_* - (v - r)_s] = \alpha_{V_s} + \gamma_V \Delta(v - r). \quad (19)$$

Подставляя выражение (19) в (18), получим окончательную рабочую формулу для вычисления блеска переменной звезды в стандартной фотометрической системе:

$$V_*^o = V_s^o + \Delta v - \alpha_{V_s} \Delta X - \gamma_V \Delta(v - r) X_* + K_V \Delta(V - R)^o, \quad (20)$$

где $\Delta X = X_* - X_s$ – разность воздушных масс переменной звезды и звезды сравнения, а $\Delta(v - r)$ – разность измеренных показателей цвета переменной звезды и звезды сравнения в инструментальной системе. Именно это уравнение используется в модуле **Astro** для вычисления блеска переменной звезды в стандартной фотометрической системе. Если известны коэффициенты редукции от стандартной системы к инструментальной, то в формуле (20) можно заменить значение K_V на отношение $-k_V/k_{VR}$ (см. формулу 15).

Из формулы (20) видно, что для определения звездной величины переменной звезды в полосе V необходимо сначала вычислить разность показателей цвета переменной звезды и звезды сравнения в стандартной фотометрической системе, в данном случае $\Delta(V - R)^o$. По аналогии с предыдущими выкладками вычтем второе уравнение системы (17) из второго уравнения системы (16) и получим следующее выражение:

$$\Delta(V - R)^o = K_{VR} [\Delta(v - r) - \alpha_{VR_*} X_* + \alpha_{VR_s} X_s]. \quad (21)$$

По аналогии с уравнением (19) выразим цветовой фактор экстинкции α_{VR_*} через α_{VR_s} :

$$\alpha_{VR_*} = \alpha_{VR_s} + \gamma_{VR} [(v - r)_* - (v - r)_s] = \alpha_{VR_s} + \gamma_{VR} \Delta(v - r). \quad (22)$$

Подставляя выражение (22) в (21), получим рабочую формулу для вычисления разности показателей цвета $V - R$ переменной звезды и звезды сравнения в стандартной фотометрической системе:

$$\Delta(V - R)^o = K_{VR} [\Delta(v - r) - \alpha_{VR_s} \Delta X - \gamma_{VR} \Delta(v - r) X_*], \quad (23)$$

откуда следует, что показатель цвета $V - R$ переменной звезды в стандартной системе можно вычислить по формуле

$$(V - R)_*^o = (V - R)_s^o + K_{VR} [\Delta(v - r) - \alpha_{VR_s} \Delta X - \gamma_{VR} \Delta(v - r) X_*]. \quad (24)$$

Вполне очевидно, что показатель цвета $V - I$ переменной звезды в стандартной системе можно получить из формулы

$$(V - I)_*^o = (V - I)_s^o + K_{VI} [\Delta(v - i) - \alpha_{VI_s} \Delta X - \gamma_{VI} \Delta(v - i) X_*]. \quad (25)$$

В случае вычисления показателей цвета $U - B$ и $B - V$ ситуация значительно осложняется тем обстоятельством, что цветовые факторы экстинкции α_{UB} и α_{BV} зависят не только от показателя цвета, но и от межзвездного покраснения, воздушной массы (эффект Форбса) и величины бальмеровского скачка. Следуя рекомендациям В. Страйжиса (1977), можно учесть все эти зависимости для цветового фактора экстинкции α_{UB} следующим образом:

$$\alpha_{UB} X = [\alpha_{0UB} + \gamma_{UB}(u - b)] X (1 + r_{UB} X), \quad (26)$$

где α_{0UB} – цветовой фактор экстинкции для звезды спектрального класса A0 V, $\gamma_{UB} = -0.012$ и коэффициент Форбса $r_{UB} = -0.028$. Первая часть выражения в квадратных скобках учитывает зависимость от показателя цвета, а последняя часть в круглых скобках – эффект Форбса.

Аналогичное выражение можно записать в случае цветового фактора экстинкции α_{BV} :

$$\alpha_{BV}X = [\alpha_{0BV} + \gamma_{BV}(b - v)]X(1 + r_{BV}X), \quad (27)$$

где α_{0BV} – цветовой фактор экстинкции для звезды спектрального класса A0 V, $\gamma_{BV} = -0.036$ и коэффициент Форбса $r_{BV} = -0.02$.

Тогда по аналогии с формулой (21) для разницы показателей цвета $\Delta(U - B)^\circ$ можно записать

$$\Delta(U - B)^\circ = K_{UB}[\Delta(u - b) - \alpha_{UB_*}X_* + \alpha_{UB_s}X_s]. \quad (28)$$

Расписывая выражения $\alpha_{UB_*}X_*$ и $\alpha_{UB_s}X_s$ согласно формуле (26), получим

$$\Delta(U - B)^\circ = K_{UB}[\Delta(u - b) - [\alpha_{0UB} + \gamma_{UB}(u - b)_*]X_*(1 + r_{UB}X_*) + [\alpha_{0UB} + \gamma_{UB}(u - b)_s]X_s(1 + r_{UB}X_s)]. \quad (29)$$

Продельвая аналогичные действия, можно получить формулу для вычисления $\Delta(B - V)^\circ$:

$$\Delta(B - V)^\circ = K_{BV}[\Delta(b - v) - [\alpha_{0BV} + \gamma_{BV}(b - v)_*]X_*(1 + r_{BV}X_*) + [\alpha_{0BV} + \gamma_{BV}(b - v)_s]X_s(1 + r_{BV}X_s)]. \quad (30)$$

Таким образом, дифференциальный метод вычисления блеска и показателей цвета переменной звезды в стандартной фотометрической системе *UBVRI* предполагает использование пяти уравнений: (20), (24), (25), (29) и (30). Эти вычисления реализованы в процедурах `DM_Vo_VR`, `DM_VRo`, `DM_VIo`, `DM_UBo` и `DM_BVo` соответственно. Кроме этого, предусмотрено определение блеска в стандартной системе с использованием показателя цвета $B - V$, если в анализируемых данных имеются наблюдения в полосе B . Для этой цели используется процедура `DM_Vo2`.

5 Модуль Reduction

Как было отмечено ранее, модуль `Reduction` содержит 19 различных процедур, которые работают с двумя родственными объектами – `Fon` и `Star`. Свойства и параметры этих объектов задаются в самом начале модуля. На рис. 2 представлен фрагмент модуля, где вводится определение объекта `Fon`. Из рисунка видно, что объект `Fon` определен как “запись”, у которой имеется набор свойств (параметров): дата и время наблюдения, цифровой код объекта, прямое восхождение и склонение, число измеренных фильтров, часовой угол, воздушная масса, зарегистрированные потоки и моменты их регистрации для всех фильтров (*UBVRI*). Далее, в модуле определен родственный объект `Star` и реализованы 19 процедур, которые работают с этими объектами так или иначе.

Чтобы получить общее представление о возможностях модуля `Reduction`, достаточно кратко описать входящие в него процедуры.

Процедура `TakeOptions` читает из специального текстового файла `options.hmm` координаты обсерватории, разницу между местным и всемирным временем, интервалы времени для поиска фона, звезды сравнения, экстинкционной звезды, редуccionной звезды и заносит найденные значения в соответствующие переменные, определенные в модуле.

Процедура `TakeTelOptions` ищет коэффициент нелинейности и список коэффициентов редуccion для конкретного телескопа и конкретной даты наблюдений в текстовом файле `telescope.hmm` и заносит эти данные в соответствующие переменные модуля.

Процедуры `TakeCoord` и `TakeMag` ищут в текстовом файле `varstars.hmm` (`cmpstars.hmm`) координаты, блеск и показатели цвета звезды с конкретным пятизначным кодом и заносят их в соответствующие поля объекта `Star`.

Процедура `TakeMeanExt` ищет среднемесячные коэффициенты экстинкции в текстовом файле `mean_ext.hmm` и заносит их в соответствующие переменные модуля.

Процедура `TakeMeanExtforNight` ищет коэффициенты экстинкции, измеренные в течение текущей наблюдательной ночи из файла `*.ext`, вычисляет среднюю экстинкцию за ночь и заносит ее в соответствующую переменную модуля.

Процедура `TakeComStar` ищет для конкретного объекта с пятизначным кодом (для измеренной переменной звезды) рекомендуемую звезду сравнения из файла `cmpstars.txt` и заносит ее код и другие измеренные параметры в соответствующие переменные.

```

UNIT Reduction;
      { A product of Grankin K.N. 2009 }
      {          27.09.2009          }
-----
                        INTERFACE
-----
Uses Astro, Matfunc, SysUtils;
Type
  Float = double;
-----
Fon = record
  DateObs : string[10];           { запись для объекта Фон }
  TimeObs : string[8]; { время в формате: 'hh:mm:ss' для фильтра U }
  CodN    : String;              { код объекта (звезды/фона) }
  C : record
    Alp, Del : Float;           { прямое восхождение и склонение }
  end;
  ObU : record
    n,t : Float;
  end;
  ObB : record
    n,t : Float;
  end;
  ObV : record
    n,t : Float;
  end;
  ObR : record
    n,t : Float;
  end;
  ObI : record
    n,t : Float;
  end;
  Nfil : Integer;               { число измеренных фильтров (2,3,4 или 5) }
  TA : Float;                   { часовой угол (0h-24h) }
  AM : record                   { воздушная масса }
    MU, MB, MV, MR, MI : Float;
  end;
end; // FonS
-----

```

Рис. 2. Начальный фрагмент модуля Reduction с определением свойств объекта Fon

Процедура `ReadStrObs` читает одну строку из файла с наблюдениями и извлекает из нее пятизначный код и имя измеренной звезды (фона), фильтр, момент времени измерения, измеренный поток, координаты, часовой угол и воздушную массу.

Процедуры `InsFonObs` и `InsStarObs` работают с динамическими массивами, элементами которых являются объекты типа `Fon` и `Star` соответственно. Фактически они заполняют эти массивы данными наблюдений всех фонов и звезд, которые наблюдались в течение конкретной наблюдательной ночи.

Процедура `SearchF` читает динамический массив записей типа `Fon` размерностью `N` и ищет в нем фон для конкретной записи типа `Star` в соответствии с заданным критерием поиска (по имени объекта или по моменту времени наблюдения).

Процедура `UchF` вычитает найденный фон из измерений конкретного текущего объекта типа `Star` с учетом всех использованных фильтров (от двух до пяти).

Процедура `SearchComStar` читает динамический массив записей типа `Star` размерностью `N` (с данными об измеренных звездах сравнения) и ищет в нем звезду сравнения для текущей записи типа `Star` (для конкретной переменной звезды).

Процедура `Diff_Method` реализует дифференциальный метод вычисления блеска и показателей цвета с использованием нескольких процедур из модуля `Astro`, которые уже описаны в соответствующем разделе.

Процедура `Extin2` реализует наиболее простой метод вычисления экстинкции по паре звезд с очень близкими показателями цвета и заносит вычисленные значения α_V , α_{UB} , α_{BV} , α_{VR} и α_{VI} в соответствующие переменные.

Процедура `Reduc2` вычисляет коэффициенты трансформации к стандартной системе по паре звезд с различными цветами, которые имели на момент наблюдения почти одинаковые воздушные массы ($\Delta X = 0$).

Процедура `forReduc` готовит данные для вычисления коэффициентов трансформации к стандартной системе по всем измеренным стандартным звездам.

Процедура `Instr_UBVRto` выносит измеренный блеск и показатели цвета объекта типа `Star` за атмосферу с заданными коэффициентами экстинкции и заносит их в соответствующие переменные. Таким образом, она позволяет вычислить заатмосферные значения блеска и показателей цвета объекта в инструментальной системе.

Для лучшего понимания возможностей модуля `Reduction` следует немного подробнее обсудить свойства некоторых из его процедур. Что касается процедуры `Extin2`, то она обеспечивает получение надежных оценок коэффициентов экстинкции только в том случае, если выбранная пара экстинкционных звезд имеет близкие показатели цвета. В идеальном случае, следует выбрать пару звезд спектрального класса `A0 V`, у которых показатели цвета близки к нулю. Тогда для этих звезд можно записать систему уравнений типа (16):

$$\begin{cases} V_1^\circ = v_1 - \alpha_{V_1} X_1 + J_V + K_V (V - R)_1^\circ \\ V_2^\circ = v_2 - \alpha_{V_2} X_2 + J_V + K_V (V - R)_2^\circ \end{cases} \quad (31)$$

Поскольку показатели цвета выбранных звезд очень близки, то согласно формуле (7) можно записать, что $\alpha_{V_1} = \alpha_{V_2} = \alpha_V$. Вычитая одно выражение из другого и выражая α_V , получим

$$\alpha_V = \frac{1}{\Delta X} [\Delta v_{12} - \Delta V_{12}^\circ + K_V \Delta (V - R)_{12}^\circ], \quad (32)$$

где $\Delta X = (X_1 - X_2)$ – разность воздушных масс, $\Delta v_{12} = (v_1 - v_2)$ – измеренная разность блеска двух экстинкционных звезд, $\Delta V_{12}^\circ = (V_1^\circ - V_2^\circ)$ – разность блеска экстинкционных звезд в стандартной системе, $\Delta (V - R)_{12}^\circ = (V - R)_1^\circ - (V - R)_2^\circ$ – разность показателей цвета экстинкционных звезд в стандартной системе, K_V – соответствующий коэффициент трансформации от инструментальной системы к стандартной. Поскольку в пакете программ используются коэффициенты трансформации от стандартной системы к инструментальной (обозначенные маленькими буквами), то полезно помнить, что $K_V = -\frac{k_V}{k_{VR}}$.

Используя уравнение (23) и заменив в нем переменную звезду и звезду сравнения на две экстинкционные звезды 1 и 2, легко получить выражение для вычисления цветового фактора экстинкции α_{VR} :

$$\alpha_{VR} = \frac{1}{\Delta X} [\Delta (v - r)_{12} - \frac{1}{K_{VR}} \Delta (V - R)_{12}^\circ], \quad (33)$$

где $\Delta (v - r)_{12} = (v - r)_1 - (v - r)_2$ – измеренная разность показателей цвета двух экстинкционных звезд, а остальные обозначения как в формуле (32).

Совершенно аналогично можно получить выражение для вычисления цветового фактора экстинкции α_{VI} с использованием уравнения (25):

$$\alpha_{VI} = \frac{1}{\Delta X} [\Delta (v - i)_{12} - \frac{1}{K_{VI}} \Delta (V - I)_{12}^\circ]. \quad (34)$$

Ситуация с вычислением α_{BV} и α_{UB} несколько сложнее из-за причин, описанных выше. В модуле `Reduction` вычисление значений α_{BV} и α_{UB} осуществляется по аналогичным формулам:

$$\alpha_{BV} = \frac{1}{\Delta X} [\Delta (b - v)_{12} - \frac{1}{K_{BV}} \Delta (B - V)_{12}^\circ] \quad (35)$$

и

$$\alpha_{UB} = \frac{1}{\Delta X} [\Delta (u - b)_{12} - \frac{1}{K_{UB}} \Delta (U - B)_{12}^\circ] \quad (36)$$

с тем отличием, что $\Delta X = X'_1 - X'_2 = X_1(1 + rX_1) - X_2(1 + rX_2)$, где r – это коэффициент Форбса $r_{BV} = -0.02$ для формулы (35) или $r_{UB} = -0.028$ для формулы (36).

Опуская подробности отметим, что процедура `Reduc2` осуществляет вычисление коэффициентов трансформации к стандартной системе по паре звезд, которые имеют различные показатели цвета, но расположены при этом достаточно близко ($\Delta X = 0$). Используя формулу (20), можно записать выражение для вычисления значения K_V в общем виде:

$$K_V = [\Delta V_{12}^\circ - \Delta v_{12} + \alpha_V \Delta X + \gamma_V \Delta (v - r)_{12} X_1] / \Delta (V - R)_{12}^\circ. \quad (37)$$

Поступая аналогичным образом и используя формулы (23) и (25), получаем выражения для вычисления K_{VR} и K_{VI} :

$$K_{VR} = \Delta(V - R)_{12}^{\circ} / [\Delta(v - r)_{12} - \alpha_{VR}\Delta X - \gamma_{VR}\Delta(v - r)_{12}X_1], \quad (38)$$

$$K_{VI} = \Delta(V - I)_{12}^{\circ} / [\Delta(v - i)_{12} - \alpha_{VI}\Delta X - \gamma_{VI}\Delta(v - r)_{12}X_1]. \quad (39)$$

Вычисление значений коэффициентов K_{BV} и K_{UB} реализовано следующим образом:

$$K_{BV} = \Delta(B - V)_{12}^{\circ} / [\Delta(b - v)_{12} - \alpha_{BV}\Delta X' - \gamma_{BV}\{(b - v)_2X'_2 - (b - v)_1X'_1\}], \quad (40)$$

$$K_{UB} = \Delta(U - B)_{12}^{\circ} / [\Delta(u - b)_{12} - \alpha_{UB}\Delta X' - \gamma_{UB}\{(u - b)_2X'_2 - (u - b)_1X'_1\}], \quad (41)$$

где $\Delta X' = X'_1 - X'_2$, $X'_1 = X_1(1 + rX_1)$, $X'_2 = X_2(1 + rX_2)$, а r – это коэффициент Форбса $r_{BV} = -0.02$ для формулы (40) или $r_{UB} = -0.028$ для формулы (41).

Наконец, процедура `Instr_UBVRIo` вычисляет заатмосферные значения блеска и показателей цвета объекта типа `Star` в инструментальной системе с учетом текущих коэффициентов экстинкции. Эта процедура активно используется в данном пакете программ при реализации метода Никонова (1976), описание алгоритма которого выходит за рамки настоящей статьи.

6 Модуль НММ

Основной модуль НММ4 реализует возможности пакета программ через простой графический интерфейс, в котором все функции пакета вызываются через главное меню графического окна. На рис. 3 представлена верхняя часть графического окна при выборе того или иного пункта меню. Пункт меню `File` позволяет загрузить файл с наблюдениями (*.obs) или завершить работу пакета (рис. 3a). Пункт меню `Extinction` открывает выпадающий список, в котором можно выбрать различные варианты вычисления атмосферной экстинкции: (1) по паре экстинкционных звезд, (2) методом Никонова или (3) усреднением всех доступных значений экстинкции (рис. 3b). Пункт меню `Reduction` позволяет вычислить коэффициенты редукции двумя способами: (1) по паре звезд или (2) по всем звездам (рис. 3c). В результате реализации первого способа алгоритм ищет пары редукционных звезд в файле с наблюдениями в пределах одной конкретной наблюдательной ночи. Вычислительные процедуры были представлены в предыдущем разделе. Второй способ ориентирован на работу со специальным файлом, в котором заранее собраны измерения большой группы редукционных звезд, полученные в различные ночи. Наконец, последний пункт главного меню запускает алгоритм обработки наблюдений переменных звезд с помощью дифференциального метода (рис. 3d).

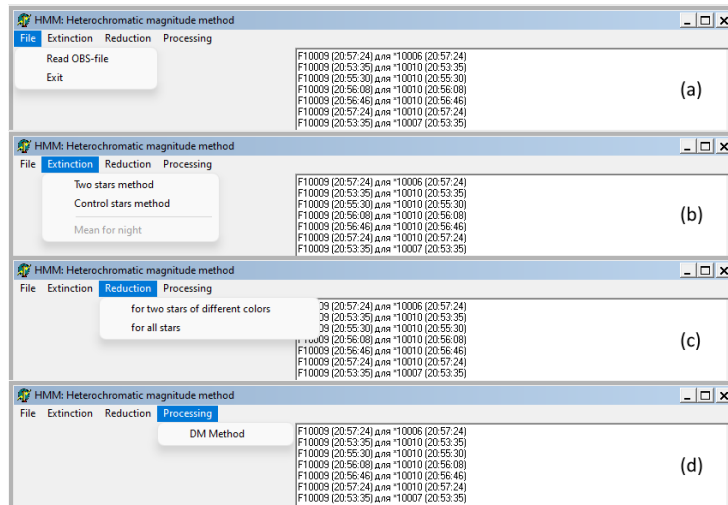


Рис. 3. Верхняя часть графического окна модуля НММ4 при активизации пунктов основного меню: `File` (a), `Extinction` (b), `Reduction` (c) и `Processing` (d)

```

Date:      09-Mar-2017
Telescope: AZT-11
Longitude: 2.2678
Latitude : 44.7269
Observer:  Grankin
UT := TD - 3
#
;
; Name HH:MM:SS F Count N Disp Er% Sigm RA(h) D(gr) TA AM
;
C 20001 21:29:21 U 2.167 6 0.167 9.8 0.000 3.9480 28.7628 3.98 1.71
C 20001 21:29:21 B 16.667 6 2.667 9.8 0.000 3.9480 28.7628 3.98 1.71
C 20001 21:29:21 U 9.333 6 0.667 8.7 0.000 3.9480 28.7628 3.98 1.71
C 20001 21:29:21 R 47.833 6 8.167 6.0 0.000 3.9480 28.7628 3.98 1.71
C 20001 21:29:21 I 47.833 6 0.167 0.9 0.000 3.9480 28.7628 3.98 1.71
F 11423 21:43:08 U 601.556 18 108.732 1.7 0.000 4.8005 17.0745 3.36 1.56
F 11423 21:43:08 B 781.222 18 62.065 1.0 0.000 4.8005 17.0745 3.36 1.56
F 11423 21:43:08 U 324.500 18 34.147 1.8 0.000 4.8005 17.0745 3.36 1.56
F 11423 21:43:08 R 1145.556 18 687.908 2.3 0.000 4.8005 17.0745 3.36 1.56
F 11423 21:43:08 I 395.833 18 50.029 1.8 0.000 4.8005 17.0745 3.36 1.56
* 11423 21:43:08 U 604.500 18 69.794 1.4 0.951 4.8005 17.0745 3.36 1.56
* 11423 21:43:08 B 958.500 18 153.088 1.3 0.019 4.8005 17.0745 3.36 1.56
* 11423 21:43:08 U 799.722 18 122.095 1.4 0.006 4.8005 17.0745 3.36 1.56
* 11423 21:43:08 R 12105.556 18 17199.085 1.1 0.001 4.8005 17.0745 3.36 1.56
* 11423 21:43:08 I 8317.000 18 3987.882 0.8 0.001 4.8005 17.0745 3.36 1.56
F 20423 21:51:17 U 615.000 12 96.727 1.6 0.000 4.8144 17.0559 3.48 1.60
F 20423 21:51:17 B 793.167 12 86.333 1.2 0.000 4.8144 17.0559 3.48 1.60
F 20423 21:51:17 U 330.333 12 31.697 1.7 0.000 4.8144 17.0559 3.48 1.60
F 20423 21:51:17 R 1154.000 12 269.818 1.4 0.000 4.8144 17.0559 3.48 1.60
F 20423 21:51:17 I 396.083 12 22.992 1.2 0.000 4.8144 17.0559 3.48 1.60
* 20423 21:51:17 U 851.167 12 316.152 2.1 0.016 4.8144 17.0559 3.48 1.60
* 20423 21:51:17 B 1617.583 12 202.811 0.9 0.006 4.8144 17.0559 3.48 1.60
* 20423 21:51:17 U 1021.167 12 178.333 1.3 0.005 4.8144 17.0559 3.48 1.60
* 20423 21:51:17 R 5956.500 12 13773.545 2.0 0.002 4.8144 17.0559 3.48 1.60
* 20423 21:51:17 I 2218.333 12 477.515 1.0 0.003 4.8144 17.0559 3.48 1.60

```

Рис. 4. Фрагмент файла 20170309.obs с фотометрическими измерениями, полученными на AZT-11 с пятиканальным фотометром-поляриметром

При выборе меню File/Read OBS-file открывается диалоговое окно, предлагающее выбор того или иного файла с наблюдениями. В качестве примера на рис. 4 представлен фрагмент такого файла с фотометрическими наблюдениями, полученными на телескопе AZT-11 с пятиканальным фотометром-поляриметром 9 марта 2017 г. Данные наблюдений и их предварительный анализ представлены в определенном формате: (1) специальный символ, обозначающий измерение темнового тока (C) или фона (F), или звезды (*); (2) пятизначный код измеренного объекта; (3) момент времени, когда было сделано измерение; (4) использованный фильтр; (5) измеренный поток за одну секунду; (6) число экспозиций; (7) и (8) – дисперсия величины потока в абсолютном и процентном выражении; (9) оценка ошибки измерения блеска в звездных величинах; (10) и (11) – прямое восхождение и склонение объекта; (12) часовой угол; (13) воздушная масса. Файл такого формата создается заранее с помощью специальной самостоятельной программы `formatting for NMM`. Эта программа читает исходные данные, полученные на различных приборах (на одноканальном фотометре, на пятиканальном фотометре-поляриметре, на ПЗС), выполняет необходимые вычисления (среднего значения потока, дисперсии, часового угла, воздушной массы), приводит полученные значения к специальному формату и записывает их в файл с именем `yyyyymmdd.obs`.

Во время загрузки файла с наблюдениями осуществляется анализ поступающей информации и формируются три динамических массива записей с измерениями фона, переменных звезд и контрольных звезд. Затем происходит автоматическая инициализация этих массивов. Результаты загрузки данных отображаются в графическом окне программы, а анализ этих данных выводится в специальный файл с расширением `*.log`. Пример такого файла показан на рис. 5. В нем содержатся результаты анализа данных наблюдений из файла 20170309.obs (рис. 4). Из рис. 5 видно, какие данные были загружены в специальные переменные, сколько измерений переменных звезд, звезд сравнения и оценок фона было выполнено за ночь, приводятся имена объектов и их основные характеристики (цифровой код, координаты, время наблюдения, воздушная масса, часовой угол и число измеренных фильтров). Эти характеристики используются в дальнейшем для реализации тех или иных действий с объектами. Например, на завершающем этапе загрузки данных запускается процедура поиска измерений фона для того или иного объекта, результаты которой можно видеть в нижней части рис. 5. Алгоритм этой процедуры построен таким образом, что в первую очередь осуществляется поиск фона с таким же кодом, как и у звезды. Если было выполнено несколько измерений фона, то выбирается ближайшее по времени. Если измерения фона производились как до, так и после измерений звезды (например, во время восхода или захода Луны), то выбираются два

```

Date:      09-Mar-2017
Telescope: AZT-11
Longitude: 2.2678
Latitude  : 44.7269
Observer:  Grankin
UT := TD - 3
-----
Нелинейность: 0
Кэфф-ты редуции: -0.051(U) 0.9271(UB) 1.173(BU) 0.7332(UR) 0.891(UI)
-----
Средние кэфф-ты экстинкции для Mar:
0.14 (U) 0.22 (UB) 0.06 (BU) 0.09 (UR) 0.15 (UI)
-----
Всего наведений на контрольные звезды: 2
Всего наведений на переменные звезды: 3
Всего наведений на фон: 5
-----
Наблюдались следующие контрольные звезды:
-----
CodeSt  R.A.    Dec.    hh:mm:ss AM  TA  NF
-----
*20423  04.8144  17.0559 21:51:17 01.61 03.48 5
*20400  04.3782  28.4564 22:20:14 01.70 04.41 5
-----
Наблюдались следующие переменные звезды:
-----
CodeSt  R.A.    Dec.    hh:mm:ss AM  TA  NF
-----
*11423  04.8005  17.0745 21:43:08 01.56 03.36 5
*11419  04.6086  24.2844 22:13:46 01.65 04.07 5
*10410  04.3265  28.4973 22:24:58 01.75 04.54 5
-----
Выбор фона для контрольных звезд:
Полунтервал поиска фона: 0:40
Фон до звезды      Звезда      Фон после звезды
-----
F20423 (21:51:17) для *20423 (21:51:17)
F20400 (22:20:14) для *20400 (22:20:14)
-----
Выбор фона для переменных звезд:
Полунтервал поиска фона: 0:40
Фон до звезды      Звезда      Фон после звезды
-----
F11423 (21:43:08) для *11423 (21:43:08)
F11419 (22:13:46) для *11419 (22:13:46)
F10410 (22:24:58) для *10410 (22:24:58)
-----

```

Рис. 5. Результаты предварительного анализа файла с наблюдениями после его загрузки в программу

ближайших измерения фона (одно до измерений звезды, другое после) и проводится интерполяция значений фона на момент наблюдения конкретной звезды в каждом фильтре.

После процедуры чтения файла с наблюдениями, его анализа, инициализации переменных и динамических массивов записей можно приступить к вычислению атмосферной экстинкции (меню *Extinction*), коэффициентов редуции (меню *Reduction*) или значений блеска и показателей цвета переменных звезд (меню *Processing*). Процедуры вычисления экстинкции или коэффициентов редуции по двум звездам описаны в соответствующих разделах ранее. Для корректной работы этих процедур необходимо выполнить наблюдения стандартных звезд по определенной схеме. При вычислении экстинкции должны быть получены квазиодновременные наблюдения двух звезд с нулевыми показателями цвета (спектрального класса A0 V), находящихся на разных воздушных массах. В случае вычисления коэффициентов редуции пара звезд со значительными различиями в показателях цвета должна наблюдаться квазиодновременно на одной и той же воздушной массе. Без соблюдения этих требований названные выше процедуры (*Extinction/Two stars method* и *Reduction/for two stars of different colors*) дадут ошибочные результаты.

В меню *Extinction* можно выбрать еще один вариант вычисления атмосферной экстинкции, который называется методом Никонова или методом контрольных звезд (как называл его сам автор). Идеи метода контрольных звезд неоднократно излагались в различных публикациях и нет необходимости останавливаться на них подробно (Никонов, 1973, 1976; Страйжис, 1977; Миронов, 2008). Отметим только, что этот метод лучше всего приспособлен к специально организованным фотометрическим наблюдениям, которые ориентированы в первую очередь на создание фундаментальных фотометрических каталогов. Особенностью метода Никонова является то, что он не требует априорного знания точных внеатмосферных значений блеска и показателей цвета как основной

экстинкционной, так и вспомогательных контрольных звезд. Требуется только, чтобы внеатмосферные величины этих звезд были постоянными. В течение ночи проводятся многократные измерения экстинкционной звезды и в определенные моменты времени – контрольных звезд. Затем методом последовательных приближений уточняются как значения блеска экстинкционной и контрольных звезд, так и мгновенные коэффициенты экстинкции. Алгоритм, реализующий метод Никонова, достаточно сложен и его описание выходит за рамки настоящей статьи.

Наконец, в меню **Processing** реализован дифференциальный метод вычисления блеска и показателей цвета переменных звезд в стандартной системе. При выборе этого элемента меню (**Processing/DM Method**) запускается специальная процедура, реализованная в модуле **HMM4**, которая организует цикл по динамическому массиву записей с наблюдениями переменных звезд. Для каждой записи (в которой находится один цикл *UBVRI*-измерений переменной звезды) производится поиск звезды сравнения в динамическом массиве записей звезд сравнения. Алгоритм процедуры выбора звезды сравнения аналогичен алгоритму поиска фона, описанному выше. Результаты выбора звезды сравнения заносятся в файл *.log. На рис. 6 представлен соответствующий фрагмент файла 20170309.log. После выбора звезды сравнения производится вычисление блеска и показателей цвета, а окончательные результаты обработки фотометрических наблюдений записываются в текстовый файл *.mag (рис. 7).

```
-----
Выбор звезд сравнения:
Полуинтервал поиска звезды сравнения: 0:50
ЗС до          Переменная          ЗС после
-----
                для *11423 (21:43:08) *20423 (21:51:17)
                для *11419 (22:13:46) *20400 (22:20:14)
*20400 (22:20:14) для *10410 (22:24:58)
-----
```

Рис. 6. Результаты поиска звезд сравнения, записанные в файл 20170309.log

```
Date:      09-Mar-2017
Telescope: A2T-11
Longitude: 2.2678
Latitude : 44.7269
Observer:  Granikin
UT := TD - 3
-----
Object   Code   JDH      U      U-B    B-V    U-R    U-I    U(U-R) Te1  Obs
-----
DR Tau   *11423 2457822.2793 11.390  3.475  2.408  2.070  9.999  11.372 A2T-11 Gr
DN Tau   *11419 2457822.3004 12.098  2.940  1.797 -0.308  9.999  12.209 A2T-11 Gr
U410Tau  *10410 2457822.3079 10.719  0.987  1.156  0.830  1.759  10.696 A2T-11 Gr
-----
```

Рис. 7. Результаты обработки фотометрических наблюдений в файле 20170309.mag

Из рис. 7 видно, что в шапке текстового файла *.mag содержится следующая информация: дата наблюдений, телескоп, широта и долгота обсерватории (телескопа), фамилия наблюдателя, разница между местным и всемирным временем. В основном теле файла находятся непосредственно данные: имя объекта, его пятизначный цифровой код, юлианская дата, звездная величина в полосе *V* (определенная с использованием показателя цвета $B - V$), показатели цвета $U - B$, $B - V$, $V - R$, $V - I$, еще раз блеск в полосе *V*, но вычисленный с использованием показателя цвета $V - R$, код телескопа и код наблюдателя. Если по различным причинам не удалось вычислить какой-либо показатель цвета, его значение устанавливается равным 9.999.

7 Заключение

В 1980–1990-х годах проводились массовые многоцветные фотометрические наблюдения десятков молодых звезд в различных областях звездообразования. В результате осуществления этих программ были получены сотни тысяч измерений блеска в широкополосной фотометрической системе

UBVRI. Поскольку цели и задачи наблюдательных программ различались, методики проведения наблюдений и последующей обработки данных также были разными. Одна из таких наблюдательных программ была успешно реализована на высокогорной Майданакской обсерватории в Узбекистане. В период с 1984 по 2006 годы в рамках программы ROTOR было получено более 100 тысяч *UBVR*-измерений для 370 объектов из различных областей звездообразования. Такое значительное количество фотометрических данных удалось собрать и обработать благодаря тщательно организованной программе наблюдений и использованию специально разработанного пакета программ обработки многоцветной фотометрии.

Пакет программ обработки фотометрических данных НММ реализован в среде программирования Delphi с использованием принципов объектно-ориентированного программирования и возможностей работы с динамическими массивами данных. Структурно пакет программ состоит из четырех модулей, в которых реализованы различные процедуры и функции для работы с родственными объектами (записями) типа Fon или Star. Каждому такому объекту поставлены в соответствие определенные поля (свойства), такие как уникальный пятизначный цифровой код, дата и время наблюдения, прямое восхождение и склонение, число фильтров, измеренные потоки и др. Во время инициализации программы и чтения файла с наблюдениями формируются три динамических массива, элементами которых являются записи, содержащие измерения фона, звезд сравнения и переменных звезд. Для каждой записи типа “переменная звезда” с помощью специальных процедур организован сложный алгоритм поиска подходящего фона и звезды сравнения. Алгоритм поиска использует различные критерии: (1) цифровой код предпочтительного фона или звезды сравнения, (2) временной интервал, в пределах которого необходимо искать подходящий фон или звезду сравнения, (3) допустимый диапазон разности воздушных масс.

Пакет НММ обладает широкими возможностями, включая: (1) вычисление атмосферной экстинкции по паре звезд или методом Никонова, (2) определение коэффициентов редукции к стандартной фотометрической системе как по парам стандартных звезд, так и по всем стандартным звездам, измеренным в различные ночи, (3) получение значений блеска и показателей цвета исследуемых объектов с помощью дифференциального метода.

Благодаря десяткам процедур и функций, организованных в четырех модулях, пакет НММ способен обрабатывать разнообразие типов наблюдений, полученные в рамках различных программ с использованием разного оборудования. В частности, пакет НММ поддерживает: (1) мониторинговые наблюдения одного объекта и стандарта, полученные в течение нескольких часов, (2) наблюдения нескольких переменных звезд или стандартных звезд, расположенных в компактной области на небе (например, в скоплении), (3) продолжительные наблюдения большого числа переменных объектов, расположенных в различных участках неба, (4) специальные наблюдения с целью создания фундаментального фотометрического каталога.

Благодарности. Автор выражает благодарность референту за полезные замечания, которые позволили устранить ряд недостатков первоначального варианта статьи.

Литература

- Бердюгин А.В., Шаховской Н.М., 1993. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 87. С. 122–134. [Berdyugin A.V., Shakhovskoy N.M., 1993. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 87, pp. 122–134. (In Russ.)]
- Гранкин К.Н., Ибрагимов М.А., Кондратьев В.Б., Мельников С.Ю., Шевченко В.С., 1995. Астрон. журн. Т. 72. С. 894–904. [Grankin K.N., Ibragimov M.A., Kondratyev V.B., Melnikov S.Yu., Shevchenko V.S., 1995. Astron. zhurn., vol. 72, pp. 894–904. (In Russ.)]
- Килиячков Н.Н., 1980. Исследование быстропротекающих процессов в нестационарных звездах (Дис. канд. физ.-матем. наук). Ташкент: Астрофизика. [Kilyachkov N.N., 1980. Investigation of rapid processes in non-stationary stars, PhD thesis. Tashkent: Astrofizika. (In Russ.)]
- Мартынов Д.Я., 1977. Курс практической астрофизики. М.: Наука. [Martynov D.Ya., 1977. Course of Practical Astrophysics. Moscow: Nauka. (In Russ.)]
- Миронов А.В., 2008. Основы астротометрии. Практические основы фотометрии и спектrophотометрии звезд. М.: ФИЗМАТЛИТ. [Mironov A.V., 2008. Fundamentals of Astrophotometry: Practical Basics of Photometry and Spectrophotometry of Stars. Moscow: FIZMATLIT. (In Russ.)]

- Никонов В.Б., 1973. Фотоэлектрическая астрофотометрия. В кн. Курс астрофизики и звездной астрономии. Том 1. / Ред. Михайлов А.А. М.: Наука. [Nikonov V.B., 1973. Photoelectric Astrophotometry. In Mikhailov A.A. (Ed.), Course of Astrophysics and Stellar Astronomy, vol. 1. Moscow: Nauka. (In Russ.)]
- Никонов В.Б., 1976. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 54. С. 3–23. [Nikonov V.B., 1976. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 54, pp. 3–23. (In Russ.)]
- Страйжис В.Л., 1977. Многоцветная фотометрия звезд. Вильнюс: Мокслас. [Straižys V.L., 1977. Multicolor Photometry of Stars. Vilnius: Mokslas. (In Russ.)]
- Харди Х., 1967. Редукция фотоэлектрических наблюдений. В кн. Методы астрономии. / Ред. Хилтнер В.А. М.: Мир. [Hardy H., 1967. Reduction of Photoelectric Observations. In Hiltner W.A. (Ed.), Methods of Astronomy. Moscow: Mir. (In Russ.)]
- Чугайнов П.Ф., 1971. Методы фотоэлектрических наблюдений. В кн. Методы исследования переменных звезд. / Ред. Никонов В.Б. М.: Наука. [Chugainov P.F., 1971. Methods of Photoelectric Observations. In Nikonov V.B. (Ed.), Methods of Researching Variable Stars. Moscow: Nauka. (In Russ.)]
- Шевченко В.С., 1989. Ae/Be звезды Хербига. Ташкент: Фан. [Shevchenko V.S., 1989. Herbig Ae/Be Stars. Tashkent: Fan. (In Russ.)]
- Bouvier J., Bertout C., Bouchet P., 1988. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., vol. 75, pp. 1–19.
- Bouvier J., Wichmann R., Grankin K., Allain S., Covino E., et al., 1997. Astron. Astrophys., vol. 318, pp. 495–505.
- Ehgamberdiev S.A., Baijumanov A.K., Ilyasov S.P., et al., 2000. Astron. Astrophys., vol. 145, pp. 293–304.
- Grankin K.N., Melnikov S.Yu., Bouvier J., Herbst W., Shevchenko V.S., 2007. Astron. Astrophys., vol. 461, pp. 183–195.
- Grankin K.N., Bouvier J., Herbst W., Melnikov S.Yu., 2008. Astron. Astrophys., vol. 479, pp. 827–843.
- Grankin K.N., 2013. Astron. Lett., vol. 39, pp. 251–266.
- Herbst W., Shevchenko V.S., 1999. Astron. J., vol. 118, pp. 1043–1060.
- Herbst W., Booth J.F., Koret D.L., Zajtseva G.V., Kholotilov E., Shakhovskaya H.I., et al., 1987. Astron. J., vol. 94, pp. 137–149.
- Landolt A.U., 2009. Astron. J., vol. 137, pp. 4186–4269.
- Pirola V., 1975. Ann. Acad. Sci. Fennicae, Series A VI – Physica, no. 418.
- Rydgren A.E., Vrba F.J., 1983. Astron. J., vol. 88, pp. 1017–1026.

General approach to processing multicolor photometry of stars

K. Grankin

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
konstantin.grankin@craocrimea.ru

Abstract. The paper considers a general approach to processing multicolor photometry of stars in the broadband *UBVRI* system. We present basic formulas for calculating stellar magnitudes and color indices of the objects under study, as well as those for taking into account atmospheric extinction and determining the reduction factors to the standard photometric system. The properties of procedures and functions implemented in the HMM software package are discussed. The differential method for calculating the brightness and color indices of the object under study in the standard *UBVRI* photometric system is described in detail. It is noted that the HMM software package allows processing various types of photometric data: (1) monitoring observations of an object, (2) observations of several objects located in a compact region of the sky, (3) long-term observations of several objects located in different parts of the sky, (4) special observations for the purpose of creating a fundamental photometric catalog.

Key words: methods for studying variable stars, photometric data reduction, atmospheric extinction