

УДК 520.8, 520.82, 520.8.07

## Реализация метода Никонова в пакете программ НММ

*К.Н. Гранкин*

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым  
*konstantin.grankin@craocrimea.ru*

Поступила в редакцию 6 мая 2025 г.

**Аннотация.** Приводится краткое обсуждение основных идей метода Никонова (метода контрольных звезд), позволяющего регистрировать изменения атмосферной экстинкции в течение наблюдательной ночи. Подробно описана реализация этого метода в пакете программ НММ (Heterochromatic Magnitude Method), который предназначен для обработки различных типов фотометрических наблюдений. Рассмотрен конкретный пример применения этого метода к реальным наблюдениям.

**Ключевые слова:** методы исследования переменных звезд, атмосферная экстинкция

### 1 Введение

В специальной литературе, посвященной методам фотометрических наблюдений и их обработке, можно встретить описания различных процедур учета атмосферной экстинкции и редукции инструментальных измерений к стандартной фотометрической системе (Харди, 1967; Чугайнов, 1971; Никонов, 1973; Мартынов, 1977; Страйжис, 1977; Миронов, 2008). В частности, среди них часто упоминаются метод пары, метод Стока, метод Харди – Ежикевича, метод Никонова, метод Сарычева. Выбор того или иного метода зависит от конкретных задач, которые необходимо решить наблюдателю. Кроме того, требуется учитывать такие факторы, как необходимая точность результатов наблюдений, ширина полос пропускания фотометрической системы, количество исследуемых объектов и особенности их расположения на небе, скважность наблюдений и другие.

В значительной степени выбор метода определяется качеством атмосферных условий на конкретной обсерватории. Так, существенные и быстрые изменения атмосферной экстинкции, если они не учитываются должным образом, могут заметно исказить результаты наблюдений. Эти вариации можно учесть, если проводить наблюдения дифференциальным методом или если используемый метод предполагает многократные измерения экстинкции в течение ночи.

Как раз метод Никонова предусматривает контроль изменений экстинкции в течение ночи. Экстинкция вычисляется по наблюдениям специальной стандартной (экстинкционной) звезды, которые выполняются через каждые 1–1.5 часа, в остальное время возможно наблюдение программных объектов. Во-первых, этот метод является самым экономичным с точки зрения временных затрат на измерения звезд сравнения. Во-вторых, он идеально подходит для создания фундаментальных фотометрических каталогов. В-третьих, этот метод удобно использовать во время специальных наблюдений большого числа стандартных звезд с целью определения коэффициентов редукции инструментальной системы к стандартной фотометрической системе.

В настоящей статье приводится краткое описание метода Никонова и его конкретная реализация в пакете программ НММ (Heterochromatic Magnitude Method), который предназначен для обработки различных типов фотометрических наблюдений (Гранкин, 2025).

### 2 Метод Никонова

Как уже было отмечено во Введении, метод Никонова предполагает постоянный контроль за атмосферной экстинкцией с помощью регулярных наблюдений специальной экстинкционной звезды

через равные интервалы времени, например через каждые 1–1.5 часа. Поскольку метод Никонова разрабатывался специально для создания фундаментальных фотометрических каталогов, он не требует априорного знания точных внеатмосферных величин и показателей цвета как самой экстинкционной звезды, так и группы контрольных звезд. Основное требование к экстинкционной и контрольным звездам состоит в том, чтобы они не меняли свой блеск и показатели цвета хотя бы в течение ночи, а лучше, чтобы они были постоянными.

Реализация метода Никонова начинается с вычисления предварительных значений заатмосферного блеска  $m_e'^o$  и показателя цвета  $c_e'^o$  экстинкционной звезды. Эти величины предлагается определять с использованием предварительных значений коэффициентов экстинкции  $\alpha'$  и  $\alpha'_c$ . Поскольку на начальном этапе мы не знаем, какой была экстинкция в конкретную дату наблюдений, [Миронов \(2008\)](#) предлагает использовать среднее значение экстинкции, типичное для данной обсерватории и для конкретного наблюдательного сезона. Тогда, используя средние значения экстинкции  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{\alpha}_c$ , можно определить предварительную заатмосферную величину и показатель цвета первого наблюдения экстинкционной звезды

$$\begin{cases} m_e'^o = m_{e,1} - \bar{\alpha}X_{e,1} \\ c_e'^o = c_{e,1} - \bar{\alpha}_cX_{e,1}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $X_{e,1}$  – воздушная масса экстинкционной звезды в первый момент наблюдений,  $m_{e,1}$  и  $c_{e,1}$  – измеренные значения блеска и показателя цвета экстинкционной звезды в первый момент времени. Вполне очевидно, что эти предварительные заатмосферные оценки связаны с истинными заатмосферными значениями экстинкции и с подлежащими определению поправками  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$  следующими уравнениями:

$$\begin{cases} m_e'^o = m_e^o + \delta m_e^o \\ c_e'^o = c_e^o + \delta c_e^o, \end{cases} \quad (2)$$

где  $m_e^o$  и  $c_e^o$  – истинные заатмосферные значения экстинкции. Теперь для всех остальных моментов наблюдений экстинкционной звезды можно определить предварительные значения изменяющихся коэффициентов экстинкции  $\alpha'_i$  и  $\alpha'_{c,i}$  как

$$\begin{cases} \alpha'_i = \frac{m_{e,i} - m_e'^o}{X_{e,i}} \\ \alpha'_{c,i} = \frac{c_{e,i} - c_e'^o}{X_{e,i}}, \end{cases} \quad (3)$$

которые, согласно (2), можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha'_i = \frac{m_{e,i} - m_e^o}{X_{e,i}} - \frac{\delta m_e^o}{X_{e,i}} = \alpha_i - \frac{\delta m_e^o}{X_{e,i}} \\ \alpha'_{c,i} = \frac{c_{e,i} - c_e^o}{X_{e,i}} - \frac{\delta c_e^o}{X_{e,i}} = \alpha_{c,i} - \frac{\delta c_e^o}{X_{e,i}}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  и  $\alpha_{c,i}$  – изменяющиеся истинные коэффициенты экстинкции. Из системы уравнений (4) видно, что погрешность, внесенная в коэффициенты экстинкции при использовании предварительных значений блеска и показателя цвета экстинкционной звезды  $m_e'^o$  и  $c_e'^o$ , равняется

$$\begin{cases} \delta \alpha_i = -\frac{\delta m_e^o}{X_{e,i}} \\ \delta \alpha_{c,i} = -\frac{\delta c_e^o}{X_{e,i}} \end{cases} \quad (5)$$

и определяется как величиной поправки  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$ , так и воздушной массой  $X_{e,i}$ , на которой наблюдалась экстинкционная звезда.

На следующем этапе реализации метода Никонова предусмотрено вычисление неизвестных поправок  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$  с использованием нескольких наблюдений контрольных звезд. Предполагается, что имеется не менее двух измерений одной контрольной звезды, полученных в моменты времени  $t_{k,j}$ . Поскольку во время наблюдений контрольной звезды экстинкция не измерялась, для выноса значений блеска и показателей цвета контрольной звезды за атмосферу предлагается использовать предварительные значения экстинкции  $\alpha'_i$  и  $\alpha'_{c,i}$ , проинтерполированные на моменты наблюдений

контрольной звезды  $t_{k,j}$ . Обозначим эти проинтерполированные предварительные значения экстинкции как  $\alpha'_j$  и  $\alpha'_{c,j}$ . Тогда предварительные заатмосферные величины и показатели цвета контрольной звезды можно вычислить следующим образом:

$$\begin{cases} m'_{k,j} = m_{k,j} - \alpha'_j X_{k,j} \\ c'_{k,j} = c_{k,j} - \alpha'_{c,j} X_{k,j}. \end{cases} \quad (6)$$

По аналогии с (4) для  $\alpha'_j$  и  $\alpha'_{c,j}$  можно записать

$$\begin{cases} \alpha'_j = \alpha_j - \frac{\delta m_e^o}{X_{e,j}} \\ \alpha'_{c,j} = \alpha_{c,j} - \frac{\delta c_e^o}{X_{e,j}}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $X_{e,j}$  – воздушная масса экстинкционной звезды на момент  $j$ -го измерения контрольной звезды. Подставляя (7) в (6), получим следующие выражения:

$$\begin{cases} m'_{k,j} = m_{k,j} - \alpha_j X_{k,j} - \frac{\delta m_e^o}{X_{e,j}} X_{k,j} = m_{k,j}^o - \delta m_e^o \eta_j \\ c'_{k,j} = c_{k,j} - \alpha_{c,j} X_{k,j} - \frac{\delta c_e^o}{X_{e,j}} X_{k,j} = c_{k,j}^o - \delta c_e^o \eta_j, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\eta_j = X_{k,j}/X_{e,j}$  – отношение воздушных масс, на которых находились контрольная и экстинкционная звезды на момент времени измерения контрольной звезды  $t_{k,j}$ . Если имеются хотя бы два независимых измерения контрольной звезды, то, записывая (8) для каждого измерения отдельно и вычитая одно из другого, можно определить искомые поправки  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$  по формулам

$$\begin{cases} \delta m_e^o = \frac{m'_{k,1} - m'_{k,2}}{\eta_2 - \eta_1} \\ \delta c_e^o = \frac{c'_{k,1} - c'_{k,2}}{\eta_2 - \eta_1}. \end{cases} \quad (9)$$

Из системы уравнений (9) видно, что для надежного определения поправок  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$  значения  $\eta_1$  и  $\eta_2$  должны различаться как можно больше. Если наблюдений контрольной звезды было больше двух или имеются наблюдения нескольких контрольных звезд, то искомые поправки можно найти способом наименьших квадратов, решая системы условных уравнений (9), составленных для пары измерений каждой контрольной звезды.

На следующем этапе обработки наблюдений по методу Никонова проводится вычисление точных значений заатмосферных значений блеска и показателя цвета экстинкционной звезды с учетом известных поправок  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$

$$\begin{cases} m_e^o = m_e'^o - \delta m_e^o \\ c_e^o = c_e'^o - \delta c_e^o \end{cases} \quad (10)$$

и заново определяются уже точные коэффициенты экстинкции

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{m_{e,i} - m_e^o}{X_{e,i}} \\ \alpha_{c,i} = \frac{c_{e,i} - c_e^o}{X_{e,i}}. \end{cases} \quad (11)$$

В.Б. Никонов замечает, что для круглогодичных наблюдений достаточно подобрать четыре-пять основных экстинкционных звезд. Когда одна из этой группы звезд проходит меридиан, две другие смежные звезды должны находиться на больших воздушных массах: одна на восходе, другая на заходе. Эти две соседние экстинкционные звезды могут выполнять роль контрольных для основной, находящейся близко к меридиану. Значения  $\eta$  для контрольных звезд должны меняться в значительных пределах, от 0.4 до 2.5. Для удобства планирования моментов наблюдений контрольных звезд В.Б. Никонов рекомендует построить и использовать график зависимости воздушной массы каждой экстинкционной звезды от звездного времени и график зависимости  $\eta$  от звездного времени для контрольных звезд. Имея эти графики под рукой, можно планировать наиболее благоприятные моменты для измерений экстинкционной и контрольных звезд.

В случае использования метода Никонова для наблюдений в широкополосной фотометрической системе *UBVRI* следует принимать во внимание зависимость коэффициентов экстинкции от показателя цвета, а также учитывать эффект Форбса на значительных воздушных массах. Чтобы свести к минимуму влияние этих зависимостей, рекомендуется в качестве экстинкционных и контрольных звезд выбирать хорошо известные стандартные звезды спектрального класса A0 V с показателями цвета, близкими к нулю.

### 3 Реализация метода Никонова

Метод Никонова реализован в основном модуле пакета программ НММ 4 в специальной процедуре, которая вызывается через главное меню графического окна программы: *Extinction / Control stars method*. Процедура получила название *Controlstarsmethod* на том основании, что В.Б. Никонов называл свой метод “методом контрольных звезд” (Никонов, 1976).

Алгоритм этой процедуры предусматривает работу с несколькими динамическими массивами, элементами которых являются объекты типа *Star*, *Ext* и *Instr*. Эти объекты определены как “записи” в дополнительном модуле *Reduction*. Каждый объект (запись) имеет набор определенных свойств (параметров). Так, объект типа *Star* имеет следующие параметры: дата и время наблюдения, цифровой код объекта, прямое восхождение и склонение, число измеренных фильтров, часовой угол, воздушная масса, значения блеска в стандартной фотометрической системе, код предполагаемой парной звезды сравнения (или переменной звезды), измеренные потоки и моменты их регистрации для всех фотометрических полос (см. рис. 1).

```

{-----}
Star = record                                { запись для объекта Звезда }
  DateObs : string[10];                      { дата в формате: 'DD:MM:YYYY' }
  TimeObs : string[8];                      { время в формате: 'hh:mm:ss' для 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;
  ObU : 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)
  UBURI : record                          // блеск в международной фотометр-ой системе
    Uo, UBo, BUo, URo, UIo, UoUR : Float;
  end;
  AM : record                             { воздушная масса }
    MU, MB, MU, MR, MI : Float;
  end;
  CodPair : String;                       // код объекта-пары (зв. сравнения или переменной)
end; // Star
{-----}

```

Рис. 1. Фрагмент модуля *Reduction* с определением свойств объекта *Star*

На основе объекта типа *Star* формируются два динамических массива *ExtStar* и *CntStar*, в которых содержатся наблюдения экстинкционной звезды и всех контрольных звезд соответственно. Еще два объекта типа *Ext* и *Instr* предназначены для хранения вычисляемых значений коэффициентов экстинкции, а также внеатмосферных значений блеска и показателей цвета контрольной звезды в инструментальной системе (см. рис. 2). На основе объекта типа *Ext* создаются два динамических массива *Extinction* и *Ext\_for\_cnt* с оценками коэффициентов экстинкции, определенными с помощью экстинкционной и контрольной (контрольных) звезд соответственно. Последний, пятый

динамический массив `Instr_Cnt` содержит объекты типа `Instr`, в которых сохраняются значения оценок блеска и показателей цвета контрольных звезд в инструментальной системе после выноса за атмосферу.

```

{-----}
Ext = record                                { запись для объекта Экстинкция }
  AU : record
    n, t : Float;
  end;
  AUB : record
    n, t : Float;
  end;
  ABU : record
    n, t : Float;
  end;
  AUR : record
    n, t : Float;
  end;
  AUI : record
    n, t : Float;
  end;
end; // Ext
{-----}
Instr = record                             { запись для хранения оценок блеска и цвета контр. зв-ды }
  Uo_cnt : Float;
  UBo_cnt : Float;
  BUo_cnt : Float;
  URo_cnt : Float;
  UIo_cnt : Float;
  teta : Float; // отношение воздушных масс контр. и экс-ой зв-д
end; // Ext
{-----}

```

**Рис. 2.** Фрагмент модуля `Reduction` с определением свойств объектов `Ext` и `Instr`

Алгоритм метода Никонова, реализованный в пакете программ НММ 4, проще объяснить на конкретном примере. С этой целью проанализируем фотометрические наблюдения, полученные 3 декабря 2011 года на телескопе АЗТ-11 с использованием пятиканального фотометра-поляриметра В. Пииролы. Для большей наглядности оставим в исходном файле `20111203.obs` только наблюдения экстинкционной и контрольной звезд, а наблюдения остальных стандартных и переменных звезд временно удалим. При начальной загрузке файла с наблюдениями основной модуль НММ 4 проанализирует его содержимое и сохранит результаты анализа в специальном файле с расширением `*.log`. Фрагмент файла `20111203.log` представлен на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что в нашем распоряжении имеются шесть измерений звезды с цифровым кодом 29702 на различных воздушных массах (от 1.40 до 2.85) и часовых углах (от  $23^h.34$  до  $04^h.06$ ) и три измерения звезды 21012 на воздушных массах от 1.42 до 2.90 и часовых углах от  $19^h.96$  до  $00^h.16$ . Подробная информация об этих звездах содержится во вспомогательном файле `cmpstars.hmm` и приведена в таблице 1.

**Таблица 1.** Параметры стандартных звезд из файла `cmpstars.hmm`

ID	R.A.	Dec.	Name	Vmag	$U - B$	$B - V$	$V - R$	$V - I$	Comment
29702	05:57:37	+00:13:44	SA_097_351	9.781	0.096	0.202	0.124	0.265	Landolt's star
21012	09:58:20	-00:25:23	SA_101_363	9.874	0.129	0.261	0.146	0.297	Landolt's star

В предыдущем разделе отмечалось, что для успешной реализации метода Никонова необходимо иметь несколько измерений экстинкционной звезды (не менее трех) и хотя бы два измерения контрольной звезды. При этом желательно, чтобы эти звезды имели показатели цвета, близкие к нулю. Из таблицы 1 видно, что значения показателей цвета звезд почти совпадают друг с другом и достаточно близки к нулю. Очевидно, что на роль экстинкционной звезды подходит звезда с кодом 29702, у которой имеется шесть измерений, а на роль контрольной звезды – 21012, имеющая три измерения.

После процедуры чтения файла с наблюдениями, его предварительного анализа, инициализации переменных и динамических массивов записей можно приступить к вычислению атмосферной

```

Date:      03-Dec-2011
Telescope: AZT-11
Longitude: 2.2678
Latitude : 44.7269
Observer:  Grankin
UT := TD - 2

-----
Козэф-ты редукции: -0.051(U)  0.9271(UB)  1.173(BV)  0.7332(UR)  0.891(UI)
-----
Средние коэф-ты экстинкции для Dec:
0.229 (U)  0.325 (UB)  0.156 (BV)  0.092 (UR)  0.110 (UI)
-----
Всего наведений на контрольные звезды: 9
Всего наведений на переменные звезды: 0
Всего наведений на фон: 9
-----
Наблюдались следующие контрольные звезды:
-----
CodeSt  R.A.      Dec.      hh:mm:ss  AM      TA      NF
-----
*29702  05.9706  00.2296  00:13:05  01.4217  23.34  5
*29702  05.9706  00.2296  00:45:47  01.4013  23.89  5
*21012  09.9825 -00.4807  00:50:32  02.9033  19.96  5
*29702  05.9706  00.2296  00:55:34  01.4008  00.05  5
*29702  05.9706  00.2296  02:01:29  01.4590  01.09  5
*29702  05.9706  00.2296  03:41:54  01.8646  02.77  5
*21012  09.9825 -00.4807  04:53:56  01.4181  23.96  5
*29702  05.9706  00.2296  04:59:13  02.8488  04.06  5
*21012  09.9825 -00.4807  05:06:04  01.4193  00.16  5
-----

```

Рис. 3. Результаты предварительного анализа файла с наблюдениями после его загрузки в программу

экстинкции методом Никонова. Для этого в графическом окне программы следует выбрать меню *Extinction / Control stars method*. При активации этого пункта меню запускается процедура *Controlstarsmethod* из основного модуля *HMM4.pas*. На начальном этапе выполнения этой процедуры происходит анализ числа измерений каждой стандартной звезды, числовой код которой начинается с цифры 2. Стандартная звезда с максимальным количеством измерений получает статус “экстинкционной”, и все ее измерения заносятся в динамический массив *ExtStar*, который состоит из объектов типа *Star* (см. рис. 1). Стандартная звезда с тремя измерениями получает статус “контрольной”, и ее наблюдения заносятся в аналогичный динамический массив с именем *CntStar*. Результаты этого анализа отображаются в графическом окне программы внутри многострочного текстового редактора типа *Мемо* и выводятся в текстовый файл *20111203.ext*. В данном примере мы получаем сообщение о том, что в качестве экстинкционной звезды выбран объект с кодом 29702, а в качестве контрольной звезды – объект с кодом 21012.

На первом этапе реализации метода Никонова выполняется вычисление предварительных значений заатмосферного блеска и показателей цвета экстинкционной звезды с использованием средних значений экстинкции, типичных для данной обсерватории и для конкретного наблюдательного сезона (см. уравнения 1), или с использованием более реалистичных и точных мгновенных оценок экстинкции, полученных методом пары. Поэтому если имеется возможность вычисления мгновенных значений экстинкции по паре звезд, то ее надо обязательно использовать. В данном случае мы имеем подходящие измерения пары звезд: измерение звезды 29702 на воздушной массе 1.40 в  $00^h:46^m$  и первое измерение контрольной звезды 21012 на воздушной массе 2.90, выполненное через 4 минуты, в  $00^h:50^m$  (см. рис. 3). Вычислить мгновенные значения экстинкции по паре звезд можно, выбрав в главном меню программы опцию *Extinction / Two stars method*. При этом вызывается процедура *Extin2*, возможности которой подробно описаны в Гранкин (2025). Результаты работы этой процедуры представлены в таблице 2 в том виде, в каком они отображаются в многострочном текстовом редакторе графического окна программы НММ 4.

Таблица 2. Мгновенные коэффициенты экстинкции, вычисленные по паре звезд

Name1	Time1	AM1	Name2	Time2	AM2	dT	dAM	$A_V$	$A_{UB}$	$A_{BV}$	$A_{VR}$	$A_{VI}$
*29702	00:46	1.40	*21012	00:50	2.90	0.1	1.5	0.229	0.325	0.156	0.092	0.110

Таким образом, точные мгновенные значения экстинкции из таблицы 2 мы подставляем в файл `mean_ext.hmm` вместо среднемесячных значений. Благодаря этому мы получаем более точные предварительные заатмосферные значения блеска и показателей цвета экстинкционной звезды (приведены в таблице 3). Эти инструментальные значения блеска и показателей цвета вычислялись по следующим формулам:

$$\begin{cases} m_{e,i}'^o = m_{e,i} - \alpha_c^{ins} X_{e,i} \\ c_{e,i}'^o = c_{e,i} - \alpha_c^{ins} X_{e,i}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\alpha_c^{ins}$  и  $\alpha_e^{ins}$  – мгновенные значения экстинкции из таблицы 2,  $X_{e,i}$  – воздушная масса экстинкционной звезды в  $i$ -й момент наблюдений,  $m_{e,i}$  и  $c_{e,i}$  – измеренные значения блеска и показателя цвета экстинкционной звезды в  $i$ -й момент наблюдений, которые, в свою очередь, вычислялись как  $-2.5 \lg n_e$  или  $-2.5 \lg \Delta n_e$ , где  $n_e$  и  $\Delta n_e$  – фотометрический отсчет в конкретном фильтре и разница фотометрических отсчетов в двух фильтрах соответственно.

**Таблица 3.** Предварительные заатмосферные значения блеска и показателей цвета экстинкционной звезды

Time	AM	$v'^o$	$(u-b)'^o$	$(b-v)'^o$	$(v-r)'^o$	$(v-i)'^o$
00:13	1.4217	-9.145	0.038	-0.389	1.100	0.191
00:45	1.4013	-9.165	0.041	-0.388	1.083	0.187
00:55	1.4008	-9.166	0.034	-0.395	1.079	0.183
02:01	1.4590	-9.133	0.041	-0.389	1.096	0.211
03:42	1.8646	-9.141	0.017	-0.391	1.094	0.220
04:59	2.8488	-9.115	0.175	-0.373	1.108	0.271

Если бы атмосферная экстинкция была стабильной в течение всей наблюдательной ночи, то заатмосферные значения блеска и показателей цвета экстинкционной звезды в инструментальной системе, приведенные в таблице 3, должны были бы совпадать друг с другом внутри каждого столбца и не зависеть от времени наблюдений. Однако это не так. Значения блеска и показателей цвета в таблице 3 демонстрируют небольшие различия, которые связаны в первую очередь с вариациями атмосферной экстинкции в течение ночи. Основная задача данного метода состоит в вычислении этих вариаций атмосферной экстинкции.

На втором этапе реализации метода Никонова вычисляются предварительные значения изменяющихся коэффициентов экстинкции  $\alpha'_i$  и  $\alpha'_{c,i}$  для всех моментов времени, когда наблюдалась экстинкционная звезда согласно формулам (3). Здесь важно отметить, что в формулах (3) в качестве предварительных значений заатмосферной величины и показателей цвета экстинкционной звезды  $m_{e,i}'^o$  и  $c_{e,i}'^o$  мы используем не первое произвольное наблюдение экстинкционной звезды, а только то, которое было получено на минимальной воздушной массе. В нашем случае это третье предварительное значение, соответствующее воздушной массе 1.4008 (см. таблицу 3). Многолетний опыт использования метода Никонова показал, что предварительные значения блеска и показателей цвета экстинкционной звезды, полученные на небольшой воздушной массе, меньше всего подвержены ошибкам наблюдений. Таким образом, подставляя в формулы (3) измеренные значения блеска и показателей цвета экстинкционной звезды 29702 ( $m_{e,3}$  и  $c_{e,3}$ ) и ее предварительные заатмосферные величины ( $m_{e,3}'^o$  и  $c_{e,3}'^o$ ) из таблицы 3, получим предварительные коэффициенты экстинкции для моментов наблюдения экстинкционной звезды. Эти значения  $\alpha'_i$  и  $\alpha'_{c,i}$  приведены в таблице 4.

Внимательный читатель заметит, что предварительные значения экстинкции для третьего момента времени наблюдений экстинкционной звезды ( $00^h:55^m$ ) почти совпадают с точными мгновенными значениями экстинкции из таблицы 2, вычисленными по паре звезд. Это совпадение объясняется тем фактом, что для оценок предварительных значений экстинкции мы использовали как раз третье предварительное заатмосферное значение блеска и показателей цвета экстинкционной звезды.

На третьем этапе реализации метода Никонова выполняется вычисление предварительных заатмосферных величин и показателей цвета контрольной звезды 21012 по формулам (6). Для этого используются предварительные значения экстинкции ( $\alpha'_i$  и  $\alpha'_{c,i}$ ), проинтерполированные на моменты наблюдений контрольной звезды:  $\alpha'_j$  и  $\alpha'_{c,j}$ . Такие значения экстинкции приведены в таблице 5.

**Таблица 4.** Предварительные коэффициенты экстинкции

Time	$\alpha'_V$	$\alpha'_{UB}$	$\alpha'_{BV}$	$\alpha'_{VR}$	$\alpha'_{VI}$
00:13	0.244	0.332	0.161	0.107	0.116
00:45	0.230	0.334	0.162	0.095	0.113
00:55	0.229	0.329	0.157	0.092	0.110
02:01	0.252	0.334	0.162	0.103	0.129
03:42	0.243	0.324	0.161	0.100	0.130
04:59	0.247	0.397	0.170	0.102	0.141

**Таблица 5.** Интерполированные значения экстинкции на моменты наблюдений звезды 21012

Time	$\alpha'_V$	$\alpha'_{UB}$	$\alpha'_{BV}$	$\alpha'_{VR}$	$\alpha'_{VI}$
00:50	0.229	0.331	0.160	0.093	0.112
04:54	0.247	0.392	0.170	0.102	0.140
05:06	0.247	0.397	0.170	0.102	0.141

Подставляя эти значения экстинкции из таблицы 5 в формулы (6), получим предварительные заатмосферные значения блеска и показателей цвета контрольной звезды (приведены в таблице 6).

**Таблица 6.** Предварительные заатмосферные значения блеска и показателей цвета контрольной звезды

Time	AM	$v'_k$	$(u-b)'_k$	$(b-v)'_k$	$(v-r)'_k$	$(v-i)'_k$
00:50	2.9033	-9.071	0.013	-0.365	1.109	0.218
04:54	1.4181	-9.100	0.020	-0.398	1.101	0.160
05:06	1.4193	-9.101	0.011	-0.390	1.101	0.159

На четвертом этапе реализации метода Никонова вычисляются искомые поправки  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$  согласно формулам (9). Для этого необходимо предварительно вычислить отношения воздушных масс  $\eta_j = X_{k,j}/X_{e,j}$ , на которых находились контрольная и экстинкционная звезды на момент времени измерения контрольной звезды  $t_{k,j}$ . Результаты вычисления этих величин представлены в таблице 7.

**Таблица 7.** Отношения воздушных масс

Time	$X_k$	$X_e$	$\eta$
00:50	2.9033	1.4005	2.073
04:54	1.4181	2.7376	0.518
05:06	1.4193	3.0070	0.472

**Таблица 8.** Точные коэффициенты экстинкции

Time	$\alpha_V$	$\alpha_{UB}$	$\alpha_{BV}$	$\alpha_{VR}$	$\alpha_{VI}$
00:13	0.231	0.335	0.146	0.103	0.089
00:45	0.217	0.337	0.146	0.091	0.086
00:55	0.216	0.332	0.141	0.088	0.083
02:01	0.239	0.337	0.146	0.100	0.104
03:42	0.233	0.326	0.149	0.097	0.110
04:59	0.240	0.399	0.162	0.100	0.128

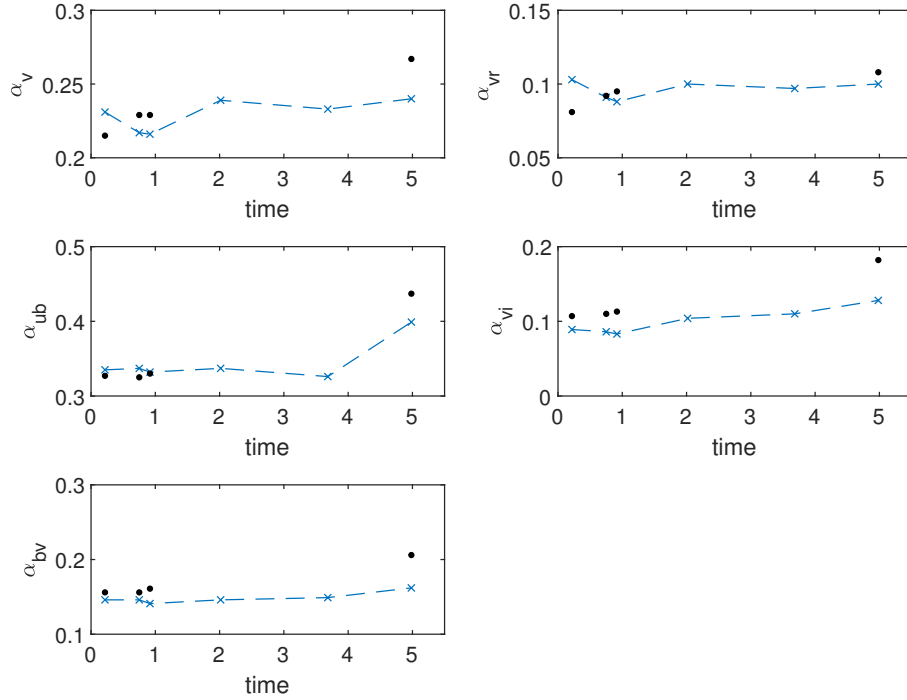
Решая систему уравнений (9) для трех независимых измерений контрольной звезды и используя значения  $\eta_j$  из таблицы 7, можно получить величины искомых поправок  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$ . Они имеют следующие значения:  $\delta v_e^o = -0.018$ ,  $\delta(u-b)_e^o = 0.005$ ,  $\delta(b-v)_e^o = -0.022$ ,  $\delta(v-r)_e^o = -0.005$  и  $\delta(v-i)_e^o = -0.037$ .

Теперь, используя формулы (10), легко вычислить точные заатмосферные инструментальные значения блеска и показателей цвета экстинкционной звезды 29702 с учетом уже известных поправок:  $v_e^o = -9.148$ ,  $(u-b)_e^o = 0.029$ ,  $(u-b)_e^o = -0.373$ ,  $(u-b)_e^o = 1.085$  и  $(u-b)_e^o = 0.220$ .

На пятом этапе реализации метода Никонова вычисляются точные значения экстинкции  $\alpha_i$  и  $\alpha_{c,i}$  с использованием формул (11). Эти значения атмосферной экстинкции приведены в таблице 8. Поскольку в течение данной наблюдательной ночи имеется несколько измерений контрольной звезды 21012, которые были получены почти одновременно с измерениями экстинкционной звезды 29702, можно вычислить несколько значений мгновенной экстинкции с применением метода пары и сравнить эти независимые оценки со значениями, полученными методом Никонова.

На рис. 4 представлены вариации коэффициентов атмосферной экстинкции в течение ночи, вычисленные методом Никонова. Они обозначены синими косыми крестиками, соединенными штриховой синей линией. Точные мгновенные значения экстинкции, вычисленные методом пары, обозначены черными кружками. Из рис. 4 видно, что вариации коэффициентов экстинкции с течением вре-

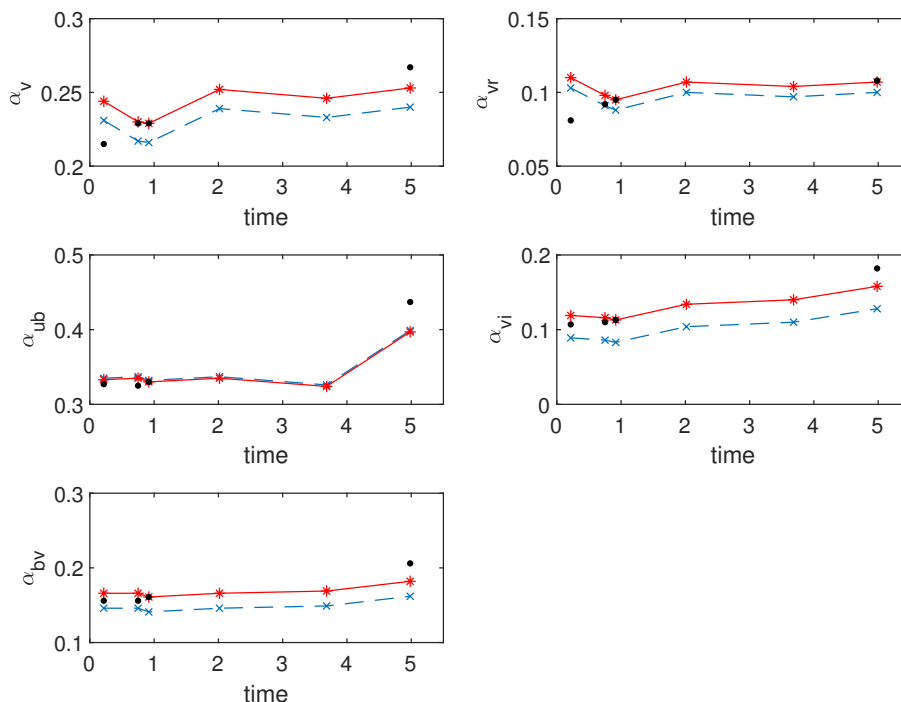
мени, вычисленные двумя разными методами, происходят вполне синхронно. При этом наблюдается некоторый вертикальный сдвиг, особенно заметный в случае коэффициентов  $\alpha_V$  и  $\alpha_{VI}$ . Величина этого сдвига напрямую зависит от определенных ранее значений поправок  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$ . В свою очередь, точность этих поправок определяется количеством измерений контрольных звезд. В нашем случае для вычисления этих поправок мы использовали всего три измерения контрольной звезды 21012. Очевидно, что такого количества измерений явно недостаточно. Для повышения точности Никонов рекомендует вычислять поправки  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$  по большому количеству измерений контрольных звезд.



**Рис. 4.** Вариации атмосферной экстинкции в течение ночи. Черные кружки – мгновенные значения экстинкции, вычисленные методом пары; синие крестики – методом Никонова

Очень часто при проведении наблюдений исследователи стараются измерять как можно больше программных звезд в ущерб наблюдениям экстинкционных и контрольных звезд. Дальнейшая обработка таких наблюдений с применением метода Никонова ожидаемо будет давать недостаточно надежные значения поправок  $\delta m_e^o$  и  $\delta c_e^o$  и, как следствие, недостаточно точные коэффициенты экстинкции. Тем не менее можно значительно улучшить точность получаемых значений коэффициентов экстинкции, если одновременно использовать второй независимый метод пары. Близкое по времени измерение двух стандартных звезд, находящихся на различных воздушных массах и имеющих надежные значения блеска и показателей цвета в стандартной фотометрической системе, позволяет с очень высокой точностью определить мгновенные коэффициенты экстинкции. Тогда, имея такие точные мгновенные значения экстинкции, легко определить дополнительные поправки к тем значениям экстинкции, которые были вычислены методом Никонова.

Такая возможность реализована в пакете программ НММ 4. Чтобы она стала доступной, необходимо перед вызовом процедуры вычислений по методу Никонова выполнить процедуру вычисления экстинкции методом пары. Возможности этой процедуры описаны в Гранкин (2025). Вызов этой процедуры приводит к поиску всех возможных пар стандартных звезд, которые измерялись подряд в пределах не более 10–15 минут и разность воздушных масс которых была более 1.4. В нашем случае эта процедура нашла четыре такие пары и вычислила по ним точные мгновенные коэффициенты экстинкции. Затем, после вычислений экстинкции по методу Никонова, программа выбирает



**Рис. 5.** Вариации атмосферной экстинкции в течение ночи. Черные кружки – мгновенные значения экстинкции, вычисленные методом пары; синие крестики – методом Никонова; красные звездочки – после приведения к мгновенным значениям

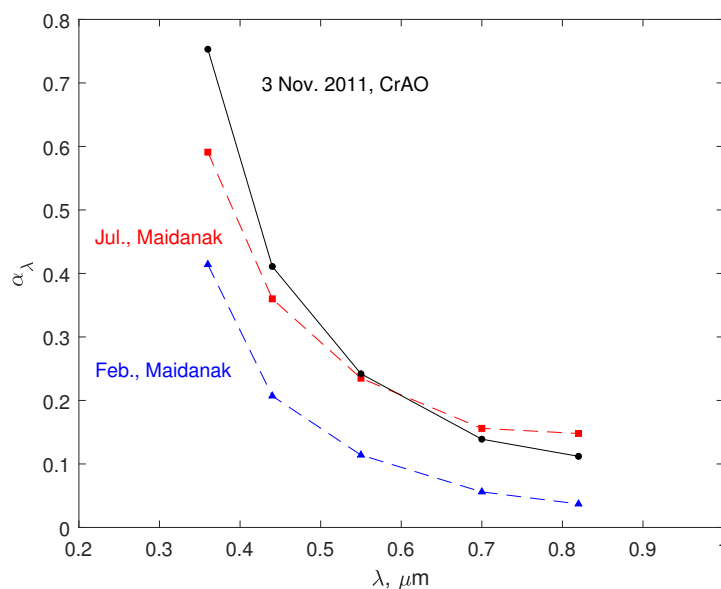
одно значение мгновенной экстинкции, максимально близкое по времени к одному из измерений экстинкции по этому методу, и вычисляет необходимые поправки. В представленном примере согласование проводилось по третьему измерению (см. рис. 5). Окончательные значения коэффициентов экстинкции показаны на рисунке красными звездочками и соединены сплошной красной линией. Их значения приведены в таблице 9.

**Таблица 9.** Точные коэффициенты экстинкции после приведения к мгновенному значению

Time	$\alpha_V$	$\alpha_{UB}$	$\alpha_{BV}$	$\alpha_{VR}$	$\alpha_{VI}$
00:13	0.244	0.333	0.166	0.110	0.119
00:45	0.230	0.335	0.166	0.098	0.116
00:55	0.229	0.330	0.161	0.095	0.113
02:01	0.252	0.335	0.166	0.107	0.134
03:42	0.246	0.324	0.169	0.104	0.140
04:59	0.253	0.397	0.182	0.107	0.158
средн.	0.242	0.342	0.168	0.104	0.130

Из рис. 5 и таблицы 9 видно, что окончательные значения экстинкции стали несколько больше, за исключением значений  $\alpha_{UB}$ . В последней строке таблицы 9 приведены средние значения экстинкции за всю наблюдательную ночь. Интересно их сравнить с аналогичными значениями, характерными для высокогорных среднеазиатских обсерваторий, например для Майданакской обсерватории, расположенной на одном из отрогов Гиссарского хребта на высоте 2700 м над уровнем моря. Собственно обсерватория размещается на одноименном высокогорном плато, которое является самой южной вершиной массива Хантахта в правобережье реки Игрису в 45 километрах к югу от города Шахрисабза. Само название Майданак переводится с узбекского “майдан-ок” как “белая площадь”.

Подробные исследования астроклимата горы Майданак проводились в течение года и были опубликованы в материалах Трудов Всесоюзной конференции рабочей группы “Астроклимат” Астросовета АН СССР “Астроклимат и эффективность телескопов” (Железнякова, 1984).



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента экстинкции от длины волны. Черные кружки – значения экстинкции за 3 ноября 2011 г. в КрАО, красные квадратики – средняя экстинкция за июль 1980 г. в Майданакской обсерватории, синие треугольники – средняя экстинкция за февраль 1981 г. в Майданакской обсерватории

На рис. 6 показана зависимость коэффициента экстинкции от длины волны для пяти фотометрических полос:  $U$ ,  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , эффективные длины которых соответствуют 0.36, 0.44, 0.55, 0.70 и 0.82 мкм. Минимальные значения экстинкции, зарегистрированные в Майданакской обсерватории, наблюдаются в феврале, когда основным фактором поглощения являются пары воды. На рис. 6 эти данные обозначены синими треугольниками. Максимальная экстинкция характерна для июля, когда в атмосфере присутствует большое количество пыли. Эти данные отмечены красными квадратами. Значения средней экстинкции, измеренной на Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) 3 декабря 2011 г., показаны черными кружками.

Из рис. 6 видно, что в фотометрической полосе  $V$  коэффициент атмосферной экстинкции в КрАО сравним с аналогичным коэффициентом для Майданакской обсерватории, измеренным в летний период. Вполне ожидаемо увидеть, что экстинкция в полосах  $U$  и  $B$  в КрАО превышает экстинкцию в Майданакской обсерватории по причине значительной разницы высот над уровнем моря (почти 2 км) и большей влажности в Крыму в ноябре по сравнению с июлем в Средней Азии. Менее ожидаемым результатом является тот факт, что экстинкция в полосах  $R$  и  $I$  в КрАО заметно меньше, чем в Майданакской обсерватории в июле. Скорее всего, этот результат связан с тем обстоятельством, что в атмосфере КрАО в зимние месяцы значительно меньше пыли, чем на горе Майданак в летний период.

## 4 Заключение

Контроль за вариациями атмосферной экстинкции в течение наблюдательной ночи удобно осуществлять с использованием метода Никонова, который является самым экономичным с точки зрения временных затрат на измерения звезд сравнения. Этот метод идеально подходит для создания фундаментальных фотометрических каталогов и его удобно использовать во время специальных наблюдений большого числа стандартных звезд с целью определения коэффициентов редукции инструментальной системы к стандартной фотометрической системе.

Метод Никонова предполагает постоянный контроль за атмосферной экстинкцией с помощью регулярных наблюдений специальной экстинкционной звезды через равные интервалы времени, например через каждые 1–1.5 часа. Для вычисления уточняющих поправок к значениям блеска и показателей цвета экстинкционной звезды необходимо выполнить хотя бы два измерения какой-либо контрольной звезды в определенные моменты времени. Поэтому, чтобы использовать все достоинства этого метода, необходимо тщательно спланировать всю программу наблюдений экстинкционной и контрольной звезд заранее.

Основным достоинством метода Никонова является то обстоятельство, что он не требует априорного знания точных внеатмосферных величин и показателей цвета как самой экстинкционной звезды, так и группы контрольных звезд. Главное требование к экстинкционной и контрольным звездам состоит в том, чтобы они не меняли свой блеск и показатели цвета хотя бы в течение ночи, а в идеале, чтобы они были постоянными в течение продолжительного времени. Другим достоинством этого метода является тот факт, что в качестве контрольных звезд можно использовать измерения любых программных звезд, например звезд сравнения или специальных редукционных звезд.

В случае использования метода Никонова для наблюдений в широкополосной фотометрической системе *UBVRI* следует принимать во внимание зависимость коэффициентов экстинкции от показателя цвета, а также учитывать эффект Форбса на значительных воздушных массах. Чтобы свести к минимуму влияние этих зависимостей, рекомендуется в качестве экстинкционных и контрольных звезд выбирать хорошо известные стандартные звезды спектрального класса A0 V с показателями цвета, близкими к нулю. Чтобы повысить точность значений атмосферной экстинкции, вычисляемых методом Никонова, рекомендуется хотя бы один раз за ночь измерить мгновенные значения экстинкции другим независимым методом – методом пары.

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

## Литература

- Гранкин К.Н., 2025. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 121. С. 14–31. [Grankin K.N., 2025. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 121, pp. 14–31. (In Russ.)]
- Железнякова А.И., 1984. Результаты исследования прозрачности и влагосодержания атмосферы на астропункте Майданак. В кн. Астроклимат и эффективность телескопов. Л.: Наука. С. 55–59. [Jelesnakova A.I., 1984. An investigation of the atmospheric transparency and water vapour content in the atmosphere made on Mount Maidanak. In Shevchenko V.S. (Ed.), *Astroclimate and telescope efficiency*. Leningrad: Nauka, pp. 55–59. (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 астрофотометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотометрии 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. [Straizys 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.)]

## Nikonov's method implemented in the HMM software package

*K. Grankin*

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

**Abstract.** We briefly discuss the main ideas of Nikonov's method (control star method), which allows one to register atmospheric extinction changes during an observation night, and describe in detail the implementation of this method in the HMM (Heterochromatic Magnitude Method) software package, intended for processing various types of photometric observations. A specific example of applying this method to real observations is considered.

**Key words:** methods for studying variable stars, atmospheric extinction