

УДК 524.33:520.82; 004.42

# ASTROKIT — ЭФФЕКТИВНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПЗС-ФОТОМЕТРИИ И ПОИСКА ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЁЗД

© 2014 А. Ю. Бурданов\*, В. В. Крушинский, А. А. Попов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620002 Россия

Поступила в редакцию 24 декабря 2013 года; принята в печать 28 мая 2014 года

В связи с необходимостью выполнения дифференциальной фотометрии для нескольких десятков тысяч звезд в поле несколько квадратных градусов нами была написана программа *Astrokit*. Приложение исправляет вариации блеска звезд, связанные с непостоянством прозрачности атмосферы: с этой целью для каждой звезды в поле зрения программой формируется индивидуальный ансамбль опорных звезд сравнения, которые близки по блеску и положению в кадре. При использовании десяти и более опорных звезд в ансамбле становится неважным различие их спектральных классов и спектрального класса изучаемого объекта. *Astrokit* выполняет поиск переменных звезд на основе Robust Median Statistics — критерия, который позволяет отбирать кандидаты в переменные звезды более уверенно, чем анализ стандартного отклонения блеска звезд. Приложение позволяет с высокой точностью проводить в автоматическом режиме анализ длинных неравномерных рядов фотометрических наблюдений большого количества объектов, давая возможность регистрировать транзиты экзопланет типа «горячий юпитер» и находить малоамплитудные переменные звезды. Представлено описание алгоритма работы программы, а также результаты ее применения для обработки данных фотометрического обзора области неба в созвездии Лебедя и наблюдений рассеянного звездного скопления NGC 188 и транзита экзопланеты WASP-11 b / HAT-P-10 b, проведенных в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ на телескопе МАСТЕР-II-Урал.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные — методы: анализ данных — методики: фотометрические — звёзды: переменные*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В рамках программ исследования рассеянных звездных скоплений, поиска новых переменных звезд и транзитов экзопланет в Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (УрФУ) разработано консольное приложение *Astrokit* на языке C++ для постобработки результатов ПЗС-фотометрии. В его основе лежит усовершенствованный алгоритм дифференциальной фотометрии с помощью ансамблей звезд сравнения, описанный в работе [1].

В этой работе мы не будем рассматривать источники ошибок, влияющие на результирующую точность ПЗС-фотометрии. Этот вопрос, а также использование других методов ПЗС-фотометрии подробно освещены в работах [2–11]. Напомним лишь, что суть дифференциальной фотометрии заключается в получении разности блеска интересующего нас источника и блеска одной или нескольких опорных звезд, в результате чего возможно

снижение влияния атмосферных эффектов, меняющихся со временем. При этом в идеальном случае опорная звезда должна быть близкой по блеску, показателю цвета и расположению относительно изучаемой звезды.

Близость опорных звезд и исследуемой звезды особенно важна при обработке широкопольных изображений, в противном случае локальные неоднородности прозрачности атмосферы будут по-разному сказываться на опорных источниках и исследуемом объекте, что непременно снизит результирующую точность фотометрии.

После проведения дифференциальной фотометрии *Astrokit* осуществляет поиск переменных звезд. Алгоритм работы программы, ее реализация и некоторые полученные результаты представлены ниже.

## 2. МЕТОД

Перед тем как приступить к постобработке результатов фотометрии, непосредственно сама фотометрия должна быть выполнена. Неважно, с по-

\*E-mail: burdanov.art@gmail.com

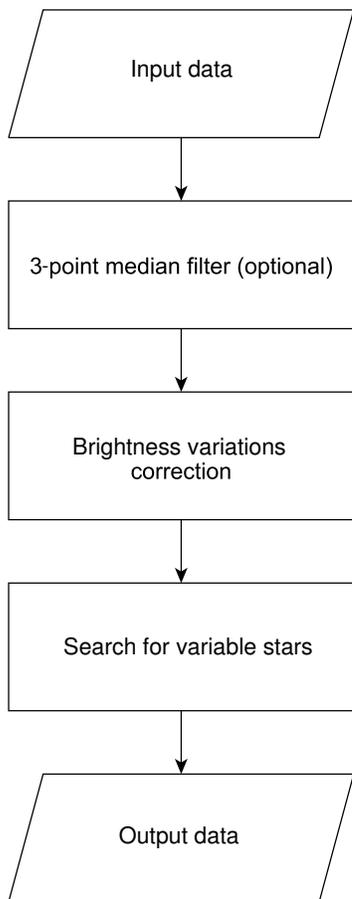


Рис. 1. Структура программы Astrokit.

мощью какого программного обеспечения выполнена экстракция потоков из ПЗС-изображения, важно лишь, чтобы были получены соответствующие звездные величины и теоретические ошибки их измерения, следующие из основного уравнения ПЗС [12].

Для исследований, проводимых в астрономической обсерватории УрФУ, была разработана методика проведения фотометрической обработки в пакете IRAF [13]. Перед использованием IRAF в FITS-заголовке каждого кадра создаются корректные параметры, отвечающие за привязку системы координат, с помощью консольной версии приложения *Astrometry.net* [14]. Затем в пакете IRAF производится фотометрическая редукция каждого кадра — вычитание кадра темнового тока и деление на кадр плоского поля. С помощью задания PHOT/APPHOT в каждом кадре выполняется апертурная фотометрия с индивидуальными значениями апертуры и фона неба для каждого кадра. Для этого используется каталог объектов, содержащий экваториальные координаты звезд и их порядковый номер. Радиус апертуры, который

используется в конкретном кадре, определяется как  $0.8 \text{ FWHM}$ , где FWHM — усредненное значение полных ширин на уровне половины амплитуды функций рассеяния звезд в кадре. Далее полученные данные передаются программе *Astrokit*, общая структура которой показана на рис. 1.

Входные данные для работы программы содержатся в файле, сформированном командой PDUMP пакета IRAF, и включают в себя:

- идентификационный номер звезды (*id*),
- количество отсчетов (аналогово-цифровых единиц) от звезды внутри апертуры вместе с отсчетами фона неба (*sum*),
- площадь апертуры в квадратных пикселях (*area*),
- средний фон неба в каждом пикселе (*msky*),
- количество пикселей, классифицированных как фон неба (*nsky*),
- время экспозиции (*itime*).

Кроме того, для корректной работы программы требуется файл, содержащий экваториальные координаты звезд. На усмотрение пользователя этот файл также может содержать каталожные показатели цвета звезд, что будет учитываться в дальнейшем при формировании ансамблей звезд сравнения.

Поэтапное описание алгоритма представлено ниже. Пусть в имеющемся наборе фотометрических данных имеется  $j$  ПЗС-кадров, на каждом из которых  $i$  звезд из входного каталога.

(1) Программа вычисляет звездные величины ( $m$ ) и ошибки их измерения ( $merr$ ) каждой звезды из входного каталога в каждом кадре. Указанные величины определяются следующим образом:

$$\text{flux} = \text{sum} - \text{area} \times \text{msky},$$

$$m = \text{zmag} - 2.5 \lg(\text{flux}) + 2.5 \lg(\text{itime}),$$

$$merr = \frac{1.0857}{\text{flux} \times \text{gain}} \left( \text{flux} \times \text{gain} + \text{area} (1 + \text{area}/\text{nsky}) (\text{msky} \times \text{gain} + \text{ron}^2) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $\text{zmag} = 20$  — нуль-пункт шкалы звездных величин,  $\text{gain}$  — коэффициент усиления ПЗС в  $e^-/\text{ADU}$ , который задается пользователем в начале работы с программой,  $\text{ron}$  — шум считывания ПЗС в  $e^-/\text{пиксел}$ , который также задается пользователем.

(2) Для каждой звезды из входного каталога в некотором радиусе от нее (по умолчанию это 5') формируется ансамбль опорных звезд, которые отличаются от нее по блеску не более чем на 2<sup>m</sup> (это значение можно изменять). Чем меньше разница звездных величин, тем меньше звезд попадет в ансамбль, и тем дальше они будут находиться. Еще одним критерием отбора звезд в ансамбль может служить разница каталожных показателей цвета изучаемой звезды (то есть той звезды, для которой создается ансамбль) и кандидатов в ансамбль сравнения.

(3) Вычисляется средняя взвешенная инструментальная звездная величина  $\langle m_j \rangle$  звезд ансамбля для каждого кадра в серии снимков

$$\langle m_j \rangle = \frac{\sum_k^K m_{kj} \omega_k}{\sum_k^K \omega_k}, \quad \text{где} \quad \omega_k = \frac{1}{\langle \text{merr}_k^2 \rangle},$$

где  $k$  — номер звезды в ансамбле,  $K$  — количество звезд в ансамбле,  $j$  — номер кадра,  $m_{kj}$  — звездная величина  $k$ -ой звезды ансамбля в  $j$ -ом кадре,  $\langle \text{merr}_k \rangle$  — средняя по всем кадрам теоретическая ошибка измерения величины  $m_k$  звезды ансамбля, вычисляемая по формуле 1 (в отличие от используемой в работе [1] ошибки в каждом кадре).

(4) Вычисляется средняя звездная величина  $M$  всех звезд ансамбля по всем кадрам:

$$M = \frac{\sum_j^N \langle m_j \rangle}{N},$$

где  $N$  — число кадров.

(5) Разность между средней взвешенной инструментальной звездной величиной  $\langle m_j \rangle$  звезд ансамбля и средней звездной величиной  $M$  всех звезд ансамбля по всем кадрам вычитается из наблюдаемого блеска звезды, для которой выполняется учет влияния земной атмосферы, и звезд, входящих в ансамбль:

$$m_{\text{cor } ij} = m_{ij} - (\langle m_j \rangle - M),$$

где  $m_{\text{cor } ij}$  — исправленная звездная величина звезды  $i$  в кадре  $j$ ,  $m_{ij}$  — исходная звездная величина звезды  $i$  в кадре  $j$ .

(6) После первого формирования ансамбля для всех звезд вычисляется стандартное отклонение звездных величин и находится звезда с наибольшим его значением. Если стандартное отклонение блеска более чем в два раза превышает среднюю по всем кадрам теоретическую ошибку фотометрии (назовем эту величину сигма-критерием), которую

также можно изменять, то звезда удаляется из ансамбля, и процедура коррекции повторяется с пункта 2.

Если после удаления из ансамбля звезд с большим стандартным отклонением блеска в ансамбле остается меньше десяти звезд, то область формирования ансамбля увеличивается на 1', и все шаги повторяются снова. Таким образом, процедура коррекции звездных величин представляет собой итеративный процесс, который будет выполняться до тех пор, пока в ансамбле не будет больше девяти звезд или пока область поиска не увеличится до 30'.

Ошибка, которая вносится при коррекции исходных звездных величин звездами ансамбля, определяется ошибками звездных величин звезд, входящих в ансамбль:

$$\text{merr}_{\text{ens}} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^K \frac{1}{\text{merr}_k^2}}},$$

где  $\text{merr}_k$  — ошибка измерения  $k$ -ой звезды, входящей в ансамбль. Таким образом, итоговая ошибка звезды  $i$  будет складываться из ошибки ее измерения и ошибки, вносимой ансамблем сравнения:

$$\text{merr} = \sqrt{\text{merr}_i^2 + \text{merr}_{\text{ens}}^2}.$$

Процедура формирования ансамблей и исправления звездных величин выполняется для каждой звезды из списка. Таким образом, для каждой звезды формируется индивидуальный тесный ансамбль звезд сравнения.

Процесс исправления звездных величин схематически представлен на рис. 2.

(7) Производится поиск переменных объектов по алгоритму, описанному в работе [15]. Для каждой звезды вычисляется коэффициент RoMS (Robust Median Statistics):

$$\eta_n = \frac{\sum_i \frac{|m_i - \langle m_{\text{med}} \rangle|}{\sigma_{\text{rms}}}}{N - 1},$$

где  $n$  — номер звезды,  $m_i$  —  $i$ -ое измерение блеска,  $\langle m_{\text{med}} \rangle$  — медианное среднее для измерений блеска звезды  $n$ ,  $N$  — общее количество измерений для блеска звезды  $n$ ,  $\sigma_{\text{rms}}$  — предполагаемое стандартное отклонение блеска звезды  $n$ , получаемое из зависимости стандартных отклонений блеска от блеска для звезд в кадре методом наименьших квадратов.

Критерий RoMS позволяет оценить вариации блеска объекта. Если он превышает 1, то звезда считается заподозренной в переменности и в дальнейшем исследуется более подробно.

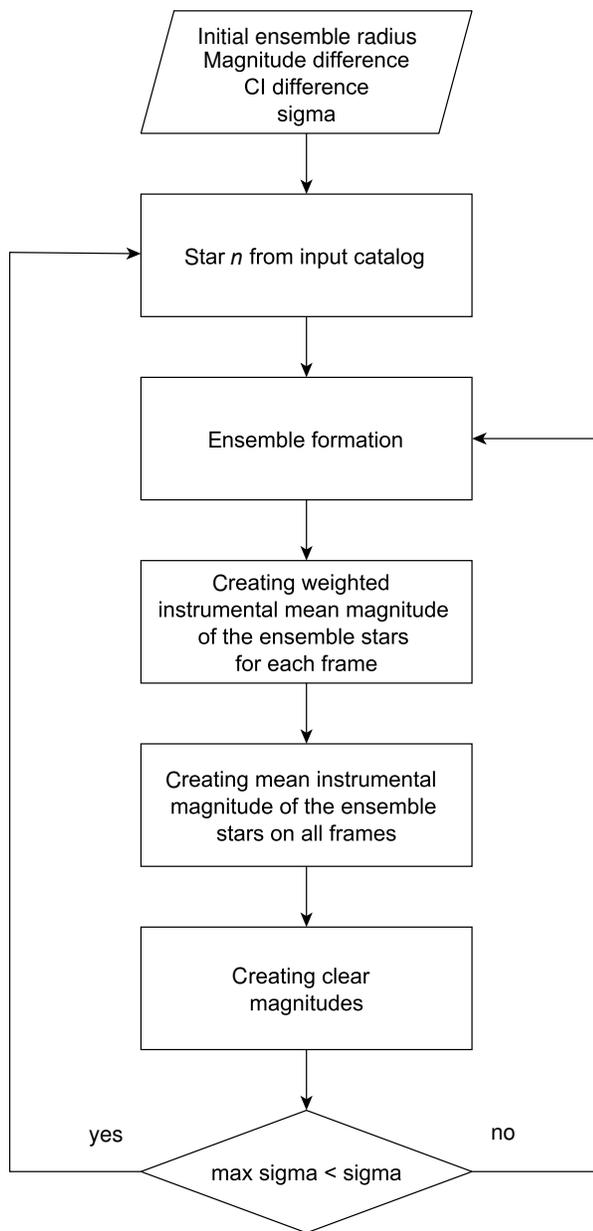


Рис. 2. Блок-схема процесса исправления инструментальных звездных величин.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Для исследования методики и подбора оптимальных входных параметров программы *Astrokit*, которые бы обеспечили наилучшую точность фотометрии, мы использовали данные фотометрического обзора участка Млечного Пути. На телескопе МАСТЕР-II-Урал было получено около 3000 ПЗС-кадров в фильтре  $R$  с экспозицией 50 с. В центральной области кадров размером  $30' \times 30'$  было отобрано 800 звезд в диапазоне звездных величин  $R = 9^m - 17^m$ .

Телескоп МАСТЕР-II-Урал, находящийся в Коуровской обсерватории УрФУ, представляет собой две трубы системы Гамильтона ( $D = 40$  см,  $F = 1000$  см), установленные на экваториальной монтировке и оснащенные двумя ПЗС-камерами Argee Alta U16M [16]. Масштаб изображения составляет  $1''8/\text{пиксел}$ . Для фотометрических калибровок используются кадры темнового тока, получаемые перед каждой наблюдательной ночью, и кадры плоского поля, получаемые по утреннему сумеречному небу. Все наблюдения проводятся в автоматическом режиме.

После проведения апертурной фотометрии в пакете IRAF нами была проведена серия циклов обработки с помощью *Astrokit*. Мы варьировали такие входные параметры, как начальный радиус ансамбля  $r$ , разницу звездных величин  $\Delta m$  и показатели цвета звезд  $\Delta CI$ , входящих в ансамбль, а также пороговую величину отношения стандартного отклонения звездной величины к теоретической ошибке для вхождения звезды в ансамбль  $\sigma$  (сигма-критерий).

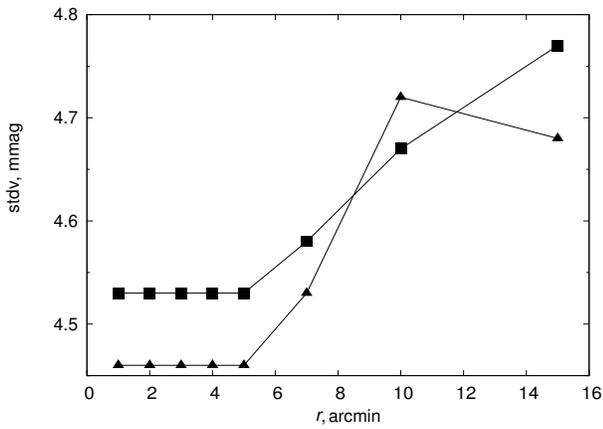
Основным критерием, отражающим качество постобработки, мы считали количество «хороших звезд», т.е. звезд, имеющих стандартное отклонение блеска  $s$  по всей серии наблюдений менее чем  $0^m01$  и  $0^m02$ . Также принималось во внимание минимальное полученное стандартное отклонение блеска звезды (далее — «лучшая звезда»).

Сначала мы варьировали начальный радиус ансамбля при постоянной разнице звездных величин, равной  $1^m$  (на графиках отмечена квадратами), и при сигма-критерии, равном двум. Начальный радиус ансамбля составлял:  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$ ,  $4'$ ,  $5'$ ,  $7'$ ,  $10'$  и  $15'$ . Затем для каждого случая подсчитывалось количество «хороших звезд», а также минимальное получившееся стандартное отклонение звездных величин для каждого начального радиуса.

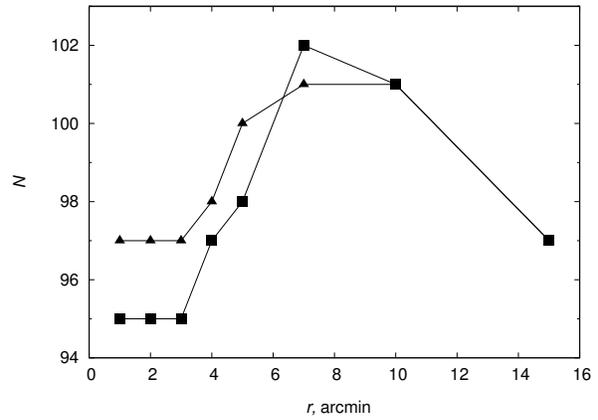
Как видно из рис. 3, минимальное стандартное отклонение блеска равно  $0^m00453$  при радиусе от  $1'$  до  $5'$ , увеличивается с увеличением начального радиуса ансамбля и достигает максимальной разницы в 5%, а именно  $0^m00477$ , при радиусе в  $15'$ .

Количество же звезд со стандартным отклонением звездных величин по всей серии наблюдений меньше  $0^m01$  максимально при радиусе ансамбля в  $7'$  и составляет 102 звезды, что больше на 7%, чем при начальных радиусах от  $1'$  до  $3'$  (рис. 4). В случае выборки звезд со стандартным отклонением блеска меньше  $0^m02$  их максимальное количество достигается при начальном радиусе ансамбля равном  $10'$  (254 звезды против 245). Прирост — 4% (рис. 5).

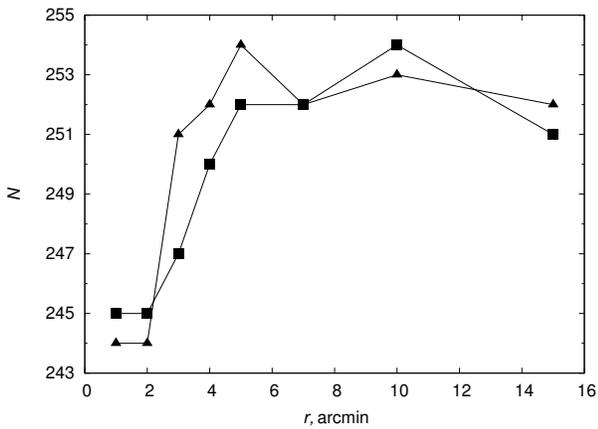
Аналогичное варьирование начального радиуса ансамбля было выполнено при  $\Delta m = 2^m$  (на рисунках отмечена треугольниками). В этот раз



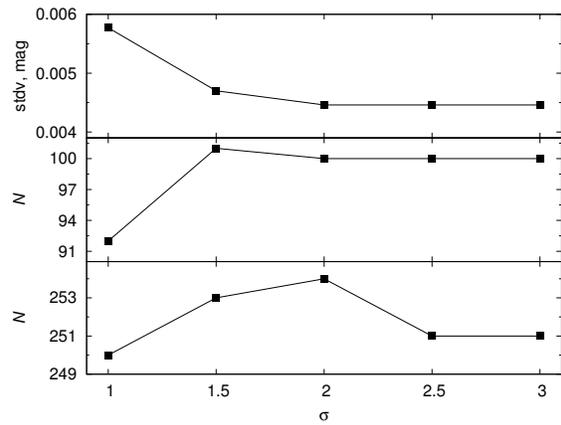
**Рис. 3.** Изменение стандартного отклонения блеска «лучшей звезды» с изменением начального радиуса ансамбля при  $\sigma = 2$  и различных значениях  $\Delta m$  ( $\Delta m = 1$  отмечены квадратами, а  $\Delta m = 2$  — треугольниками).



**Рис. 4.** Изменение количества звезд со стандартным отклонением блеска меньше  $0^m01$  с изменением начального радиуса ансамбля при  $\sigma = 2$  и различных значениях  $\Delta m$  ( $\Delta m = 1$  отмечены квадратами, а  $\Delta m = 2$  — треугольниками).



**Рис. 5.** Изменение количества звезд со стандартным отклонением блеска меньше  $0^m02$  с изменением начального радиуса ансамбля при  $\sigma = 2$  и различных значениях  $\Delta m$  ( $\Delta m = 1$  отмечены квадратами, а  $\Delta m = 2$  — треугольниками).



**Рис. 6.** Изменение стандартного отклонения блеска «лучшей звезды» (верхний график) и количества звезд с  $s < 0^m01$  (средний график),  $s < 0^m02$  (нижний график) с изменением сигма-критерия  $\sigma$  при  $r = 5'$  и  $\Delta m = 2$ .

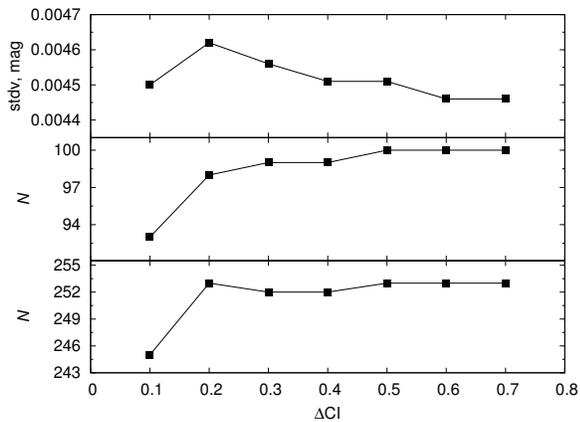
минимальное стандартное отклонение блеска составило  $0^m00446$  и также увеличивается с ростом начального радиуса (рис. 3). Количество же «хороших звезд» с  $s < 0^m01$  максимально при начальных радиусах ансамбля в  $7'$  и  $10'$  (прирост 4%) (рис. 4). Количество «хороших звезд» с  $s < 0^m02$  максимально при начальном радиусе ансамбля в  $5'$  (прирост 4% по сравнению с минимумом) (рис. 5).

Принимая во внимание вышесказанное, можно сделать следующий вывод: оптимальным начальным радиусом формирования ансамблей сравнения является радиус, равный  $5' - 7'$ , при разнице звездных величин, равной  $2^m$ . В этом случае ансамбль является все еще достаточно тесным, но в то же время в него входит большое количество звезд. Ансамбль позволяет снизить влияние атмосферы,

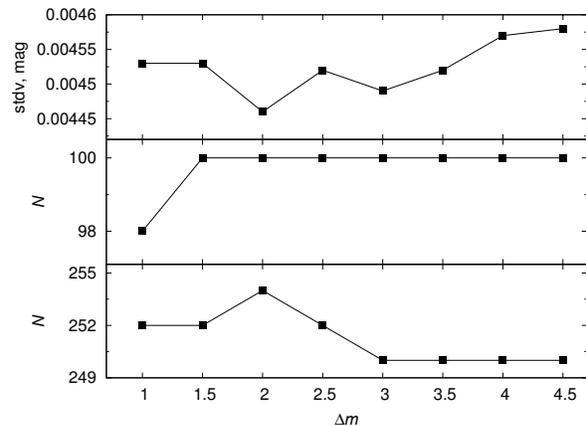
что выражается минимальным стандартным отклонением блеска «лучшей звезды» и наибольшим количеством «хороших звезд». При этом влияние варьирующихся параметров на результат относительно невелико.

Следующим этапом подбора оптимальных параметров было варьирование сигма-критерия при начальном радиусе  $5'$  и разнице звездных величин, равной  $2^m$ .

Как видно из рис. 6, оптимальным значением сигма-критерия является 2. Это может быть объяснено тем, что слишком «строгое» значение уменьшает количество звезд в ансамбле. Величина сигма-критерия больше 2 увеличивает количество звезд в ансамбле путем включения в него звезд с большим стандартным отклонением блеска по всей



**Рис. 7.** Изменение стандартного отклонения блеска «лучшей звезды» (верхний график) и количества звезд с  $s < 0.^m01$  (средний график),  $s < 0.^m02$  (нижний график) с изменением разницы показателей цвета  $\Delta CI$  при  $r = 5'$  и  $\Delta m = 2$ .



**Рис. 8.** Изменение стандартного отклонения блеска «лучшей звезды» (верхний график) и количества звезд с  $s < 0.^m01$  (средний график),  $s < 0.^m02$  (нижний график) с изменением разницы звездных величин  $\Delta m$  при  $r = 5'$  и  $\sigma = 2$ .

серии наблюдений, что сказывается на итоговой точности.

Согласно представлениям классической дифференциальной фотометрии с одной звездой сравнения и контрольными звездами, наибольшую точность даст звезда сравнения, максимально похожая на объект как по блеску, так и по спектральному классу. В ходе работы нами было изучено влияние показателя цвета на точность фотометрии. Для этого мы варьировали разницу показателя цвета  $J - H$  из каталога 2MASS [17] при формировании ансамбля звезд с начальным радиусом  $5'$  и разницей звездных величин, равной  $2^m$ . Разница показателя цвета бралась равной  $0.^m1$ ,  $0.^m2$ ,  $0.^m3$ ,  $0.^m4$ ,  $0.^m5$ ,  $0.^m6$  и  $0.^m7$ .

Как видно из рис. 7, близость спектрального класса звезд не является необходимым условием достижения высокой точности. Тем не менее, в случае малых полей и недостаточного количества звезд для формирования ансамбля классический подход дифференциальной фотометрии является единственным выходом.

Что же будет в случае, если в ансамбль попадет максимально возможное количество опорных звезд? Для этого нами была проварьирована допустимая разница звездных величин при начальном радиусе ансамбля, равном  $5'$ , и сигма-критерии, равном 2 (рис. 8).

Можно отметить, что разница в  $2^m$  является оптимальной, т.к. при меньшем значении не все возможные звезды попадают в ансамбль сравнения. При разнице больше  $2^m$  в ансамбль попадают звезды значительно более яркие или более слабые, чем изучаемый объект, что отрицательно сказывается на итоговой точности.

Из проделанного исследования можно сделать следующий вывод: в случае наличия в поле достаточного количества звезд наилучшая точность фотометрии будет достигаться при использовании тесных ансамблей с большим количеством звезд. Таким образом, набор оптимальных параметров для формирования ансамблей звезд сравнения выглядит следующим образом: начальный радиус ансамбля  $r = 5' - 7'$ , разница звездных величин  $\Delta m = 2^m$ , пороговая величина отношения стандартного отклонения блеска к теоретической ошибке для вхождения звезды в ансамбль  $\sigma = 2$ . При этом близость звезд по спектральному классу не важна.

На первый взгляд может показаться, что небольшие изменения в количестве «хороших звезд» и качестве «лучшей звезды» являются незначительными и не стоящими подбора оптимальных параметров. Но, во-первых, никогда не бывает вредным увеличить точность. Во-вторых, при обработке полей, содержащих тысячи звезд, количество «хороших звезд» может значительно увеличиться, что может отразиться на количестве кандидатов для поиска транзитов экзопланет типа «горячий юпитер» (например, если отбирать звезды с  $s < 0.^m02$ ).

#### 4. АПРОБАЦИЯ

Программа *Astrokit* используется для постобработки фотометрических данных, полученных на широкопольных телескопах сети МАСТЕР. Ниже представлены результаты ее применения для обработки фотометрического обзора участка Млечного Пути в созвездии Лебеда, а также наблюдений рассеянного звездного скопления NGC 188 и транзита экзопланеты WASP-11 b / HAT-P-10 b.

Все данные обрабатывались по единой схеме. Для фотометрической калибровки ПЗС-кадров применялись кадры темнового тока и плоского поля. В вечерние сумерки перед началом наблюдений получалось по пять кадров темнового тока для определенного набора экспозиций. Каждый итоговый кадр темнового тока для конкретной экспозиции формируется из пяти кадров медианным усреднением. Затем итоговый кадр вычитается из ПЗС-кадров с объектом исследования.

Кадры плоского поля в необходимом фильтре снимаются автоматически по утреннему сумеречному небу. При этом часовое ведение телескопа отключается. Диапазон линейности используемых ПЗС-детекторов ограничен 40 000 ADU, поэтому экспозиция для каждого фильтра подобрана так, чтобы количество отсчетов в пикселях не выходило за этот предел. Для каждого из пяти кадров плоского поля производится вычитание итогового кадра темнового тока с нужной экспозицией. Кадры плоского поля нормируются (отсчеты каждого пикселя делятся на среднее медианное значение отсчетов всех пикселей), а затем медианным усреднением формируется итоговый кадр плоского поля. На этот кадр производится деление ПЗС-кадров с объектом исследования. Использование кадров плоского поля позволяет учесть попиксельные вариации чувствительности и эффект виньетирования оптической системы.

После фотометрической калибровки в FITS-заголовке каждого кадра с помощью приложения *Astrometry.net* создаются корректные параметры, отвечающие за привязку системы координат. Затем в пакете IRAF выполняется апертурная фотометрия с помощью задания PHOT/APPHOT, результаты которой являются входными данными для *Astrokit*.

#### 4.1. Фотометрический обзор в созвездии Лебедя

С мая по август 2012 г. в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ проводились высокоточные ПЗС-наблюдения в рамках пилотного проекта по поиску новых транзитных экзопланет и переменных звезд. На телескопе МАСТЕР-II-Урал было получено 3600 кадров области размером  $2^\circ \times 2^\circ$  с центром в  $\alpha = 20^{\text{h}}30^{\text{m}}00^{\text{s}}$ ,  $\delta = 50^\circ30'00''$ . Выполнена фотометрия для 21 500 звезд с точностью от  $0^{\text{m}}006$  до  $0^{\text{m}}5$  в диапазоне от  $10^{\text{m}}$  до  $18^{\text{m}}$ . На рис. 9 показаны зависимости стандартного отклонения блеска звезд по всей серии наблюдений от звездной величины. Правый рисунок соответствует данным до обработки программой *Astrokit*, левый — после обработки.

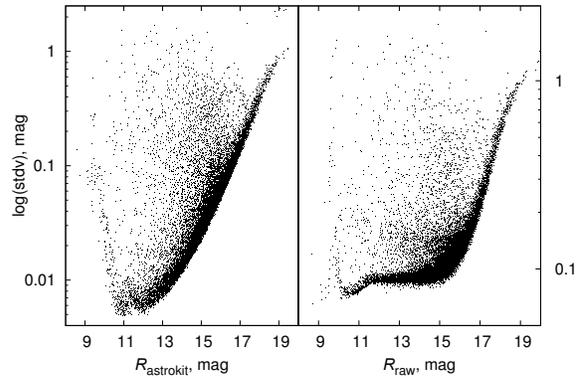


Рис. 9. Зависимость стандартного отклонения блеска звезд по всей серии наблюдений от звездной величины для исходных данных (справа) и для данных после обработки программой *Astrokit* (слева).

Как видно, использование разработанной программы позволяет уменьшить стандартное отклонение блеска некоторых звезд в десять раз.

При  $\text{RoMS} = 1$  около 20% общего числа звезд были отобраны программой *Astrokit* как кандидаты в переменные звезды. По результатам визуального осмотра кривых блеска кандидатов в переменные звезды было найдено 360 ранее неизвестных переменных звезд. Среди них:

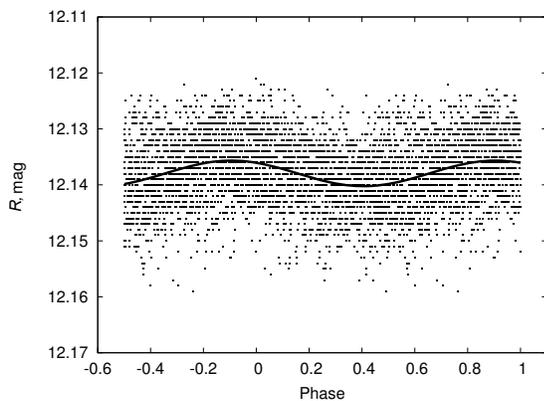
- 139 звезд с периодами более 20 дней;
- 100 звезд с периодами от 20 до 0.1 дня;
- 19 звезд с периодом менее 0.1 дня;
- 96 затменных звезд;
- 5 звезд со вспышками;
- 1 карликовая новая.

Среди найденных переменных звезд была открыта вспышка карликовой новой USNO-B1.0 1413-0363790 [18]. Несколько десятков переменных звезд были отобраны как кандидаты в звезды типа Дельта Щита ( $\delta$  Sct). Были обнаружены колебания блеска звезды с амплитудой всего в  $0^{\text{m}}005$  (рис. 10).

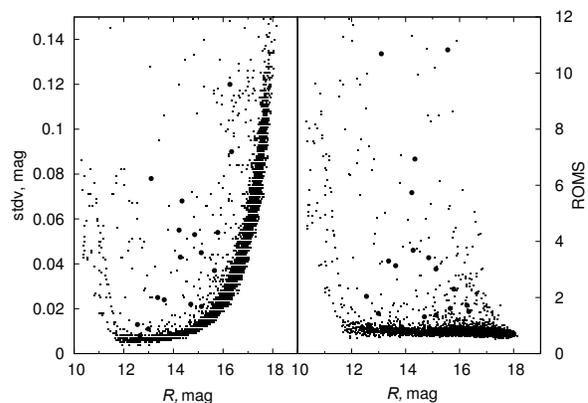
У двух звезд были обнаружены периодические падения блеска в  $0^{\text{m}}015$ . Предположительно, изменения потока излучения звезд могут быть вызваны транзитами экзопланет типа «горячий юпитер» с радиусом в 1/10 радиуса родительской звезды и обращающихся с периодами менее суток [19].

#### 4.2. Рассеянное скопление NGC 188

Наблюдения скопления NGC 188 в фильтрах *R* и *I* были проведены на телескопе МАСТЕР-II-Урал в марте 2011 г. в течение пяти ночей. Было



**Рис. 10.** Фазовая кривая блеска звезды 2MASS 20295743+5017071 с периодом  $0^{\text{d}}035$  и амплитудой  $0^{\text{m}}005$ . Сплошной линией отмечены фитированные данные.



**Рис. 11.** Стандартное отклонение блеска звезд (слева) и коэффициенты RoMS (справа) в зависимости от звездной величины. Закрашенными кружками отмечены переменные звезды.

получено около 400 кадров, постобработка которых выполнялась программой *Astrokit*. В области  $1^{\circ}5 \times 1^{\circ}5$  была выполнена апертурная фотометрия 5513 звезд от  $11^{\text{m}}$  до  $17^{\text{m}}$  в полосе  $R$  с соответствующей точностью от  $0^{\text{m}}006$  до  $0^{\text{m}}05$ . Несмотря на то, что скопление NGC 188 является хорошо изученным (более 500 статей за последние 50 лет), алгоритмом поиска переменных объектов было найдено 18 новых переменных звезд [20]. Стандартные отклонения блеска звезд в зависимости от звездной величины, полученные после обработки программой (слева), и коэффициенты RoMS для всех звезд (справа) показаны на рис. 11. На обоих графиках закрашенными кружками выделены переменные звезды. Как видно из рис. 11, стандартное отклонение блеска переменных звезд зачастую не отличается от стандартных отклонений блеска постоянных звезд, в то время как коэффициент RoMS позволяет более уверенно отбирать кандидаты в переменные объекты.

#### 4.3. Наблюдения транзитов внесолнечных планет

Прохождение даже самых больших внесолнечных планет типа «горячий юпитер» на близких орбитах на фоне диска родительской звезды (транзит) вызывает понижение блеска звезды примерно на  $0^{\text{m}}01$ . При таких величинах понижения блеска для уверенной регистрации самого факта наличия транзита, определения его продолжительности и момента середины необходимо иметь результирующую точность фотометрии порядка  $0^{\text{m}}001$ . Достижение заданной точности является непростой задачей для наземных телескопов и требует особого внимания при выполнении дифференциальной фотометрии.

Ниже представлено сравнение результатов работы программы *Astrokit* и классического способа дифференциальной фотометрии с одной звездой сравнения, которые использовались для обработки фотометрического наблюдения транзита внесолнечной планеты типа «горячий юпитер».

Наблюдение транзита экзопланеты WASP-11 b / HAT-P-10 b ( $R = 11^{\text{m}}01$ ,  $J - H = 0.46$ ,  $H - K = 0.14$ ) в фильтре  $R$  было проведено с помощью телескопа МАСТЕР-II-Урал 10 декабря 2012 г.

Кривая блеска транзита была получена классическим способом дифференциальной фотометрии с использованием одной звезды сравнения 3UC-242-019494 ( $R = 12^{\text{m}}$ ,  $J - H = 0.55$ ,  $H - K = 0.125$ ) и контрольной звезды 3UC-242-019559 ( $R = 11^{\text{m}}4$ ,  $J - H = 0.175$ ,  $H - K = 0.113$ ). Эти звезды находятся не дальше  $10'$  от WASP-11/HAT-P-10 ( $R = 11^{\text{m}}7$ ) и близки по блеску и показателям цвета. Кривая блеска, полученная по разности WASP-11/HAT-P-10 и звезды сравнения, показана на рис. 12 треугольниками. Стандартное отклонение разностей блеска звезды сравнения и контрольной звезды составило  $0^{\text{m}}006$ .

Коррекция блеска за неравномерность прозрачности земной атмосферы родительской звезды была выполнена программой *Astrokit* с помощью ансамбля из одиннадцати звезд. Звезды расположены в радиусе  $6'$  и отличаются не более, чем на  $2^{\text{m}}$  от изучаемой звезды. Точность фотометрии после коррекции оценивалась по стандартному отклонению блеска уже упомянутой контрольной звезды 3UC-242-019559 и составила  $0^{\text{m}}0039$ . Это значение примерно в полтора раза меньше, чем

стандартное отклонение блеска контрольной звезды при применении классического способа дифференциальной фотометрии, что показывает преимущества использования ансамблей сравнения. Полученная кривая блеска транзита экзопланеты изображена квадратами на рис. 12.

Данный транзит примечателен тем, что был получен во время полного лунного затмения. Хорошо заметно, что разброс точек увеличивается к концу транзита. Стандартное отклонение блеска родительской звезды до начала транзита (первые одиннадцать точек на графике) составляет  $0^m.002$  и начинает расти по мере роста фона неба, обусловленного выходом Луны из тени Земли. Стандартное отклонение блеска родительской звезды после конца транзита (последние одиннадцать точек) в четыре раза больше и составляет  $0^m.008$ .

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование тесного ансамбля звезд сравнения при проведении дифференциальной фотометрии позволяет учесть неравномерности рядов данных, вызванные локальными изменениями прозрачности атмосферы и вариациями фона неба, а также уменьшает вклад звездных мерцаний в бюджет ошибок получаемых величин блеска [1, 21]. При использовании более десяти опорных звезд в близком ансамбле сравнения становится несущественным отличие их спектральных классов от спектрального класса изучаемого объекта. Тем не менее, для достижения наибольшей точности остается важным небольшое различие в блеске (не более  $2^m$ ) и положение звезд ансамбля относительно объекта (удаление не более  $5' - 7'$ ).

Результирующая точность фотометрии после применения *Astrokit* позволяет находить малоамплитудные переменные звезды и изучать транзиты экзопланет типа «горячий юпитер».

Использование робастной медианной статистики объясняется ее большей устойчивостью к случайным выбросам. Однако это не дает стопроцентной гарантии отсутствия ложных переменных. Значительная часть звезд, заподозренных в переменности, при дальнейшем изучении оказывается постоянными в пределах точности фотометрии. Количество кандидатов в переменные звезды, как правило, составляет около 10% от общего числа звезд на кадре. Окончательным критерием при решении вопроса о переменности звезды является визуальный анализ ее кривой блеска.

Исходный код программы доступен по адресу <http://astro.ins.urfu.ru/dataproc>.

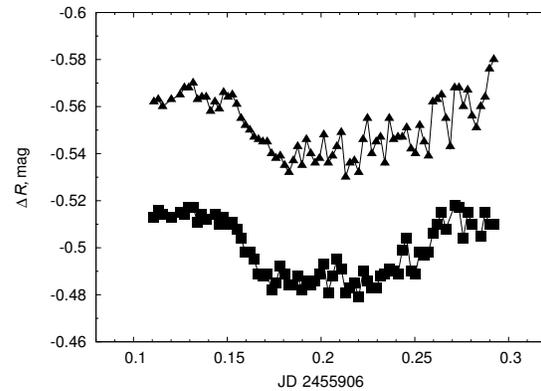


Рис. 12. Кривая блеска транзита экзопланеты WASP-11b/HAT-P-10b в фильтре *R*. Кривая, полученная с помощью одной звезды сравнения, изображена треугольниками, а с помощью ансамбля звезд сравнения — квадратами (для наглядности она смещена).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 2-02-31095 и № 14-02-31338. Авторы благодарят Екатерину Аввакумову за помощь в оформлении статьи и поддержку. Авторы выражают благодарность Кириллу Иванову за тестирование программы. Эта работа была выполнена с использованием баз данных VizieR, SIMBAD и NASA Astrophysics Data System, а так же интерактивного атласа Aladin, Страсбург, Франция.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. E. Everett and S. B. Howell, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **113**, 1428 (2001).
2. S. B. Howell, A. Warnock, III, and K. J. Mitchell, *Astron. J.* **95**, 247 (1988).
3. R. L. Gilliland and T. M. Brown, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **100**, 754 (1988).
4. R. L. Gilliland and T. M. Brown, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **104**, 582 (1992).
5. M. V. Newberry, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **103**, 122 (1991).
6. A. T. Young, R. M. Genet, and L. J. Boyd, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **103**, 221 (1991).
7. R. K. Honeycutt, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **104**, 435 (1992).
8. R. L. Gilliland, T. M. Brown, H. Kjeldsen, et al., *Astron. J.* **106**, 2441 (1993).
9. W. J. Merline and S. B. Howell, *Experimental Astronomy* **6**, 163 (1995).
10. S. B. Howell and M. E. Everett, in *Third Workshop on Photometry*, Ed. by W. J. Borucki and L. E. Lasher (Ames Research Center, Mountain View, 2001), pp. 1–7.

11. M. E. Everett, S. B. Howell, and D. Ousley, in *Third Workshop on Photometry*, Ed. by W. J. Borucki and L. E. Lasher (Ames Research Center, Mountain View, 2001), pp. 79–83.
12. S. B. Howell, in *Stellar Photometry—Current Techniques and Future Developments*, Ed. by C. J. Butler and I. Elliott (Cambridge University Press, Cambridge, 1993), p. 318.
13. D. Tody, SPIE Conf. Ser., No. 627, 733 (1986).
14. D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle, et al., *Astron. J.* **139**, 1782 (2010).
15. M. B. Rose and E. G. Hintz, *Astron. J.* **134**, 2067 (2007).
16. V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskey, et al., *Advances in Astronomy* **2010**, 349171 (2010).
17. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
18. A. Y. Burdanov, V. V. Krushinsky, D. Denisenko, et al., *Peremennye Zvezdy Prilozhenie* **12**(24) (2012).
19. A. Y. Burdanov, A. A. Popov, V. V. Krushinsky, and K. Ivanov, *Peremennye Zvezdy* **33**(2) (2013).
20. A. A. Popov, V. V. Krushinsky, E. A. Avvakumova, et al., *Open European Journal on Variable Stars*, No. 157, 1 (2013).
21. V. Kornilov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **425**, 1549 (2012).

## **Astrokit—an Efficient Software for High-Precision Differential CCD Photometry and Searching for Variable Stars**

**A. Y. Burdanov, V. V. Krushinsky, and A. A. Popov**

Having a need to perform differential photometry for tens of thousands stars in a several square degrees field, we developed **Astrokit** program. The software corrects the star brightness variations caused by variations of atmospheric transparency: to this end, the program selects for each star an individual ensemble of reference stars having similar magnitudes and positions in the frame. With ten or more reference stars in the ensemble, the differences between their spectral types and the spectral type of the object studied become unimportant. **Astrokit** searches for variable stars using Robust Median Statistics criterion, which allows candidate variables to be selected more efficiently than by analyzing the standard deviation of star magnitudes. The software allows very precise automatic analysis of long inhomogeneous sets of photometric observations of a large number of objects to be performed, making it possible to find “hot Jupiter” type exoplanet transits and low-amplitude variables. We describe the algorithm of the program and the results of its application to reduce the data of the photometric sky survey in Cygnus as well as observations of the open cluster NGC 188 and the transit of the exoplanet WASP-11 b/HAT-P-10 b, performed with the MASTER-II-URAL telescope of the Kourovka Astronomical Observatory of the Ural Federal University.

Keywords: *methods: observational—methods: data analysis—techniques: photometric—stars: variables: general*