

УДК 52-14; 524.3-3; 524.333

НОВАЯ ВЕРСИЯ МЕТОДА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ФОТОСФЕР: МУЛЬТИФАЗНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ЦЕФЕИД

© 2022 А. С. Расторгуев^{1,2*}, М. В. Заболотских²,
Я. А. Лазовик^{1,2}, Н. А. Горыня^{2,3}, Л. Н. Бердников²

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

³Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 9 марта 2022 года; после доработки 19 марта 2022 года; принята к публикации 22 марта 2022 года

Предложена новая версия метода пульсирующих фотосфер (Бааде–Беккера–Весселинка), использующая прямые спектроскопические измерения эффективных температур цефеид, выполненные в разных пульсационных фазах. Путем сравнения эффективных температур, рассчитанных по калибровкам нормальных цветов, с реальными спектроскопическими оценками, удалось не только определить избыток цвета с точностью порядка 0^m01 , но сразу по всем измеренным значениям эффективной температуры вывести новую цветовую калибровку эффективной температуры звезд высокой светимости, учитывающую также различия в металличности $[Fe/H]$ и в ускорении силы тяжести $\lg g$: $\lg T_{\text{эфф}} = 3.88 - 0.20(B - V)_0 + 0.026(B - V)_0^2 + 0.009 \lg g - 0.010(B - V)_0 \lg g - 0.051[Fe/H] + 0.051(B - V)_0[Fe/H]$, относительная точность которой составляет примерно 1.1%. Кроме того, доказана полная идентичность двух основных версий метода Бааде–Беккера–Весселинка: метода поверхностной яркости, впервые предложенного Барнесом и Эвансом в 1976 г. и метода максимального правдоподобия (или метода моделирования кривой блеска), предложенного Балона в 1977 г., позднее развитого Расторгуевым и Дамбисом в 2010 г. Этот подход, заключающийся в использовании существенно нелинейных цветовых калибровок $\lg T_{\text{эфф}}$ и болометрической поправки BC , легко переносится на метод поверхностной яркости. Данный метод применим также и в исследованиях других типов пульсирующих переменных звезд, например, лириды, мириды и переменных типа δ Щита с известными оценками эффективных температур.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — звезды: фундаментальные параметры — звезды: цефеиды*

1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения проблем, связанных с построением универсальной шкалы расстояний, было предложено множество различных методов. В частности, это относится и к калибровкам зависимости «период–светимость» цефеид, до сих пор рассматриваемых в качестве основных «стандартных свечей» в галактиках. Разумеется, использование прецизионных тригонометрических параллаксов может рассматриваться в качестве главного и наиболее предпочтительного метода калибровки светимостей, но в настоящее время тригонометрические параллаксы большинства цефеид, измеренные в ходе миссии GAIA и включенные в каталоги DR2 (Brown et al. 2018) и EDR3 (Brown et al. 2021), все еще недостаточно точны и обладают

как общей, так и зональной систематическими ошибками (Groenewegen 2018). Более того, даже при наличии прецизионных тригонометрических параллаксов цефеид остаются некоторые сомнения в надежности калибровок зависимости «период–светимость», связанные с влиянием эффектов дифференциального межзвездного поглощения и с различиями законов поглощения в разных направлениях в Галактике (см., например, Fitzpatrick and Massa (2007)). Тем не менее в качестве примера сошлемся на некоторые недавние исследования. В работе Riess et al. (2021) на основе тригонометрических параллаксов GAIA EDR3 75 цефеид Галактики с фотометрией HST сделана попытка оценки постоянной Хаббла. В цитируемой работе использованы систематические поправки к параллаксам, зависящие от эклиптической широты и «среднего» закона поглощения. В работе Rippe et al. (2020)

*E-mail: alex.rastorguev@gmail.com

для оценки светимостей большого числа цефеид Галактики с данными GAIA DR2 использован подход ABL (Astrometric Based Luminosity) (Arenou and Luri 1999) в пространстве параллаксов.

Альтернативный метод калибровки зависимости «период—светимость» цефеид опирается на членство цефеид в молодых рассеянных скоплениях, расстояния до которых определяются методом наложения теоретических изохрон на диаграммах Герцшпрунга—Рассела с использованием данных многоцветной фотометрии (см., например, работы An et al. (2007), Verdnikov et al. (1996)). По сравнению с тригонометрическими параллаксами цефеид фотометрические расстояния рассеянных скоплений, содержащих цефеиды, кажутся более надежными в смысле малости систематических ошибок. Однако недостатком метода является сравнительно малое число цефеид, членство которых в рассеянных скоплениях можно считать надежно доказанным, а также эффекты дифференциального поглощения в областях молодых рассеянных скоплений.

Наконец, следует отметить, что одним из самых эффективных средств оценки основных астрофизических характеристик цефеид — радиусов, светимостей и расстояний — по-прежнему остается метод пульсирующих фотосфер (метод Бааде—Беккера—Весселинка, далее BBW (Baade 1926, Becker 1940, Wesselink 1946)), также часто используемый для калибровки наклона и нуля—пункта зависимости «период—светимость» цефеид Галактики (Gieren et al. 2018, Groenewegen 2007, Lazovik and Rastorguev 2020, Molinaro et al. 2011, Storm et al. 2004; 2011a; b; 2012).

2. ВАРИАНТЫ МЕТОДА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ФОТОСФЕР

Существует два основных варианта метода BBW: метод поверхностной яркости (Surface Brightness, далее SB), впервые предложенный Barnes and Evans (1976), ставший наиболее популярным, и метод максимального правдоподобия (Maximum Likelihood, далее ML), предложенный впервые Balona (1977) и позднее существенно нами модифицированный (Rastorguev and Dambis 2011, Rastorguev et al. 2013) (далее RD). Первый метод по сути сводится к моделированию изменений радиуса цефеиды, а второй — к моделированию кривой блеска. Далее будет показано, что оба эти метода совершенно эквивалентны, они опираются на единую физическую основу: закон Стефана—Больцмана и связи между измеренными потоками, видимыми, абсолютными и болометрическими звездными величинами и расстоянием.

В рамках метода SB для определения физических параметров цефеид обычно используется линейная связь между так называемым «параметром поверхностной яркости» и нормальным цветом. При таком подходе перед вычислением среднего радиуса и светимости цефеиды требуется предварительно исправить кривые блеска и цвета за межзвездное покраснение и поглощение. В оригинальном варианте метода ML предварительное исправление эффектов поглощения не требуется, поэтому в результате удается определить только средний радиус цефеиды. Отметим также, что в оригинальном варианте метода ML неявно предполагается существование линейной связи $\lg T_{\text{eff}}$ и болометрической поправки BC_{λ} с нормальным цветом, что впервые было отмечено в работе Rastorguev and Dambis (2011), которые предложили обобщить метод ML путем использования нелинейных калибровок $\lg T_{\text{eff}}$ и BC_{λ} . Такая модификация метода ML, основанная на использовании хорошо известных нелинейных аппроксимаций $\lg T_{\text{eff}}$ и BC_{λ} по нормальным цветам (например, взятых из работ Bessell et al. (1998), Flower (1996)), позволяют определить не только средний радиус цефеиды, но также и индивидуальный избыток цвета и вычислить среднюю по потоку абсолютную величину и расстояние до цефеиды. В результате модифицированный метод RD может быть использован для калибровки зависимости «период—светимость» цефеид Галактики. Снова обратим внимание на то, что только использование нелинейных связей между $\lg T_{\text{eff}}$ и болометрической поправкой BC_{λ} , с одной стороны, и нормальным цветом, с другой стороны, открывает возможность определения избытка цвета с точностью около $0^{\text{m}}01$ — $0^{\text{m}}02$. То же самое относится и к методу SB. Легко понять, что в условиях большого разнообразия законов поглощения в Млечном Пути, отмеченного, в частности, в работе Fitzpatrick and Massa (2007), возможность независимого прямого определения индивидуальных избытков цвета цефеид является большим преимуществом нашего метода.

3. ЗАМЕЧАНИЯ О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ФОТОСФЕР

Покажем полную идентичность двух популярных вариантов метода BBW: метода поверхностной яркости SB и нашего варианта метода моделирования кривой блеска RD.

3.1. Вариант RD: моделирование кривой блеска

Как прямое следствие закона Стефана—Больцмана и связи абсолютной и видимой звездных величин мы можем записать выражение для видимой

звездной величины в какой-то фазе пульсационного цикла (см. детальный вывод в наших работах Rastorguev and Dambis (2011), Rastorguev et al. (2013)):

$$m = Y - 5 \lg \frac{R}{R_{\odot}} + \Psi(CI_0), \quad (1)$$

где R — текущий радиус цефеиды (вычисляемый путем интегрирования кривой лучевых скоростей), а постоянная Y содержит видимый модуль расстояния цефеиды, абсолютную болометрическую величину $M_{\text{bol}\odot}$ и логарифм эффективной температуры Солнца $\lg T_{\text{eff}\odot}$:

$$Y = (m - M)_{\text{app}} + M_{\text{bol}\odot} + 10 \lg T_{\text{eff}\odot},$$

а $\Psi(CI_0)$ — функция нормального цвета $CI_0 = CI - CE$ (CE — избыток цвета) и болометрической поправки BC к видимой величине, имеющая вид

$$\Psi(CI_0) = BC + 10 \lg T_{\text{eff}}. \quad (2)$$

Функция $\Psi(CI_0)$ в общем случае нелинейна по нормальному цвету, так как во многих работах выражение для логарифма эффективной температуры $T_{\text{eff}}(CI_0)$, так же, как и выражение для болометрической поправки BC , можно представить в виде степенных разложений по нормальному цвету CI_0 (иногда включающих члены с ускорением силы тяжести $\lg g$ и металличностью $[\text{Fe}/\text{H}]$):

$$\Psi(CI_0) = a_0 + \sum_{k=1}^N a_k CI_0^k.$$

3.2. Вариант SB: метод поверхностной яркости

Запишем выражения для освещенности, создаваемой цефеидой в какой-либо цветовой полосе (исправленной за межзвездное поглощение), и болометрической освещенности от цефеиды и Солнца:

$$\begin{aligned} E &= \frac{\pi}{4} \Phi \Theta_{\text{LD}}^2; \\ E_{\text{bol}} &= \frac{\pi}{4} \Phi_{\text{bol}} \Theta_{\text{LD}}^2 = \frac{\sigma}{\pi} T_{\text{eff}}^4; \\ E_{\text{bol}\odot} &= \frac{\sigma}{\pi} T_{\text{eff}\odot}^4. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих выражениях Φ и Φ_{bol} — поверхностная яркость звезды в выбранной фотометрической полосе и болометрическая поверхностная яркость соответственно (очевидно, не зависящие от расстояния!), σ — постоянная Стефана–Больцмана; Θ_{LD} — угловой диаметр звезды (с учетом потемнения к краю лимба), а Θ_{\odot} — угловой диаметр Солнца. Записав разности звездных величин ($m - m_{\text{bol}}$)

и ($m - m_{\odot}$) стандартным образом через логарифмы отношения соответствующих освещенностей, после простых алгебраических преобразований мы получим следующее выражение:

$$\lg \frac{\Theta_{\text{LD}}}{\Theta_{\odot}} = -0.2m - 2F(CI_0) + C, \quad (4)$$

где m — исправленная за поглощение звездная величина звезды,

$$F(CI_0) = 0.1BC + \lg T_{\text{eff}}; \quad (5)$$

$$C = 0.2m_{\text{bol}\odot} + 2 \lg T_{\text{eff}\odot}.$$

В этих выражениях $F(CI_0)$ — так называемый «параметр поверхностной яркости», введенный авторами Barnes et al. (2005), Barnes and Evans (1976)), а постоянная C включает в себя параметры Солнца. Важно отметить, что, исходя из нашего уравнения (2), параметр поверхностной яркости в выражении (4) будет выглядеть следующим образом: $F(CI_0) = 0.1\Psi(CI_0)$.

Принимая во внимание то, что

$$\frac{\Theta_{\text{LD}}}{\Theta_{\odot}} = \frac{R}{R_{\odot}} \frac{1 \text{ AU}}{D} = \frac{R}{R_{\odot}} \frac{1 \text{ pc}}{2.063 \times 10^5 D},$$

после несложных преобразований перепишем уравнение (5) в виде

$$5 \lg \frac{R}{R_{\odot}} = -m - 10F(CI_0) + X, \quad (6)$$

где постоянная

$$X = (m - M)_0 + M_{\text{bol}\odot} + 10 \lg T_{\text{eff}\odot},$$

$(m - M)_0$ — истинный модуль расстояния. В отсутствие межзвездного поглощения параметр $X = Y$, параметру из выражения (1), и оба выражения для двух вариантов метода пульсирующих фотосфер — RD (уравнение (1)) и SB (уравнение (5)) — выглядят совершенно идентичными с точностью до порядка членов и некоторых обозначений. Отсюда следует, что при использовании метода поверхностной яркости SB так же, как и в рамках метода моделирования кривой блеска RD, следует применять нелинейные по нормальному цвету калибровки для параметра поверхностной яркости $F(CI_0)$ (то есть нелинейные цветовые калибровки эффективной температуры $\lg T_{\text{eff}}$ и болометрической поправки BC). Легко понять, что использование нелинейных калибровок в рамках метода поверхностной яркости SB позволит, как и в нашем варианте метода моделирования кривой блеска RD, независимо и довольно точно оценивать избыток цвета (Rastorguev and Dambis 2011, Rastorguev et al. 2013).

Кроме того, мы считаем, что в современных условиях, когда объем фотометрических наблюдений цефеид существенно превышает объем данных

о лучевых скоростях, наш вариант метода моделирования кривой блеска RD является предпочтительным по сравнению с моделированием изменения радиусов SB.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИФАЗНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

4.1. Идея метода и наблюдательный материал

В данной статье мы более детально опишем еще один подход к проблеме определения радиусов, избытков цвета и светимостей цефеид, основанный на использовании мультифазных измерений их эффективных температур (Rastorguev et al. 2019). Результаты спектроскопических измерений эффективных температур, полученные методом отношений глубин пар спектральных линий (Line Depth Ratio, LDR) (Gray and Brown 2001) по данным эшелюной спектроскопии высокого разрешения ($R = 40\,000\text{--}60\,000$), а также значения поверхностного ускорения силы тяжести $\lg g$ и металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ опубликованы в ряде работ Andrievsky et al. (2005), Kovtyukh et al. (2005; 2008), Luck (2018), Luck and Andrievsky (2004), Luck et al. (2008). В работе Luck (2018) опубликован сводный каталог, содержащий 1127 спектроскопических оценок (эффективные температуры, химический состав, поверхностное ускорение силы тяжести) для 435 цефеид Галактики. Наибольшую ценность представляют данные о 52 цефеидах с числом измерений эффективной температуры пять и более. Как правило, характерная среднеквадратичная ошибка определения эффективных температур методом LDR по нескольким десяткам пар спектральных линий составляет от 30–40 К до 100 К.

Имеющиеся в настоящее время калибровки эффективной температуры (например, опубликованные в работах Bessell et al. (1998), Flower (1996)) весьма чувствительны к величине показателя цвета. Основная идея нового варианта алгоритма RD состоит в определении величины избытка цвета CE , обеспечивающей наилучшее согласие измеренных спектроскопически и предвычисленных значений эффективных температур $\lg T_{\text{эфф}}$, рассчитанных путем примененных калибровок « $\lg T_{\text{эфф}} - CI_0$ » к наблюдательной кривой изменения нормального показателя цвета: $CI_0(\varphi) = CI(\varphi) - CE$, где φ — пульсационная фаза. Для моделирования изменений $\lg T_{\text{эфф}}$ были использованы две упомянутые ранее калибровки эффективной температуры и болометрической поправки по нормальному цвету $(B - V)_0$ (Bessell et al. 1998, Flower 1996). Как было показано ранее в статье Rastorguev and Dambis (2011),

они обеспечивают наилучшее согласие наблюдаемых и смоделированных с помощью метода RD кривых блеска цефеид. Одновременно методом моделирования кривой блеска (Valona 1977), но с использованием нелинейного разложения по цвету (Sachkov et al. 1998), рассчитывались изменения пульсационного радиуса.

При проведении всех вычислений были использованы фотоэлектрические и ПЗС-наблюдения цефеид выборки в полосах BV из базы данных VizieR Online Data Catalog II/285 (Berdnikov 2008), многочисленные высокоточные измерения лучевых скоростей цефеид северного неба, опубликованные в работах Гогуня et al. (1992; 1996; 1998; 2002) и мультифазные спектроскопические измерения эффективных температур из каталога Luck (2018). При отборе фотометрических и спектральных данных предпочтение отдавалось квазисинхронным наблюдениям, для того чтобы максимально исключить возможность систематических ошибок определения избытков цвета, радиусов и светимостей, вызванных влиянием эволюционных изменений периодов цефеид на сдвиг фаз между кривыми блеска и кривыми лучевых скоростей. Как показали Sachkov et al. (1998), ошибки сдвига фаз — это главный источник значительных систематических ошибок, достигающих 30% в значении среднего радиуса.

4.2. Цветовая калибровка эффективной температуры

Благодаря высокой чувствительности вычисленной эффективной температуры к принимаемому значению избытка цвета, для 32 одиночных цефеид нашей выборки из общего числа 52 избытки цвета $E(B - V)$ были определены с точностью около $0^{\text{m}}01\text{--}0^{\text{m}}02$. На рис. 1а в качестве примера прекрасного согласия измеренных и рассчитанных температур показаны результаты моделирования температурных данных для цефеиды CD Cyg, для которой величина избытка с использованием калибровки Flower (1996) была оценена в $E(B - V) \approx 0^{\text{m}}59 \pm 0^{\text{m}}01$. Измерения эффективных температур $\lg T_{\text{эфф}}$ и значений поверхностного ускорения силы тяжести $\lg g$ взяты из спектральных работ Andrievsky et al. (2005), Kovtyukh et al. (2005; 2008), Luck (2018), Luck and Andrievsky (2004), Luck et al. (2008). Полный список цефеид, включающий также известные спектрально-двойные цефеиды, приведен в таблице 1 в статье Lazovik and Rastorguev (2020).

Мы также провели моделирование значений поверхностного ускорения силы тяжести. Для оценки текущих значений $\lg g$ были использованы вычисляемые для каждой фазы пульсаций значения

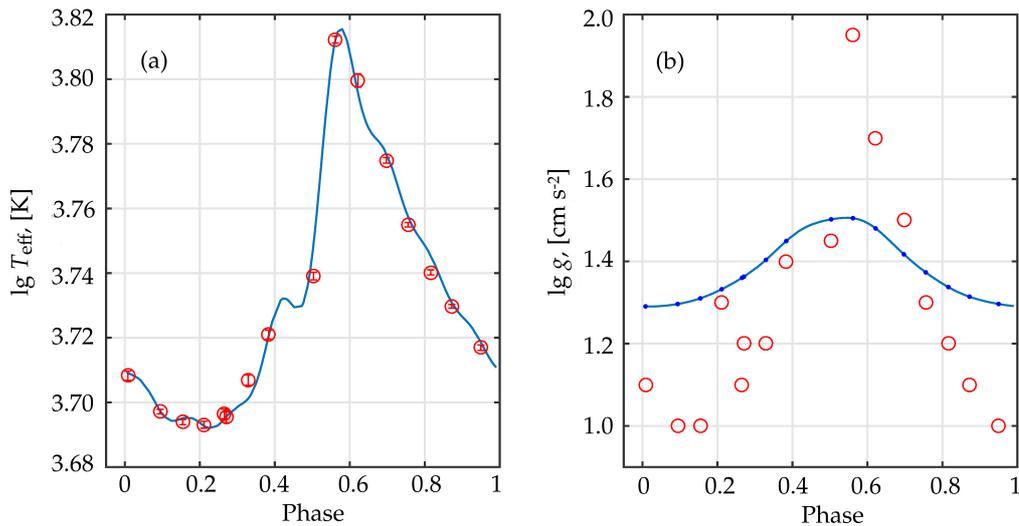


Рис. 1. Цефеида CD Cyg. (a) — сопоставление измеренных (кружки) и вычисленных с использованием калибровки Flower (1996) (сплошная линия) эффективных температур. Показанные на рисунке ошибки измерений не превышают размеров кружков. (b) — сопоставление измеренных (кружки) и вычисленных (сплошная линия) значений $\lg g$.

радиусов цефеид и приближенные оценки их эволюционных масс, сделанные нами на основе падуанских эволюционных треков (Bressan et al. 2012). Для сравнения с эволюционными треками абсолютные величины M_V оценивались по зависимости «период—светимость» (Verdnikov et al. 1996). Большинство цефеид находится на стадиях второго или третьего пересечения полосы неустойчивости, и их массы оценивались по приближенной формуле $\lg M_{\text{сер}}/M_{\odot} \approx 0.40 + 0.37 \lg P_0$, где P_0 — период основного тона пульсаций. Точность оценки эволюционной массы составляет $0.3\text{--}0.5 M_{\odot}$, и легко показать, что характерная ошибка оценки величины $\lg g$ составляет примерно $0.01\text{--}0.05$ для радиусов цефеид более $50 R_{\odot}$, следовательно, наша аппроксимация достаточно хороша. Для проекционного фактора в наших расчетах было взято часто используемое приближение с зависимостью от периода $pf \approx 1.376 - 0.064 \lg P_0$ (Nardetto et al. 2007).

На рис. 1b показано сравнение измеренных спектроскопически и рассчитанных нами значений $\lg g$. Средний радиус CD Cyg составляет примерно $90 R_{\odot}$, а полуамплитуда его изменения — около $10 R_{\odot}$. Отсюда несложно оценить максимальную величину изменения: $\Delta \lg g \approx 0.2$, что и демонстрирует сплошная кривая, меняющаяся в пределах от 1.3 до 1.5. В то же время спектроскопически измеренные значения $\lg g$ показывают неправдоподобно большой разброс в диапазоне от 0.7 до 2.0, хотя при этом фазы максимальных и минимальных значений $\lg g$ практически совпадают с рассчитанной кривой. Подобные различия измеренных и вычисленных значений $\lg g$ показыва-

ют все без исключения цефеиды нашей программы. Мы полагаем, что причиной неправдоподобно больших вариаций измеренных значений $\lg g$ на разных фазах пульсаций было не вполне корректное разложение профиля Фойгта спектральных линий, проведенное в работах Andrievsky et al. (2005), Kovtyukh et al. (2005; 2008), Luck (2018), Luck and Andrievsky (2004), Luck et al. (2008). Именно по этой причине выведенную в работе Kovtyukh et al. (2008) спектроскопическую калибровку нормальных цветов FGK-сверхгигантов и цефеид вида

$$\begin{aligned}
 (B - V)_0 = & (57.984 \pm 4.485) \\
 & - (10.3587 \pm 0.9797)(\lg T_{\text{eff}})^2 \\
 & + (1.67572 \pm 0.17631)(\lg T_{\text{eff}})^3 \\
 & - (3.356 \pm 0.461) \lg g \\
 & + (0.0321 \pm 0.0024)V_t \\
 & + (0.2615 \pm 0.0301)[\text{Fe}/\text{H}] \\
 & + (0.8833 \pm 0.1229) \lg g \lg T_{\text{eff}}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

нельзя считать корректной, поскольку при ее выводе использованы не вполне корректные спектроскопические определения $\lg g$.

На основе наиболее точных оценок избытков цвета 32 цефеид с многократными (более десяти) спектроскопическими измерениями эффективных температур мы сделали попытку более корректного вывода цветовой калибровки $\lg T_{\text{eff}}$, учитывающей также различия в металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $\lg g$. В нашем распоряжении для 32 цефеид имеется в общей сложности 407 значений измеренной эффективной температуры $\lg T_{\text{eff}}$ и металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$,

исправленные за покраснение показатели цвета $(B - V)_0$ и рассчитанные нами значения $\lg g$. Все расчеты — определения избытков цвета, радиусов, светимостей и изменений $\lg g$ — выполнены для каждой из двух лучших калибровок (Bessell et al. 1998, Flower 1996), использованных в качестве калибровки первого приближения. Для вывода уточненной калибровки использованы 407 значений исправленных показателей цвета $(B - V)_0$ и величин поверхностного ускорения силы тяжести $\lg g$, рассчитанных для моментов (пульсационных фаз) спектроскопических измерений $\lg T_{\text{eff}}$. По всем этим данным для каждой из указанных калибровок первого приближения методом оптимизации определялись коэффициенты новой калибровки и их ошибки. Как ожидалось, обе калибровки первого приближения дали практически совпадающие результаты.

В итоге мы нашли наилучшее по точности соотношение между нормальным цветом, ускорением силы тяжести, металличностью и эффективной температурой, имеющее вид:

$$\begin{aligned} \lg T_{\text{eff}} = & 3.88(\pm 0.01) \\ & - 0.20(\pm 0.02)(B - V)_0 \\ & + 0.026(\pm 0.008)(B - V)_0^2 \\ & + 0.009(\pm 0.004) \lg g \\ & - 0.010(\pm 0.006)(B - V)_0 \lg g \\ & - 0.051(\pm 0.017)[\text{Fe}/\text{H}] \\ & + 0.051(\pm 0.022)(B - V)_0[\text{Fe}/\text{H}]. \end{aligned} \quad (8)$$

Новая калибровка, учитывающая также различия в металличности и ускорении силы тяжести цефеид, обеспечивает относительную ошибку воспроизведения измеренной эффективной температуры порядка: $\sigma_T/T \approx 1.1\%$.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы продолжили развитие варианта метода BVW, впервые предложенного в наших работах (Rastorguev and Dambis 2011, Rastorguev et al. 2013) и основанного на использовании существенно нелинейных цветовых калибровок эффективной температуры $\lg T_{\text{eff}}$ и болометрической поправки BC , что открывает возможность независимой и весьма точной оценки избытков цвета цефеид. Предложена новая модификация метода, заключающаяся в использовании мультифазных спектроскопических оценок эффективных температур цефеид и их сравнении с температурами, предвычисленными с помощью известных калибровок. По 407 измерениям эффективной температуры 32 цефеид выведена новая калибровка, учитывающая также зависимость от металличности

$[\text{Fe}/\text{H}]$ и поверхностного ускорения силы тяжести $\lg g$, обеспечивающая точность оценки эффективной температуры порядка 1%. Метод был успешно использован в работе Lazovik and Rastorguev (2020) для вывода новой зависимости «период—светимость» цефеид.

Показано, что оба варианта метода BVW — метод поверхностной яркости и метод моделирования кривой блеска — являются совершенно эквивалентными и фактически опираются на цветовые калибровки так называемого «параметра поверхностной яркости», представляющего собой линейную комбинацию $\lg T_{\text{eff}}$ и BC . Оба варианта при использовании нелинейных по нормальному цвету калибровок параметра поверхностной яркости позволяют определить не только средний радиус цефеиды, но и независимо оценить избыток цвета и среднюю абсолютную величину цефеиды. При этом использование метода моделирования кривой блеска представляется более предпочтительным благодаря большему числу измерений блеска и показателя цвета по сравнению с объемом спектральных наблюдений. Легко понять, что предлагаемый метод, использующий измерения эффективных температур, приложим не только к цефеидам, но и к другим типам пульсирующих звезд: лиридам, миридам и переменным типа δ Щита.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за частичную финансовую поддержку настоящей работы (РФФИ, грант 19-02-00611).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. An, D. M. Terndrup, and M. H. Pinsonneault, *Astrophys. J.* **671** (2), 1640 (2007).
2. S. M. Andrievsky, R. E. Luck, and V. V. Kovtyukh, *Astron. J.* **130** (4), 1880 (2005).
3. F. Arenou and X. Luri, *ASP Conf. Ser.* **167**, 13 (1999).
4. W. Baade, *Astronomische Nachrichten* **228** (20), 359 (1926).
5. L. A. Balona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **178**, 231 (1977).
6. T. G. Barnes, III, J. Storm, W. H. Jefferys, et al., *Astrophys. J.* **631** (1), 572 (2005).
7. T. G. Barnes and D. S. Evans, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **174**, 489 (1976).
8. W. Becker, *Zeitschrift für Astrophysik* **19**, 289 (1940).

9. L. N. Berdnikov, *VizieR Online Data Catalog II/285* (2008).
10. L. N. Berdnikov, O. V. Vozyakova, and A. K. Dambis, *Astronomy Letters* **22** (6), 839 (1996).
11. M. S. Bessell, F. Castelli, and B. Plez, *Astron. and Astrophys.* **333**, 231 (1998).
12. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427** (1), 127 (2012).
13. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.) *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A1 (2018).
14. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.) *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021).
15. E. L. Fitzpatrick and D. Massa, *Astrophys. J.* **663** (1), 320 (2007).
16. P. J. Flower, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996).
17. W. Gieren, J. Storm, P. Konorski, et al., *Astron. and Astrophys.* **620**, id. A99 (2018).
18. N. A. Gorynya, T. R. Irsmbabetova, A. S. Rastorguev, and N. N. Samus, *Sov. Astron. Lett.* **18**, 316 (1992).
19. N. A. Gorynya, N. N. Samus', A. S. Rastorguev, and M. E. Sachkov, *Astronomy Letters* **22** (2), 175 (1996).
20. N. A. Gorynya, N. N. Samus', M. E. Sachkov, et al., *Astronomy Letters* **24** (6), 815 (1998).
21. N. A. Gorynya, N. N. Samus, M. E. Sachkov, et al., *VizieR Online Data Catalog III/229* (2002).
22. D. F. Gray and K. Brown, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **113**, 723 (2001).
23. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **474** (3), 975 (2007).
24. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A8 (2018).
25. V. V. Kovtyukh, S. M. Andrievsky, S. I. Belik, and R. E. Luck, *Astron. J.* **129** (1), 433 (2005).
26. V. V. Kovtyukh, C. Soubiran, R. E. Luck, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **389** (3), 1336 (2008).
27. Y. A. Lazovik and A. S. Rastorguev, *Astron. J.* **160** (3), id. 136 (2020).
28. R. E. Luck, *Astron. J.* **156** (4), id. 171 (2018).
29. R. E. Luck and S. M. Andrievsky, *Astron. J.* **128** (1), 343 (2004).
30. R. E. Luck, S. M. Andrievsky, A. Fokin, and V. V. Kovtyukh, *Astron. J.* **136** (1), 98 (2008).
31. R. Molinaro, V. Ripepi, M. Marconi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **413** (2), 942 (2011).
32. N. Nardetto, D. Mourard, P. Mathias, et al., *Astron. and Astrophys.* **471** (2), 661 (2007).
33. A. S. Rastorguev and A. K. Dambis, *Astrophysical Bulletin* **66** (1), 47 (2011).
34. A. S. Rastorguev, A. K. Dambis, M. V. Zabolotskikh, et al., *Proc. IAU Symp.* **289**, 195 (2013).
35. A. S. Rastorguev, Y. A. Lazovik, M. V. Zabolotskikh, et al., arXiv e-prints 1911.10413 (2019).
36. A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, et al., *Astrophys. J.* **908** (1), id. L6 (2021).
37. V. Ripepi, G. Catanzaro, R. Molinaro, et al., *Astron. and Astrophys.* **642**, id. A230 (2020).
38. M. E. Sachkov, A. S. Rastorguev, N. N. Samus', and N. A. Gorynya, *Astronomy Letters* **24** (3), 377 (1998).
39. J. Storm, B. W. Carney, W. P. Gieren, et al., *Astron. and Astrophys.* **415**, 531 (2004).
40. J. Storm, W. Gieren, P. Fouqué, et al., *Astron. and Astrophys.* **534**, id. A94 (2011a).
41. J. Storm, W. Gieren, P. Fouqué, et al., *Astron. and Astrophys.* **534**, id. A95 (2011b).
42. J. Storm, N. Nardetto, W. Gieren, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **341** (1), 115 (2012).
43. A. J. Wesselink, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **10**, 91 (1946).

New Version of the Pulsating Photospheres Method: Multiphase Temperature Measurements of Cepheids

A. S. Rastorguev^{1,2}, M. V. Zabolotskikh², Ya. A. Lazovik^{1,2}, N. A. Gorynya^{2,3}, and L. N. Berdnikov²

¹Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

³Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

We propose a new version of the (Baade–Becker–Wesselink) pulsating photospheres method based on direct spectral measurements of the effective temperatures of Cepheids carried out in different pulsation phases. By comparing the effective temperatures calculated using normal color calibrations with real spectroscopic estimates, we were able to not only determine the color excess with an accuracy of the order of 0^m01 mag, but also use all the measured effective temperature values to derive a new color calibration for the effective temperature of high luminosity stars, also taking into account the differences in metallicity [Fe/H] and surface gravity $\log g$: $\log T_{\text{eff}} = 3.88 - 0.20(B - V)_0 + 0.026(B - V)_0^2 + 0.009 \log g - 0.010(B - V)_0 \log g - 0.051[\text{Fe}/\text{H}] + 0.051(B - V)_0[\text{Fe}/\text{H}]$, the relative accuracy of which is approximately 1.1%. In addition, the complete identity of the two main versions of the Baade–Becker–Wesselink method was proved: the surface brightness method (SB), first proposed by Barnes and Evans in 1976, and the maximum likelihood method (or light-curve modeling method) proposed by Balona in 1977 and later improved by Rastorguev and Dambis in 2010. This approach consists of using significantly nonlinear color calibrations for $\log T_{\text{eff}}$ and bolometric correction BC and is easily applicable to the surface brightness method. This method is also applicable in studies of other types of pulsating variable stars, e.g., RR Lyrae, Mirae and δ Sct type variables with known effective temperature estimates.

Keywords: *methods: data analysis—stars: fundamental parameters—stars: Cepheids*