

УДК 524.31

В. В. Ковтюх¹, К. Соубиран², С. И. Белик¹,
М. П. Ясинская¹, Ф. А. Чехонадских¹, В. Малюто³

¹НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета
65014 Одесса, парк Шевченко

²Обсерватория Бордо BP21,
F-33270 Флуарак, Франция

³Тартуская обсерватория
61602 Тывравере, Эстония

Фундаментальные параметры и нормальные показатели цвета F-, G-, K-сверхгигантов и классических цефеид

По спектрам высокого разрешения с высоким отношением сигнал/шум определены высокоточные значения параметров атмосфер ($T_{\text{эф}}$, l_{gg} , V_b , $[Fe/H]$) для 68 непериодических F-, G-, K-сверхгигантов и 26 классических цефеид в 302 фазах изменения блеска. Очень точные эффективные температуры с ошибкой всего лишь 10–30 К найдены по отношению глубин линий. Получено, что наблюдаемые нормальные показатели цвета $(B - V)_0$ можно описать эмпирической зависимостью $(B - V)_0 = 57.984 - 10.3587(\lg T_{\text{эф}})^2 + 1.67572(\lg T_{\text{эф}})^3 - 3.356 l_{\text{gg}} + 0.0321V_t + 0.2615 [Fe/H] + 0.8833l_{\text{gg}}(\lg T_{\text{эф}})$. Это соотношение позволяет находить нормальные показатели цвета сверхгигантов и классических цефеид спектральных классов F0–K0 и классов светимости I и II с точностью 0.05^m, что сопоставимо с наиболее точными фотометрическими методами. Данная методика позволяет картировать межзвездное поглощение в значительной части Галактики с точностью 0.1–0.2^m.

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ І НОРМАЛЬНІ ПОКАЗНИКИ КОЛЬОРУ F-, G-, K-НАДГІГАНТІВ ТА КЛАСИЧНИХ ЦЕФЕЇД, Ковтюх В. В., Соубіран К., Бєлік С. І., Ясинська М. П., Чехонадських Ф. А., Малюто В. — За спектрами високого розділення та з високим відношенням сигнал/шум визначено високоточні значення параметрів атмосфер ($T_{\text{эф}}$, l_{gg} , V_b , $[Fe/H]$) для 68 незмінних F-, G-, K-надгігантів та 26 класичних цефеїд у 302 фазах зміни блиску. Дуже точні ефективні температури з похибкою лише 10–30 К знайдено за відношенням глибин ліній. Отримано, що спостережувані нормальні показники кольору $(B - V)_0$ можна описати емпіричною залежністю $(B - V)_0 = 57.984 - 10.3587(\lg T_{\text{эф}})^2 + 1.67572(\lg T_{\text{эф}})^3 - 3.356 l_{\text{gg}} + 0.0321V_t + 0.2615 [Fe/H] + 0.8833l_{\text{gg}}(\lg T_{\text{эф}})$. Це співвідношення дозволяє знаходити нормальні показники кольору надгігантів та класичних цефеїд зі спектрами F0–K0 та класами світності I і II з точністю 0.05^m, що можна порівняти з

найточнішими фотометричними методами. Ця методика дозволяє картувати міжзоряне поглинання на значній частині Галактики з точністю 0.1—0.2^m.

FUNDAMENTAL PARAMETERS AND INTRINSIC COLOURS OF FGK SUPERGIANTS AND CLASSICAL CEPHEIDS, by Kovtyukh V. V., Soubiran C., Belik S. I., Yasinskaya M. P., Chehonadskih F. A., Malyuto V. — On the basis of high-resolution and high signal-to-noise echelle spectra, some homogeneous atmospheric parameters (T_{eff} , $\lg g$, V_t , $[Fe/H]$) for 68 FGK non-variable supergiants and for 26 classical cepheids in 302 pulsation phases were derived with a high accuracy. An extremely high precision of the effective temperature determination (10—30 K) is achieved with the use of the line-depth ratio method. These parameters are correlated with unreddened B–V colour index compiled from the published literature to deduce the empirical relationship in the form: $(B - V)_0 = 57.984 - 10.3587(\log T_{\text{eff}})^2 + 1.67572(\log T_{\text{eff}})^3 - 3.356 \lg g + 0.0321V_t + 0.2615[Fe/H] + 0.8833(\lg g)(\log T_{\text{eff}})$. The relationship allows one to estimate intrinsic colours of individual supergiants and classical cepheids with an error of 0.05 mag, which matches the precision of the most sophisticated photometric procedures. The application range is F0–K0 and luminosity classes are I and II. Considering large distances to supergiants, we emphasize that the method described here enables us to make the large-scale extinction mapping of the Galaxy with a sensitivity down to 0.1—0.2 mag.

ВВЕДЕНИЕ

Сверхгиганты спектральных классов F, G, K, в число которых входят и классические цефеиды, обладая высокой светимостью, позволяют проводить исследование галактических градиентов химического состава и изучать распределение металличности в плоскости Галактики [2, 12, 16]. Обычно для решения всех этих и подобных задач используются классические цефеиды — благодаря известной зависимости период–светимость и надежно определенной шкале нормальных цветов [4, 15]. Использование для этих целей непременных сверхгигантов затруднительно из-за недостаточной точности методов определения светимостей и избытков цвета этих объектов. Однако сейчас ситуация изменилась. В последнее время с помощью использования спектральных критериев удалось на порядок повысить точность определения эффективных температур $T_{\text{эф}}$ карликов [10], гигантов [11] и сверхгигантов [7] поздних спектральных классов. До этого температуры сверхгигантов определялись с крайне низкой точностью — оценки температур одной звезды по разным данным нередко различались на 300—400 К и более. Именно высокая точность определения температур сверхгигантов (внутренняя точность порядка 10—30 К) позволила выявить тонкие эффекты распределения металличности в плоскости Галактики и нелинейность галактических градиентов для ряда химических элементов [12, 16]. Наличие методики определения высокоточных температур F-, G-, K-сверхгигантов позволяет сейчас решить и проблему надежного определения избытков цвета этих объектов. Знание избытков цвета позволяет исследовать распределение поглощающей материи на значительной площади (10×10 кпк и более) в плоскости Галактики. При увеличении точности определения светимостей непременных сверхгигантов их можно будет, наряду с цефеидами, использовать для надежного определения расстояний до разных звездных систем и диагностики особенностей распределения химических элементов в плоскости Галактики.

Целью работы является определение нормальных показателей цвета сверхгигантов с высокой точностью на основе спектральных данных.

НОРМАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦВЕТА СВЕРХГИГАНТОВ

В большинстве работ по определению межзвездного поглощения используется показатель цвета $B - V$. Нормальный показатель цвета, не искаженный межзвездным поглощением, определяется из выражения

$$(B - V)_0 = (B - V) - E(B - V),$$

где $E(B - V)$ — избыток показателя цвета, определяющий полное межзвездное поглощение в полосе V : $A_V = 3.3E(B - V)$ [4, 15].

Надежно определить избыток цвета из фотометрических данных нельзя из-за сильной чувствительности показателя $B - V$ к металличности звезды и другим ее параметрам. Мы поставили цель использовать для этого параметры атмосфер, достаточно надежно определенные спектральными методами.

Показатель цвета $(B - V)_0$ зависит от температуры, металличности $[Fe/H]$, ускорения свободного падения lgg , микротурбулентной скорости V_t и, возможно, от других факторов. Поэтому для надежного определения избытков цвета необходимо знать предельно точные значения этих параметров для возможно большего числа объектов. После этого можно построить аналитическую зависимость $(B - V)_0$ от $T_{эф}$, $[Fe/H]$, lgg , V_t и использовать параметры звезды, определенные по спектрам, для вычисления $(B - V)_0$.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕР СВЕРХГИГАНТОВ

Спектры сверхгигантов были получены на 1.93-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса (ОВП, Франция), оснащенный эшелле-спектрометром ELODIE [6]. Разрешающая способность спектрометра $R = 42000$, участок длин волн $\lambda\lambda = 440\text{—}680$ нм, отношение сигнал/шум 100—300.

Значения эффективных температур $T_{эф}$ определялись с использованием метода [7]. Этот спектроскопический метод основан на использовании отношений глубин избранных пар спектральных линий, наиболее чувствительных к температуре. Благодаря большому числу калибровок (131) этот метод обеспечивает внутреннюю точность определения $T_{эф}$ порядка 10—30 К (ошибка среднего). В качестве теста в работе [7] для ряда сверхгигантов температуры были определены по спектрам, полученным на разных телескопах и с разным разрешением ($R = 25\ 000 \dots 80\ 000$). Оказалось, что само значение $T_{эф}$ практически не зависит от самого разрешения, а при увеличении R только увеличивается точность определения $T_{эф}$ (ошибки уменьшаются примерно от 50—70 до 10—20 К соответственно). Для определения глубин R_λ и эквивалентных ширин W_λ линий использовался пакет программ DECH 20 [1].

Величина микротурбулентной скорости V_t определена из условия независимости содержания ионизированного железа Fe II, определяемого по набору линий, от их эквивалентных ширин [8]. Это вызвано тем, что линии Fe I сильно подвержены неЛТР-эффектам [2, 17, 18]. В то же время линии Fe II практически свободны от этого недостатка [19].

Параметр lgg определен из условия ионизационного равновесия для атомов Fe I и Fe II. При определении микротурбулентной скорости V_t по линиям Fe II содержание Fe I из-за влияния неЛТР-эффектов становится

сильно зависимым от эквивалентной ширины W_λ . Чем сильнее линия, тем в среднем больший дефицит она показывает по отношению к слабым линиям. Поэтому содержание Fe I определялось путем линейной интерполяции на линию с $W_\lambda = 0$ [8].

Такой модифицированный подход позволяет в значительной степени нивелировать неЛТР-эффекты для железа и дает возможность более точно определять параметры атмосфер и химический состав [8]. Мы использовали солнечные силы осцилляторов [8], определенные на основе атласа солнечного спектра Куруца и др. [14], солнечного химического состава, уточненного Гревесом и др. [5], и модель солнечной атмосферы Куруца [13].

Параметры атмосфер 68 непременных сверхгигантов приведены в таблице. Для каждой звезды указано число N использованных калибровок для определения $T_{\text{эф}}$, значения $T_{\text{эф}}$ и его стандартное отклонение, параметры атмосфер $\lg g$, V_t и $[\text{Fe}/\text{H}]$. По аналогичной методике были определены параметры 26 классических цефеид в 302 фазах изменения блеска [3, 9]. Таким образом, мы имеем 370 определений параметров сверхгигантов, сделанных в одной системе и по единой методике.

Точность определения параметров равна: $\Delta T_{\text{эф}} = \pm 30$ К (внутренняя точность), $\Delta \lg g = \pm 0.15$ dex, $\Delta V_t = \pm 0.2$ км/с, $\Delta [\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.1$ dex.

ПОКАЗАТЕЛИ ЦВЕТА

Этим 370 определениям параметров необходимо сопоставить соответствующие нормальные показатели цвета. В случае цефеид это сделать нетрудно, так как избытки цвета для них определялись неоднократно и известны с достаточной высокой точностью; мы использовали данные [15]. Наблюдаемые показатели цвета цефеид взяты из обширной базы наблюдений цефеид [<http://www.sai.msu.ru/groups/cluster/cep/phe>]. По ним вначале строилась кривая изменения $B - V$ с фазой изменения блеска, потом эта кривая аппроксимировалась фурье-гармониками 3-7-й степени для нахождения значений $B - V$ в тех фазах, для которых у нас имелись спектральные наблюдения.

Для непременных сверхгигантов значения избытков цвета взяты из работы [4]. В этой работе есть данные и для 25 классических цефеид, что позволяет сравнить шкалы избытков цвета [4] и [15]. В обеих работах за основу брались данные по сверхгигантам (и цефеидам) в рассеянных скоплениях. Сравнение показало, что эти шкалы практически совпадают (различие менее 0.02^m по общим звездам), и это позволяет использовать обе работы для нашей совокупности цефеид и сверхгигантов.

ПОИСК ЗАВИСИМОСТИ НОРМАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦВЕТА ОТ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХГИГАНТОВ

На основании данных о 302 мультифазных определениях параметров атмосфер классических цефеид и параметров 68 сверхгигантов была составлена матрица данных для нахождения полиномиальной зависимости $(B - V)_0$ от $\lg T_{\text{эф}}$, $\lg g$, V_t и $[\text{Fe}/\text{H}]$ методом наименьших квадратов. Первоначально задавался полином 7-й степени от $\lg T_{\text{эф}}$, линейные и вторые степени для $\lg g$, V_t , $[\text{Fe}/\text{H}]$, а также попарные множители всех этих переменных. После стандартного анализа, исключая члены с наименьшей корреляцией, окончательно получаем оптимальный вид полинома:

$$(B - V)_0 = 57.984 - 10.3587(\lg T_{\text{эф}})^2 + 1.67572(\lg T_{\text{эф}})^3 - 3.3561\lg g + 0.0321V_t + 0.2615[\text{Fe}/\text{H}] + 0.8833(\lg g)(\lg T_{\text{эф}}).$$

Параметры сверхгигантов

HD	$T_{эф}$	N	σ , К	lgg	V_t , км/с	[Fe/H]	$(B-V)_0$
1457	7636	26	11	2.3	4.8	-0.04	0.236 ^m
4362	5325	86	10	1.6	4.4	-0.15	0.829
7927	7341	15	42	1.0	8.7	-0.24	0.175
8906	6710	43	10	2.2	4.8	-0.07	0.384
9900	4529	58	16	1.7	2.7	0.10	1.324
9973	6654	64	14	2.0	5.7	-0.05	0.384
10494	6672	66	31	1.25	7.5	-0.20	0.337
11544	5126	55	9	1.4	3.5	0.01	0.966
16901	5553	81	8	1.7	4.3	-0.03	0.792
17971	6822	18	23	1.3	8.7	-0.20	0.362
18391	5823	61	20	1.2	11.5	0.02	0.763
20902	6541	61	11	2.0	4.8	-0.01	0.473
25291	7497	22	8	2.65	4.1	0.00	0.339
26630	5337	69	7	1.8	3.7	0.02	0.767
32655	6653	48	19	2.5	5.0	-0.13	0.371
36673	7500	27	9	2.3	4.4	0.07	0.211
36891	5082	85	7	1.7	3.3	-0.06	0.851
39949	5248	83	9	2.0	3.3	-0.05	0.860
44391	4599	43	8	1.6	3.4	0.03	1.237
45348	7557	29	6	2.2	2.7	-0.10	0.159
47731	4989	66	8	2.0	3.2	0.02	1.058
48329	4510	51	11	1.2	3.7	0.16	1.391
52497	5090	46	12	2.45	3.6	-0.02	0.921
54605	6443	67	10	1.5	10.2	-0.03	0.642
57146	5134	82	6	1.9	3.6	0.17	0.906
61227	7433	28	7.0	2.5	5.5	-0.16	0.297
74395	5264	84	6	1.8	3.0	-0.01	0.782
77912	4957	63	10	2.0	2.4	0.01	1.038
84441	5296	66	11	2.15	2.15	-0.01	0.758
92125	5354	86	10	2.4	2.7	0.05	0.802
159181	5220	64	7	2.2	3.4	0.04	0.854
164136	6483	21	35	3.1	4.5	-0.37	0.313
171237	6792	26	23	2.6	4.4	-0.09	0.307
171635	6141	76	11	2.15	5.2	-0.04	0.603
172365	6117	33	44	2.5	7.5	-0.07	0.624
173638	7444	22	11	2.4	4.7	0.11	0.286
174104	5657	16	45	3.1	4.8	-0.02	0.658
179784	4956	55	6	2.0	2.5	0.08	1.048
180028	6251	72	15	1.9	4.0	0.10	0.536
182296	5072	77	6	2.1	3.6	0.17	1.052
182835	6804	19	37	1.6	4.9	0.00	0.336
183864	5323	82	5	1.8	3.5	-0.02	0.775
185758	5390	68	11	2.4	2.1	-0.03	0.721
187203	5710	53	15	2.2	5.1	0.05	0.728
187299	4566	27	32	1.2	3.5	0.03	1.044
187428	5911	53	16	2.4	2.9	0.02	0.557
190113	4784	60	21	1.9	3.5	0.05	1.163
190403	4894	57	8	2.0	2.5	0.09	1.125
191010	5269	81	9	2.1	1.9	0.05	0.906
194093	6202	82	12	1.7	6.1	0.05	0.666
195295	6575	68	7	2.4	3.5	0.01	0.404
200102	5364	50	20	1.6	3.3	-0.13	0.835
200805	6865	6	49	2.2	4.6	-0.03	0.481
202314	5004	47	8	2.1	3.2	0.12	1.031
202618	6541	10	40	2.8	4.0	-0.16	0.423
204022	5375	84	7	1.5	3.9	0.01	0.913
204075	5287	77	10	2.0	2.6	-0.08	0.974
204867	5466	76	7	1.6	4.15	-0.04	0.814
207489	6350	78	11	2.85	5.6	0.13	0.475
208606	4702	43	8	1.4	4.0	0.11	1.273
209750	5210	66	6	1.4	3.55	0.02	0.947
210848	6163	77	17	3.0	3.2	0.08	0.484
216206	5003	53	4	2.1	3.2	0.02	1.014
218600	7458	5	44	2.4	4.8	-0.07	0.241
219135	5479	91	9	1.75	3.6	-0.01	0.823
220102	6832	35	18	2.5	5.8	-0.23	0.372
223047	4808	56	8	1.7	3.4	0.07	0.972
224165	4804	50	8	1.9	2.5	0.08	1.168

При вычислениях был получен коэффициент множественной корреляции, равный 0.9986. Вычисленные по этой формуле значения $(B - V)_0$ для сверхгигантов даны в последнем столбце таблицы, ошибка определения $(B - V)_0$ равна 0.05^m . Для получения оптимальной полиномиальной зависимости было исключено несколько точек, отклонившиеся более чем на 3σ . Анализ показал, что исключенные точки относятся к восходящей ветви кривых блеска цефеид, для которых возможны большие ошибки определения всех параметров из-за прохождения ударных волн.

Данное соотношение может быть в дальнейшем уточнено при увеличении числа объектов, а также может быть расширена область его применения. Возможно уточнение и за счет введения новых параметров (макротурбуленции, вращения), но и сейчас это соотношение имеет достаточную точность, которая позволяет решить целый ряд задач.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полученная нами ошибка 0.05^m сопоставима с ошибкой определения исходных избытков цвета сверхгигантов, поэтому можно сделать вывод об отсутствии других факторов, помимо учтенных, которые существенно влияли бы на показатели цвета. Эта небольшая ошибка (0.05^m) полностью отражает и неопределенность исходных параметров, в основном — в определении избытков цвета. Другим источником неопределенностей может быть возможная двойственность некоторых сверхгигантов — наличие спутника может исказить показатели цвета таких объектов. Незначительное влияние может оказать динамическая составляющая I_{gg} , вызванная пульсационными колебаниями цефеид, но она изменяет знак за цикл пульсации и поэтому может лишь незначительно увеличивать ошибку определения $(B - V)_0$ для цефеид: во всех фазах пульсации (за исключением, возможно, фаз восходящей ветви) атмосферы цефеид можно считать стационарными [3, 9].

Мы проанализировали возможное систематическое различие между переменными и непременными сверхгигантами, такого различия найдено не было. Это делает правомочным объединение этих объектов в одну группу и позволяет использовать полученную зависимость для получения $(B - V)_0$ и классических цефеид.

Итак, можно сделать вывод, что данная методика позволяет определять нормальные показатели цвета $(B - V)_0$ сверхгигантов с точностью 0.05^m , что не хуже известных методов определения этого параметра для сверхгигантов и классических цефеид. Следующим этапом работы будет создание методики высокоточного определения светимостей непременных сверхгигантов, что позволит использовать их, наравне с цефеидами, для анализа галактического распределения химических элементов на всей доступной оптическим телескопам части Галактики, что, в свою очередь, позволит существенно дополнить картину, получаемую сейчас только по цефеидам.

1. Галазутдинов Г. А. Система обработки звездных эшеле-спектров. — Нижний Архыз, 1992.—52 с.—(Препринт / Российская АН. Спец. астрофиз. обсерв.; № 92).
2. Любимков Л. С. Химический состав звезд: метод и результаты анализа. — Одесса: Астропринт, 1995.—323 с.
3. Andrievsky S. M., Luck R. E., Kovtyukh, V. V. Phase-dependent variation of the fundamental parameters of Cepheids. III. Periods between 3 and 6 days // *Astron. J.*—2005.—130, N 4.—P. 1880—1889.
4. Bersier D. Colour excesses of F-G supergiants and Cepheids from Geneva photometry // *Astron. and Astrophys.*—1996.—308, N 2.—P. 514—520.

5. *Grevesse N., Noels A., Sauval A. J.* Standard Abundances // Conf. College Park.—1996.—99.—P. 117—120.
6. *Katz D., Soubiran C., Cayrel R.* On-line determination of stellar atmospheric parameters T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ from ELODIE echelle spectra. I. The method // *Astron. and Astrophys.*—1998.—338, N 1.—P. 151—160.
7. *Kovtyukh V. V.* High-precision effective temperatures of 161 FGK supergiants from line-depth ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—378, N 2.—P. 617—624.
8. *Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M.* Do we really obtain reliable elemental abundances for supergiant stars? // *Astron. and Astrophys.*—1999.—351, N 2.—P. 597—606.
9. *Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M., Belik S. I., Luck R. E.* Phase-dependent variation of the fundamental parameters of Cepheids. II. Periods longer than 10 days // *Astron. J.*—2005.—129, N 2.—P. 433—453.
10. *Kovtyukh V. V., Soubiran C., Belik S. I., Gorlova N. I.* High precision effective temperatures for 181 F-K dwarfs from line-depth ratios // *Astron. and Astrophys.*—2003.—411, N. 2.—P. 559—564.
11. *Kovtyukh V. V., Soubiran C., Bienayme O., et al.* High-precision effective temperatures of 215 FGK giants from line-depth ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—371, N 3.—P. 879—884.
12. *Kovtyukh V. V., Wallerstein G., Andrievsky S. M.* Galactic Cepheids. I. Elemental abundances and their implementation for stellar and galactic evolution // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—2005.—117, N 6.—P. 1173—1181.
13. *Kurucz R. L.* Model atmospheres for population synthesis // *The stellar populations of galaxies: Symp. N 149.* — Dordrecht: Kluwer, 1992.—P. 225.
14. *Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* The solar flux atlas from 299 nm to 1300 nm. — Nat. Solar Obs. USA, 1984.
15. *Laney C. D., Caldwell J. A. R.* The reliability of Cepheid reddenings based on BV_Ic photometry // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—377, N 1.—P. 147—158.
16. *Luck R. E., Kovtyukh V. V., Andrievsky S. M.* The distribution of the elements in the galactic disk // *Astron. J.*—2006.—132, N 3.—P. 902—918.
17. *Lyubimkov L. S., Boyarchuk A. A.* Influence of deviations from LTE on the determination of microturbulence in the atmospheres of F-type supergiants // *Astrophysics.*—1984.—19, N 3.—P. 385—390.
18. *Lyubimkov L. S., Boyarchuk A. A., Sakhbullin N. A.* Effects of deviations from local thermodynamic equilibrium in the atmospheres of F supergiants. Part I. Overionization of Fe I atoms // *Astrophysics.*—1985.—21, N 2.—P. 203—210.
19. *Thevenin F., Idiart T. P.* Stellar iron abundances: non-LTE effects // *Astrophys. J.*—1999.—521, N 2.—P. 753—763.

Поступила в редакцию 31.08.07