

УДК 524.31.08-852:52-17

АТМОСФЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПРИМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦВЕТА GAIA ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

© 2024 О. Ю. Малков^{1*}, Г. Жао², Д. А. Ковалева¹, А. С. Авдеева^{1,3}, С. Г. Сичевский¹¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия²Национальные астрономические обсерватории Китая, Пекин, 100101 Китай³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 101000 Россия

Поступила в редакцию 20 октября 2023 года; после доработки 15 ноября 2023 года; принята к публикации 18 декабря 2023 года

С использованием моделей звездной эволюции, эмпирических атласов звездных спектров, библиотеки звездных моделей ATLAS9 и опубликованных соотношений между наблюдательными и астрофизическими характеристиками звезд разных классов светимости исследованы возможности их разделения в пространстве атмосферных и фотометрических параметров $\langle T_{\text{eff}} - \lg g \rangle$, $\langle T_{\text{eff}} - (B - R)_0 \rangle$ (Джонсона) и $\langle T_{\text{eff}} - (BP - RP)_0 \rangle$ (Gaia). Предложена аппроксимация линий начальной (ZAMS) и конечной (TAMS) главной последовательности в координатах $\langle T_{\text{eff}} - \lg g \rangle$; при этом более 90% звезд класса светимости III из эмпирических атласов звездных спектров сдвинуты в сторону меньших значений $\lg g$ относительно TAMS и, как правило, имеют значения $\lg g < 3.2$. Показано, что зависимость $\langle T_{\text{eff}} - (B - R)_0 \rangle$ в фотометрической системе Джонсона чувствительна к классу светимости в определенных диапазонах эффективных температур. В то же время обнаружено, что зависимость $\langle T_{\text{eff}} - (BP - RP)_0 \rangle$ для звезд главной последовательности в фотометрической системе Gaia одинаковая (с точностью лучше $0^{\text{m}}15$) для звезд всех классов светимости и всех спектральных типов, более ранних, чем M2.

Ключевые слова: *звезды: атмосферы — звезды: фундаментальные параметры*

1. ВВЕДЕНИЕ

Третий релиз данных миссии Gaia (Vallenari et al., 2023) является самым большим, охватывающим все небо однородным источником астрометрических, фотометрических и спектроскопических данных. В частности, опубликованы астрофизические параметры (эффективная температура, ускорение силы тяжести, металличность, светимость и прочее), оценки которых были получены по наблюдательным данным Gaia для более чем 470 миллионов звезд (Andrae et al., 2022; Creevey et al., 2022). Для полноценного использования этих данных при решении различных задач требуются калибровочные соотношения между различными параметрами. Так, для оценки величины межзвездного поглощения желательно иметь представление о собственном показателе цвета звезды (связанном с эффективной температурой), а применение этого и других фундаментальных соотношений (известных, преимущественно, только для звезд главной последовательности (ГП)) требует информации о классе светимости объекта.

В работах Avdeeva et al. (2021), Nekrasov et al. (2021), Malkov et al. (2022) авторы предприняли пилотное исследование, направленное на построение карты межзвездного поглощения с использованием данных Gaia и спектроскопических обзоров LAMOST (Luo et al., 2015) и RAVE (Kunder et al., 2017). Предварительные результаты говорят о перспективности используемого метода, однако его применение ограничивается относительно близкими звездами ГП из-за отсутствия в литературе соотношения между собственным показателем цвета и эффективной температурой для всех классов светимости LC (luminosity classes), за исключением LC = V.

Предварительно необходимо выделить (в частности, среди объектов Gaia) звезды ГП, ориентируясь на значение атмосферных параметров, прежде всего — $\lg g$. Этому вопросу посвящен раздел 2, а проблема применимости соотношения между собственным показателем цвета и эффективной температурой к звездам различных классов светимости обсуждается в разделе 3.

*E-mail: malkov@inasan.ru

2. ЗВЕЗДЫ ГП В ПРОСТРАНСТВЕ АТМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Одной из наших задач являлось определение области в пространстве атмосферных параметров « $T_{\text{eff}} - \lg g$ », где могут применяться соотношения, полученные по данным о звездах ГП. Вопрос о связи атмосферных параметров со спектральной классификацией обсуждался нами ранее в работе Malkov et al. (2020).

Здесь для решения поставленной задачи мы использовали модели звездной эволюции MIST (Dotter, 2016). Эти данные позволили провести в пространстве атмосферных параметров теоретические зависимости для звезд ГП нулевого (ZAMS) и конечного (TAMS) возраста (см. таблицу 1 и рис. 1). На рис. 1 для сравнения также показано соотношение « $T_{\text{eff}} - \lg g$ » для звезд ГП из работы Pecaat and Matajek (2013) (см. также работу Pecaat et al. (2012) и соответствующую сводную таблицу¹⁾), при этом величина $\lg g$ вычислялась в соответствии с уравнением:

$$\lg g = 4.438 + \lg M_*/M_{\odot} - 2 \lg R_*/R_{\odot}. \quad (1)$$

Здесь предполагается, что ускорение свободного падения g (см с^{-2}) на поверхности звезды определяется выражением $g = GM_*/R_*^2$, где M_* и R_* — масса и радиус звезды соответственно, а $G = 6.6743 \times 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г с}^{-2}$ — гравитационная постоянная.

TAMS и ZAMS на рис. 1 могут быть приближенно, кусочно-линейно аппроксимированы. Так, зависимость $\lg g$ от T_{eff} для TAMS (то есть линия, отделяющая звезды ГП от звезд более ярких классов светимостей) может быть примерно записана как

$$\lg g = \begin{cases} -2.83 \times 10^{-4} T_{\text{eff}} + 5.61, & \text{если } 3000 < T_{\text{eff}} < 7000; \\ 3.50 \pm 0.07, & \text{если } 7000 < T_{\text{eff}} < 22\,000. \end{cases} \quad (2)$$

Аналогичная граница «снизу» для ГП (ZAMS) может быть выражена как

$$\lg g = \begin{cases} -2.01 \times 10^{-4} T_{\text{eff}} + 5.65, & \text{если } 3000 < T_{\text{eff}} < 7000; \\ 4.30 \pm 0.02, & \text{если } 7000 < T_{\text{eff}} < 27\,000. \end{cases} \quad (3)$$

Величину погрешности значения $\lg g$ для наклонных участков в уравнениях (2) и (3) мы оцениваем как ± 0.05 .

¹⁾http://www.pas.rochester.edu/~ematajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt

Таблица 1. Параметры T_{eff} и $\lg g$ звезд на ZAMS и TAMS, полученные по эволюционным трекам MIST (Dotter, 2016)

M/M_{\odot}	ZAMS		TAMS	
	$\lg T_{\text{eff}}, [\text{K}]$	$\lg g$	$\lg T_{\text{eff}}, [\text{K}]$	$\lg g$
0.1	3.460	5.236	3.555	5.156
0.2	3.509	5.055	3.623	4.586
0.3	3.533	4.985	3.594	4.476
0.4	3.557	4.911	3.595	4.443
0.5	3.580	4.815	3.630	4.364
1.0	3.756	4.546	3.756	4.060
1.5	3.834	4.267	3.803	3.746
2.0	3.966	4.304	3.843	3.519
2.5	4.037	4.325	3.903	3.452
3.0	4.092	4.324	3.959	3.425
4.0	4.175	4.316	4.053	3.434
5.0	4.235	4.306	4.126	3.479
6.0	4.296	4.306	4.186	3.525
7.5	4.357	4.299	4.251	3.549
10.0	4.423	4.279	4.333	3.572

Для сравнения с наблюдательными данными на диаграмму « $T_{\text{eff}} - \lg g$ » были нанесены данные для звезд-гигантов из эмпирических атласов звездных спектров ELODIE (Prugniel et al., 2007), Indo-US (Valdes et al., 2004), MILES (Falcón-Barroso et al., 2011), STELIB (Le Borgne et al., 2003), а также небольшого количества гигантов из работы Eker et al. (2018) (обозначим эти наборы буквами E, I, M, S, K соответственно) — всего около 800 объектов (см. рис. 2). Можно видеть, что у большинства гигантов значение $\lg g$ не превышает 3.2, однако небольшая часть объектов (54 объекта, 7%) лежит под TAMS.

Не исключено, что эти объекты имеют неверную классификацию в эмпирических атласах звездных спектров (отметим, что K- и M-наборы не содержат объектов, лежащих под TAMS). Это предположение отчасти подтверждается следующим обстоятельством. Ряд звезд-гигантов включен одновременно в несколько атласов, или даже в один и тот же атлас, но с различными наборами атмосферных параметров. При этом есть случаи, когда согласно данным из одного атласа звезда лежит под

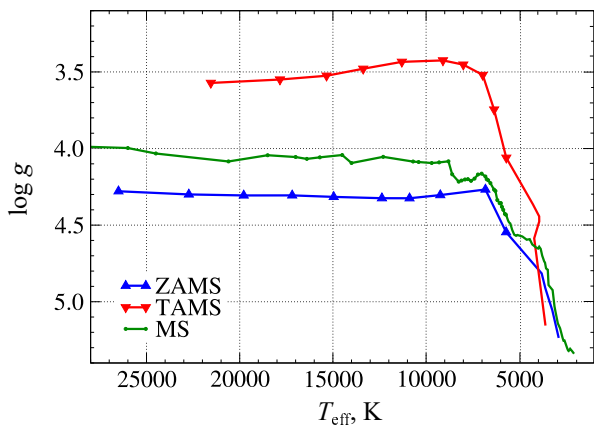


Рис. 1. TAMS (красный) и ZAMS (синий цвет) на диаграмме « $T_{\text{eff}} - \lg g$ » (см. таблицу 1). Зеленая кривая — соответствующее соотношение для звезд ГП из работы Pecaat and Majaek (2013).

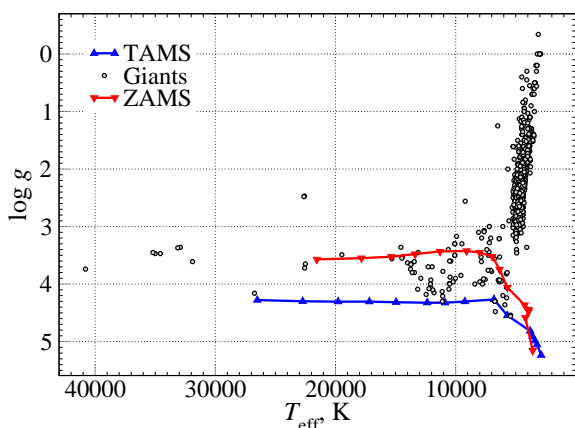


Рис. 2. Те же TAMS и ZAMS, что и на рис. 1, но в другом масштабе. Серые точки — звезды-гиганты из эмпирических атласов звездных спектров.

TAMS, согласно другому — над TAMS. Примеры:

- HD 2628 в E-наборе лежит под TAMS,
а в I-наборе — над TAMS;
HD 39833 в E-наборе лежит под TAMS,
а в I-наборе — над TAMS;
HD 78316 в S-наборе лежит под TAMS,
а в I-наборе — над TAMS;
HD 155763 в I-наборе лежит под TAMS,
а в E-наборе — над TAMS.

Эмпирические атласы звездных спектров не предоставляют значений наблюдательных ошибок. Предположение о десятипроцентной относительной ошибке значений T_{eff} и $\lg g$ также выводит часть объектов в область над TAMS. Вероятно, часть из них являются на самом деле субгигантами или карликами. Кроме того, некоторые из этих объектов могут быть переменными звездами, что

также может исказить значения их наблюдательных атмосферных параметров.

Таким образом, можно считать, что соотношения (2) и (3) могут приблизительно ограничивать область ГП на диаграмме « $T_{\text{eff}} - \lg g$ ».

3. СОБСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦВЕТА ГИГАНТОВ И СВЕРХГИГАНТОВ

Рассмотрим вопрос о границах применимости соотношений «показатель цвета — эффективная температура» звезд ГП к звездам других классов светимости.

Еще в классической работе Flower (1996), посвященной созданию фундаментальных соотношений между эффективной температурой, показателями цвета и болометрической поправкой, утверждалось, что «All luminosity classes appear to follow a unique $BC - T_{\text{eff}}$ relation», то есть можно применять единое соотношение для всех классов светимости, и нет необходимости создавать свое соотношение для каждого из них. Эта точка зрения впоследствии, по крайней мере в первом приближении, подтверждалась (см., например, Eker and Bakış, 2023; Straižys, 1992). Вероятно, это явление может быть в какой-то степени распространено и на некоторые зависимости вида «показатель цвета — T_{eff} ».

В работе Pecaat and Majaek (2013) (см. также работу Pecaat et al. (2012) и сводную таблицу¹⁾) приводятся многочисленные и детальные соотношения между астрофизическими (масса, радиус и другие) и атмосферными (T_{eff} , $\lg g$ и другие) параметрами, а также показателями цвета в различных фотометрических системах: Джонсона (U, B, V), Tycho (B_T, V_T), Казинса (R_c, I_c), Gaia (G, BP, RP), Sloan (i, z, Y), 2MASS (J, H, K_s), MKO (J, K), WISE ($W1, W2, W3, W4$) для звезд ГП.

Здесь мы исследуем вопрос о возможности создания подобных соотношений для собственных показателей цвета для гигантов и сверхгигантов, в первую очередь в применении к показателю цвета Gaia $(BP - RP)_0$ (в литературе искомые соотношения отсутствуют).

3.1. Фотометрическая система Джонсона

Отдаленными аналогами полос Gaia BP и RP можно считать полосы Джонсона B и R (рис. 3). Для них существуют детальные таблицы (Straižys, 1992) для различных классов светимости. Эти данные приведены на рис. 4.

Можно видеть, например, что показатель цвета $(B - R)_0$ для сверхгигантов отличается от ГП не более, чем на $\Delta(B - R)_0 = 0^{\text{m}}2$ для звезд горячее,

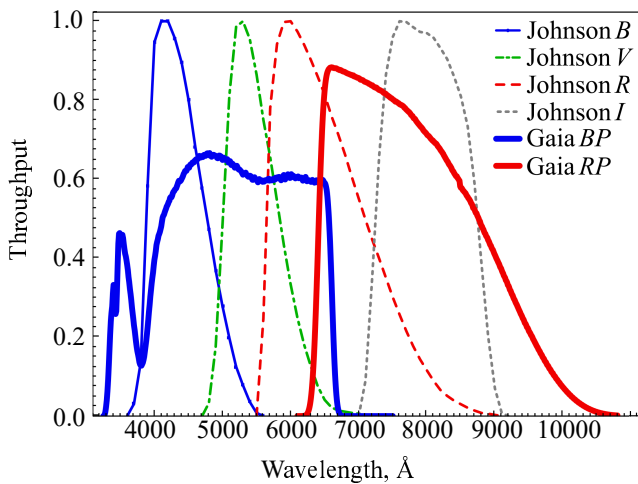


Рис. 3. Кривые реакции фотометрических полос в системах Джонсона (Johnson, 1955; Cousins, 1976) и Gaia DR2 (Evans et al., 2018).

чем $T_{\text{eff}} = 5700$ К (что соответствует спектральному типу G0I), а также в диапазоне температур 3350–3700 К (M3–M0). Все данные по отличиям $(B - R)_0$ гигантов (LC = III) и сверхгигантов (LC = I) сведены в таблице 2.

3.2. Фотометрическая система Gaia

В предыдущем разделе мы определили диапазоны температур (спектральных типов), в которых к гигантам и сверхгигантам могут применяться соотношения « $(B - R)_0 - T_{\text{eff}}$ » для ГП. Однако фотометрические полосы Gaia BP/RP заметно отличаются от соответствующих полос в системе Джонсона (см. рис. 3), что требует для них отдельного анализа.

Теоретические показатели цвета $(BP - RP)_0$ для звезд с различными значениями T_{eff} и $\lg g$ вычислялись по данным библиотеки моделей звездных атмосфер ATLAS9 (Castelli and Kurucz, 2003), кривые реакции полос Gaia брались из Evans et al. (2018). Химический состав моделей фиксировался на солнечном значении.

Отметим, что эти теоретические соотношения для показателя цвета $(BP - RP)_0$ имеют в качестве аргументов атмосферные параметры, а не двумерную спектральную классификацию. О связи между этими параметрами см. работу Malkov et al. (2020). Результаты расчетов представлены на рис. 5.

Можно видеть, например, что показатель цвета $(BP - RP)_0$ для $\lg g = 1.0$ (сверхгиганты) отличается от $\lg g = 5.0$ (ГП) не более чем на $\Delta(BP - RP)_0 = 0^{\text{m}}17$ для звезд в диапазоне температур $T_{\text{eff}} = 7000 - 8000$ К (соответствует спектральным типам A7–F2). Все данные по отличиям

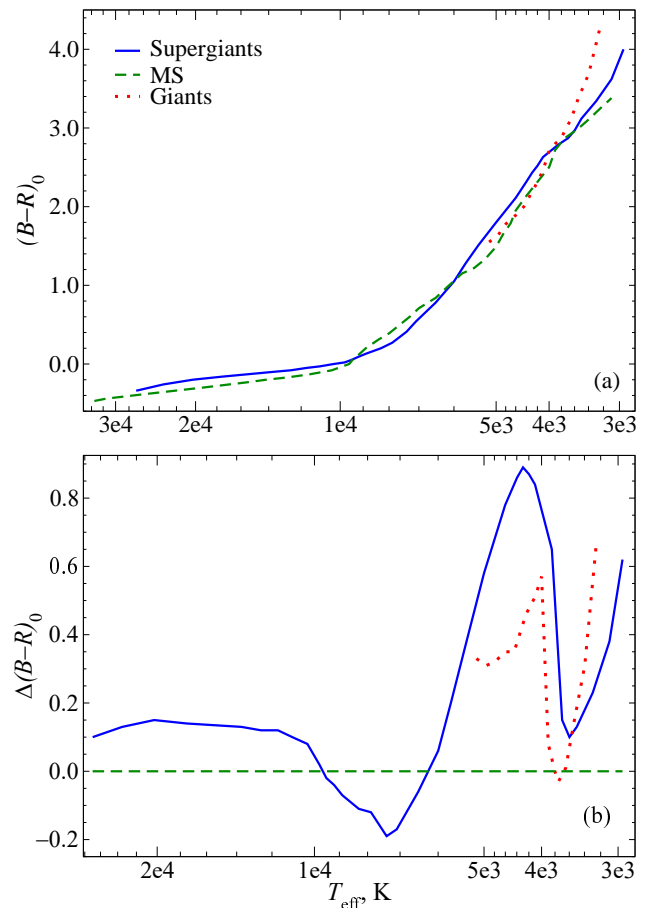


Рис. 4. Панель (a) — показатели цвета $(B - R)_0$ гигантов (красная пунктирная линия), сверхгигантов (синяя сплошная) и главной последовательности (зеленая штриховая линия) для различных значений эффективной температуры; панель (b) — отличие показателей цвета от главной последовательности по данным Straižys (1992); обозначения те же.

$(BP - RP)_0$ звезд ГП от звезд других классов светимости сведены в таблице 3.

Наши результаты показывают хорошее согласие с полученными в работе Casagrande et al. (2021), в которой приводятся зависимости « $(BP - RP)_0 - T_{\text{eff}}$ » для звезд в диапазоне температур $4000 < T_{\text{eff}} < 9000$ К.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная задача настоящей работы — исследование соотношений между атмосферными параметрами звезд и их собственными показателями цвета, в частности, в фотометрической системе Gaia. Используя модели звездной эволюции MIST, мы предложили аппроксимацию ZAMS и TAMS в координатах атмосферных параметров « $T_{\text{eff}} - \lg g$ » кусочными функциями (3) и (2) соответственно. Сопоставление с данными о звездах-гигантах и

Таблица 2. Диапазоны T_{eff} в К, в которых соотношение « $(B - R)_0 - T_{\text{eff}}$ » для ГП может быть применено к гигантам и сверхгигантам с точностью не хуже $\Delta(B - R)_0$

LC	$\Delta(B - R)_0$	
	$0^{\text{m}}2$	$0^{\text{m}}4$
I	$T_{\text{eff}} > 5700$ (G0)	$T_{\text{eff}} > 5300$ (G3)
	$3350 < T_{\text{eff}} < 3700$ (M3–M0)	$3100 < T_{\text{eff}} < 3800$ (M4–K6)
III	$3500 < T_{\text{eff}} < 3950$ (M4–K7)	$T_{\text{eff}} > 4350$ (K2)
		$3350 < T_{\text{eff}} < 3950$ (M5–K7)

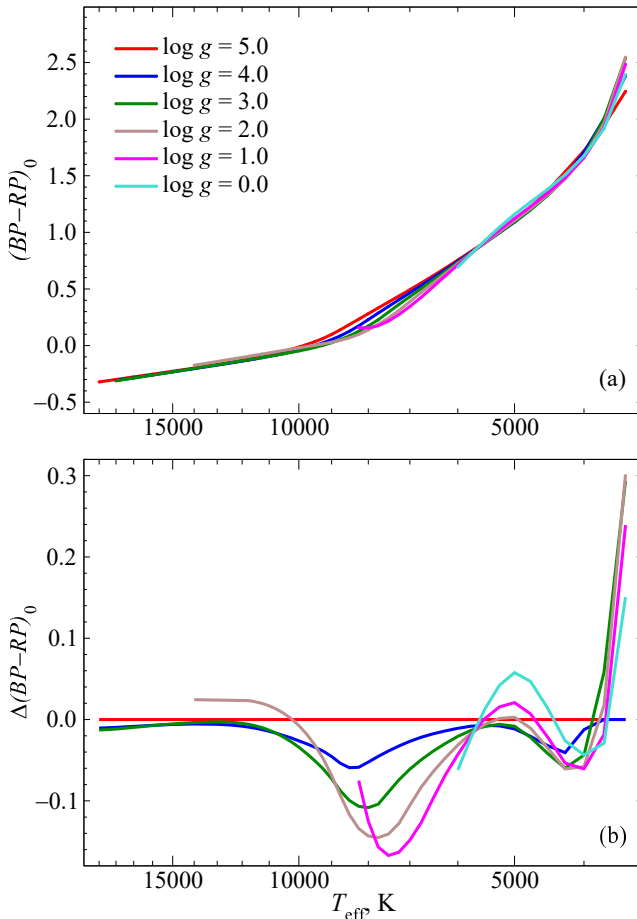


Рис. 5. Панель (а) — показатель цвета $(BP-RP)_0$ для различных значений $\lg g$ (5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0, 0.0: красный, синий, зеленый, коричневый, пурпурный и голубой соответственно); панель (б) — отличие показателей цвета от $\lg g = 5.0$.

сверхгигантах из эмпирических атласов звездных спектров ELODIE, Indo-US, MILES, STELIB показало, что 93% таких звезд расположены на диаграмме « $T_{\text{eff}} - \lg g$ » в области меньших значений $\lg g$ относительно TAMS и, как правило, имеют значения $\lg g \leq 3.2$. Оставшиеся 7% звезд, классифицированных как гиганты или сверхгиганты,

Таблица 3. Диапазоны T_{eff} в К, в которых соотношение « $(BP-RP)_0 - T_{\text{eff}}$ » для ГП может быть применено к звездам других классов светимости с точностью не хуже $\Delta(BP-RP)_0$; в круглых скобках указаны соответствующие спектральные типы

$\Delta(BP-RP)_0$	
$0^{\text{m}}05$	$0^{\text{m}}15$
$T_{\text{eff}} > 9500$ (A0)	$T_{\text{eff}} > 3600$ (M2)
$5100 < T_{\text{eff}} < 5900$ (K0–G0)	
$3700 < T_{\text{eff}} < 4800$ (M1–K2)	

на диаграмме « $T_{\text{eff}} - \lg g$ » расположены в области звезд ГП, что, возможно, является следствием их некорректной классификации, ошибок определения характеристик либо проявления нестационарности. В целом, предложенная аппроксимация TAMS может быть принята для отделения вероятных звезд I–III классов светимости от звезд ГП.

Показано, что собственный цвет $(B - R)_0$ звезд ГП в фотометрической системе Джонсона существенно (более чем на $0^{\text{m}}2$) отличается от $(B - R)_0$ звезд-сверхгигантов для спектральных типов от G0 до M0 и более поздних, чем M3. Для гигантов это различие выражено для звезд спектральных типов более ранних, чем K7. Таким образом, есть спектральные типы звезд, для которых соотношение « $T_{\text{eff}} - (B - R)_0$ » чувствительно к классу светимости.

Для собственных цветов в фотометрической системе Gaia с использованием данных библиотеки звездных моделей ATLAS9 вычислены соотношения « $T_{\text{eff}} - (BP-RP)_0$ » для различных значений $\lg g$. Определены характерные различия собственных цветов звезд разных классов светимости в зависимости от эффективной температуры. Показано, что показатель цвета $(BP-RP)_0$ в меньшей степени чувствителен к классу светимости, чем $(B - R)_0$ Джонсона, видимо, в связи с более широкими полосами пропускания фильтров. Значения $(BP-RP)_0$ могут различаться более чем на $0^{\text{m}}15$

зависимости от $\lg g$ только для звезд спектральных типов позднее M2. Таким образом, показано, что для звезд классов светимости I, III и всех более ранних спектральных типов могут использоваться соотношения « $T_{\text{eff}} - (BP - RP)_0$ » для звезд ГП.

Необходимо отметить, что цветовые калибровки являются более надежными, когда содержат, помимо T_{eff} и $\lg g$, и другие параметры звезд (в частности, $[\text{Fe}/\text{H}]$). В этой связи было бы уместно отметить работу Kovtyukh et al. (2008), основанную на спектроскопических определениях эффективной температуры большого числа сверхгигантов, а также работу Rastorguev et al. (2022), в которой используется совершенно новый вариант метода пульсирующих фотосфер (так называемый мультифазный метод), в рамках которого определяются весьма точные избытки цвета индивидуальных цефеид и полный набор их астрофизических характеристик — $\lg g$ и светимость.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарны Эрику Мамаджеку и Юрию Пахомову за полезные советы. Авторы благодарят рецензентов за внимательное прочтение работы и сделанные замечания. В этом исследовании использовались база данных SIMBAD (CDS, Strasbourg, France) и библиографическая база астрофизических данных ADS (NASA's Astrophysics Data System). В данной работе был использован TOPCAT — интерактивный графический визуализатор и редактор табличных данных (<http://www.starlink.ac.uk/topcat/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта № 075-15-2022-1228 (13.2251.21.0177).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- R. Andrae, M. Fouesneau, R. Sordo, et al., *Astron. and Astrophys.*, **674**, id. A27 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243462
- A. Avdeeva, D. Kovaleva, O. Malkov, and A. Nekrasov, *Open Astronomy* **30** (1), 168 (2021). DOI:10.1515/astro-2021-0022
- L. Casagrande, J. Lin, A. D. Rains, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (2), 2684 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2304
- F. Castelli and R. L. Kurucz, in *Proc. IAU Symp.* No. 210, Ed. by N. Piskunov, W. W. Weiss, and D. F. Gray (ASP, San Francisco, 2003) poster A20. DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0405087
- A. W. J. Cousins, *Memoirs of the Royal Astronomical Society* **81**, 25 (1976).
- O. Creevey, R. Sordo, F. Pailler, et al., *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A26 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202243688
- A. Dotter, *Astrophys. J. Suppl.* **222** (1), article id. 8 (2016). DOI:10.3847/0067-0049/222/1/8
- Z. Eker, V. Bakış, S. Bilir, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479**, 5491 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty1834
- Z. Eker and V. Bakış, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **523** (2), 2440 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad1563
- D. W. Evans, M. Riello, F. De Angeli, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A4 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201832756
- J. Falcón-Barroso, P. Sánchez-Blázquez, A. Vazdekis, et al., *Astron. and Astrophys.* **532**, A95 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201116842
- P. J. Flower, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996). DOI:10.1086/177785
- H. L. Johnson, *Annales d'Astrophysique* **18**, 292 (1955).
- V. V. Kovtyukh, C. Soubiran, R. E. Luck, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **389** (3), 1336 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.13644.x
- A. Kunder, G. Kordopatis, M. Steinmetz, et al., *Astron. J.* **153**, article id. 75 (2017). DOI:10.3847/1538-3881/153/2/75
- J.-F. Le Borgne, G. Bruzual, R. Pelló, et al., *Astron. and Astrophys.* **402**, 433 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20030243
- A.-L. Luo, Y.-H. Zhao, G. Zhao, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **15**, article id. 1095 (2015). DOI:10.1088/1674-4527/15/8/002
- O. Malkov, D. Kovaleva, S. Sichevsky, and G. Zhao, *Research in Astronomy and Astrophysics* **20** (9), id. 139 (2020). DOI:10.1088/1674-4527/20/9/139
- O. Y. Malkov, A. S. Avdeeva, D. A. Kovaleva, and A. D. Nekrasov, *Astronomy Reports* **66** (7), 526 (2022). DOI:10.1134/S1063772922070046
- A. Nekrasov, K. Grishin, D. Kovaleva, and O. Malkov, *European Physical Journal Special Topics* **230** (10), 2193 (2021). DOI: 10.1140/epjs/s11734-021-00210-0
- M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, *Astrophys. J. Suppl.* **208**, article id. 9 (2013). DOI:10.1088/0067-0049/208/1/9
- M. J. Pecaut, E. E. Mamajek, and E. J. Bubar, *Astrophys. J.* **746**, article id. 154 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/746/2/154

23. P. Prugniel, C. Soubiran, M. Koleva, and D. Le Borgne, arXiv e-prints astro/ph:0703658 (2007). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0703658
24. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, Y. A. Lazovik, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (2), 144 (2022). DOI:10.1134/S1990341322020079
25. V. Straižys, *Multicolor stellar photometry* (Pachart Pub. House, Tucson, 1992).
26. F. Valdes, R. Gupta, J. A. Rose, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **152**, 251 (2004). DOI:10.1086/386343
27. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940

Atmospheric Parameters and Application of Gaia Color Indices of Main Sequence Stars

O. Yu. Malkov¹, G. Zhao², D. A. Kovaleva¹, A. S. Avdeeva^{1,3} and S. G. Sichevsky¹

¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

²National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences Beijing, 100101 China

³HSE University, Moscow, 101000 Russia

Using stellar evolution models, empirical atlases of stellar spectra, the ATLAS9 stellar model library, and published relations between observational and astrophysical characteristics of stars of different luminosity classes, we investigate the possibilities of their separation in the space of atmospheric and photometric parameters $T_{\text{eff}}-\log g$, $T_{\text{eff}}-(B-R)_0$ (Johnson), $T_{\text{eff}}-(BP-RP)_0$ (Gaia). We propose an approximation of the zero age (ZAMS) and terminal age (TAMS) main sequence lines in the $T_{\text{eff}}-\log g$ coordinates, and show that more than 90% of stars of luminosity class III from empirical atlases of stellar spectra are shifted toward smaller values of $\log g$ relative to TAMS and, as a rule, have values of $\log g < 3.2$. It is shown that the $T_{\text{eff}}-(B-R)_0$ dependence in the Johnson photometric system is sensitive to the luminosity class in certain ranges of effective temperatures. At the same time, the $T_{\text{eff}}-(BP-RP)_0$ dependence for main-sequence stars in the Gaia photometric system is found to be valid with an accuracy better than $0^{\text{m}}15$ for stars of all luminosity classes and all spectral types earlier than M2.

Keywords: *stars: atmospheres—stars: fundamental parameters*