

УДК 524.31

Л. С. Любимков, Д. Б. Поклад

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
п. Научный, Крым, 98409
lyub@crao.crimea.ua

**Определение эффективных температур
гигантов и сверхгигантов классов G и K
по наблюдаемым фотометрическим индексам**

Предложен метод определения эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ для гигантов и сверхгигантов спектральных классов G и K, основанный на применении двух фотометрических индексов, свободных от влияния межзвездного поглощения индекса Q в фотометрической системе UBV и индекса $[c_1]$ в системе $uvby$. Построены эмпирические зависимости между значениями $T_{\text{эф}}$, найденными для близких и ярких G- и K-гигантов и сверхгигантов методом инфракрасных потоков, с одной стороны, и наблюдаемыми индексами Q и $[c_1]$ для этих звезд — с другой стороны. Найдено систематическое расхождение между зависимостями $T_{\text{эф}}$ от Q для звезд с нормальной и пониженной металличностью. Аппроксимация построенных зависимостей полиномами второго порядка дает относительно простой и вместе с тем достаточно точный метод определения $T_{\text{эф}}$ по индексу Q в области 3800 $T_{\text{эф}}$ 5100 K и по индексу $[c_1]$ в области 4900 $T_{\text{эф}}$ 5500 K.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ТЕМПЕРАТУР ГІГАНТІВ І НАДГІГАНТІВ КЛАСІВ G І K ЗА СПОСТЕРЕЖУВАНИМИ ФОТОМЕТРИЧНИМИ ІНДЕКСАМИ, Любимков Л. С., Поклад Д. Б. — Запропоновано метод визначення ефективної температури $T_{\text{эф}}$ для гігантів і надгігантів спектральних класів G і K, заснований на застосуванні двох фотометричних індексів, вільних від впливу міжзоряного поглинання індексу Q у фотометричній системі UBV та індексу $[c_1]$ у системі $uvby$. Побудовано емпіричні залежності між значеннями $T_{\text{эф}}$, знайденими для близьких і яскравих G- і K-гігантів і надгігантів методом інфрачервоних потоків, з одного боку, і спостережуваними індексами

Q і $[c_1]$ для цих зірок — з іншого боку. Знайдено систематичну розбіжність між залежностями T_{ef} від Q для зірок з нормальною та зменшеною металічністю. Апроксимація побудованої залежності поліномами другого порядку дає відносно простий але досить точний метод визначення T_{ef} за індексом Q в області $3800 < T_{\text{ef}} < 5100$ К та за індексом $[c_1]$ в області $4900 < T_{\text{ef}} < 5500$ К.

DETERMINATION OF EFFECTIVE TEMPERATURES FOR G- AND K-TYPE GIANTS AND SUPERGIANTS FROM OBSERVED PHOTOMETRIC INDICES, by Lyubimkov L. S., Poklad D. B. — We propose a method of the effective temperature T_{eff} determination for G- and K-type giants and supergiants which is based on the use of two photometric indices that are free from interstellar extinction, namely, the index Q in the UBV photometric system and the index $[c_1]$ in the uvby system. Empirical relations are constructed between the T_{eff} values derived for nearby and bright G and K-type giants and supergiants by the InfraRed Flux Method (IRFM), on the one hand, and the observed indices Q and $[c_1]$ for these stars, on the other hand. A systematic discrepancy is found between the $T_{\text{eff}} - Q$ relations for stars with the normal metallicity and with the lowered one. Approximating the constructed relations by the second-order polynomials, we obtain a relatively simple and, at once, rather accurate method of the T_{eff} determination from the index Q in a range of $3800 < T_{\text{eff}} < 5100$ K and from the index $[c_1]$ in a range of $4900 < T_{\text{eff}} < 5500$ K.

ВВЕДЕНИЕ

Химический состав гигантов и сверхгигантов спектральных классов F, G и K уже не одно десятилетие привлекает повышенное внимание исследователей. Объясняется это тем, что в атмосферах таких звезд наблюдаются аномалии содержания ряда легких элементов, которые объясняются изменением химического состава звезды в процессе ее эволюции [2]. В частности, азот обнаруживает тенденцию к избытку, а углерод — к дефициту. Отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ оказывается сильно пониженным. Большое разнообразие показывает содержание лития [12]. Из расчетов следует, что на стадии F-, G- и K-гигантов и сверхгигантов происходит глубокое конвективное перемешивание, приводящее к выносу продуктов термоядерных реакций из недр звезды на ее поверхность. Аккуратный анализ наблюдаемых химических аномалий и их сравнение с предсказаниями теории позволяет проверить и уточнить современную теорию эволюции звезд.

В Научно-исследовательском институте «Крымская астрофизическая обсерватория» уже выполнен ряд исследований сверхгигантов и ярких гигантов классов A, F и G [12—14]. Продолжая эти исследования, мы планируем изучить химический состав большой группы более холодных гигантов и сверхгигантов (классы светимости I, II и III),

принадлежащих спектральным классам G и K. Как известно, анализ химического состава звезды начинается с определения двух ее фундаментальных параметров — эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ и ускорения свободного падения lgg в атмосфере. От точности этих параметров существенно зависит точность определяемых содержаний элементов. Для нашей задачи особое значение имеет первый из них — эффективная температура $T_{\text{эф}}$.

При исследовании большого числа звезд важно иметь относительно простой, но одновременно и достаточно точный метод, пригодный для массовых определений эффективной температуры $T_{\text{эф}}$. Известен прямой метод оценки $T_{\text{эф}}$ путем измерения угловых диаметров звезд, например при их покрытии Луной. В частности, таким методом в работе [20] были получены высокоточные значения $T_{\text{эф}}$ для 32 гигантов классов K и M. Однако данный метод достаточно сложен и не подходит для оценки $T_{\text{эф}}$ в случае произвольно заданной выборки звезд.

Обсуждая другие методы определения параметра $T_{\text{эф}}$, следует отметить, что в случае холодных звезд классов G и K эти методы имеют специфические особенности. В частности, бальмеровские линии H и H_γ, которые являются хорошими индикаторами $T_{\text{эф}}$ в случае более горячих звезд классов A и F, для G- и K-звезд не подходят, так как в их спектрах они достаточно слабы и сильно блендированы.

Известно, что одним из наиболее точных методов определения $T_{\text{эф}}$ у холодных звезд является метод инфракрасных потоков, в сокращенном обозначении IRFM (the Infra-Red Flux Method), который был предложен более 30 лет назад [6]. Этот метод основывается на том факте, что в инфракрасной области спектра потоки излучения у холодных звезд достаточно велики; кроме того, здесь сравнительно мало линий и нет значительного межзвездного поглощения. Метод IRFM уже был применен для большого числа холодных звезд.

В отличие от IRFM, который является чисто фотометрическим методом оценки $T_{\text{эф}}$, в работах [1] и [11] предложен спектроскопический метод определения $T_{\text{эф}}$ для F-, G- и K-гигантов и сверхгигантов. Здесь в качестве индикатора $T_{\text{эф}}$ использованы отношения глубин пар линий с сильно отличающимися потенциалами возбуждения. Зависимости указанных отношений от $T_{\text{эф}}$ прокалиброваны на основе известных высокоточных определений $T_{\text{эф}}$. В частности, с помощью этого метода найдены значения $T_{\text{эф}}$ для 110 F-, G- и K-гигантов [1] и 161 сверхгиганта тех же классов [11]. Данный метод требует высокоточных измерений глубин ряда спектральных линий (точнее, пар линий), поэтому для его применения необходимо иметь спектры с достаточно высоким разрешением.

В нашей работе [14] были определены параметры $T_{\text{эф}}$ и lgg , а также ряд других величин для 63 галактических сверхгигантов и ярких гигантов (классы светимости I и II) спектральных классов A, F и G. Здесь для определения lgg были применены звездные параллаксы; их наблюдаемые значения были взяты из новой редукции данных спут-

ника HIPPARCOS [22]. Этот метод (он описан в работах [3, 14]) позволил найти величину l_{gg} с беспрецедентной точностью; например, средняя ошибка значений l_{gg} для звезд с расстояниями до 300 пк составила ± 0.06 dex. Что касается величины $T_{эф}$, то в случае А- и F-звезд была применена комбинированная методика: спектроскопия (бальмеровские линии) + фотометрия (индексы Q , $[c_1]$ и $[c_2]$). В случае более холодных G-звезд пришлось использовать только фотометрические индексы, причем индекс $[c_2]$ был исключен, так как он приводил к существенному завышению $T_{эф}$ по сравнению с индексом $[c_1]$ и данными метода IRFM.

В упомянутой работе [14] для G-гигантов и сверхгигантов основным индикатором $T_{эф}$ служил индекс $[c_1]$, а индикатором l_{gg} — параллакс из работы [22]. Наблюдаемый индекс $[c_1]$ при этом напрямую сравнивался с теоретическими значениями $[c_1]$, вычисленными на основе моделей атмосфер. Если рассматривать более холодные K-звезды ($T_{эф} < 4900$ К), теория, как будет показано ниже, не может удовлетворительно объяснить наблюдаемые значения $[c_1]$ и Q . В настоящей работе применен другой подход по сравнению с [14]: для близких и ярких звезд строятся эмпирические зависимости высокоточных значений $T_{эф}$, определенных с помощью IRFM, от наблюдаемых индексов Q и $[c_1]$. Аппроксимация полученных зависимостей полиномами второго порядка дает для G- и K-гигантов и сверхгигантов относительно простой, но достаточно точный метод оценки параметра $T_{эф}$.

ИНДЕКСЫ Q И $[c_1]$: СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ТЕОРИИ

Два фотометрических индекса, которые рассматриваются в настоящей работе, определяются из следующих соотношений: индекс $Q = (U - B) - 0.72(B - V)$ в фотометрической системе UBV ; индекс $[c_1] = c_1 - 0.20(b - y)$ в системе $uvby$. Известно, что оба эти индекса свободны от влияния межзвездного поглощения.

Интересно сравнить, как согласуются теоретические индексы Q и $[c_1]$ с их наблюдаемыми величинами для холодных звезд классов G и K. Ниже мы приводим значения $T_{эф}$ для многих G- и K-гигантов и сверхгигантов, найденные с помощью IRFM; отметим, что их значения l_{gg} , определенные нами, варьируют от 1.2 до 3.0. Чтобы провести корректное сравнение с теорией, мы выбрали из этого массива только звезды со значениями l_{gg} от 1.6 до 2.4 (или $l_{gg} = 2.0 \pm 0.4$) и сравнили с расчетами для $l_{gg} = 2.0$. Кроме того, в сравнении участвовали только звезды с нормальной (солнечной) металличностью, т. е. $[Fe/H] = 0.0$. Сравнение между теорией и наблюдениями представлено на рис. 1.

На рис. 1, а приведены наблюдаемые величины Q для звезд в диапазоне эффективных температур $T_{эф}$ от 4000 до 5500 К и значениями $l_{gg} = 2.0 \pm 0.4$ (точки) в сравнении со значениями Q , рассчитанными по программе ATLAS [7] (сплошная кривая). Наблюдаемая зависимость

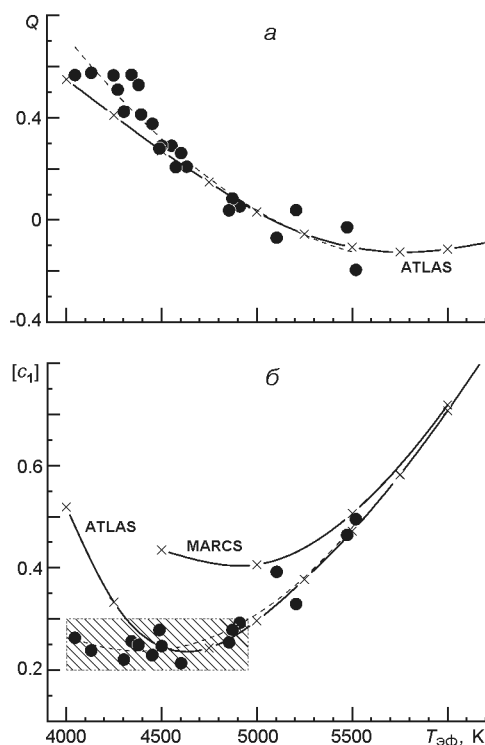


Рис. 1. Наблюдаемые индексы Q и $[c_1]$ для звезд с $\lg g = 2.0 \pm 0.4$ (точки) в зависимости от эффективной температуры $T_{\text{эф}}$. Сплошные кривые — расчеты для $\lg g = 2.0$ по программам ATLAS [7] и MARCS [17]. Штриховые кривые — усредненные зависимости, построенные по наблюдаемым точкам. Заштрихованный прямоугольник — область, где наблюдаемый индекс $[c_1]$ не показывает какой-либо существенной зависимости от $T_{\text{эф}}$.

Q от $T_{\text{эф}}$ аппроксимирована штриховой кривой; она показывает, что при $T_{\text{эф}} < 4500$ К имеют место расхождения между наблюдениями и расчетами, усиливающиеся с уменьшением $T_{\text{эф}}$. Прямое использование теоретической зависимости при определении $T_{\text{эф}}$ по наблюдаемому индексу Q , например для К-гиганта с $T_{\text{эф}} = 4200$ К, приводит к уменьшению эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ на 200 К. Это существенное различие, если учесть чувствительность спектров таких холодных звезд к параметру $T_{\text{эф}}$. Систематическое занижение $T_{\text{эф}}$ для К-гигантов и сверхгигантов может привести к систематическим ошибкам при определении содержания элементов.

Более значительные расхождения, как видно из рис. 1, б, имеют место в случае индекса $[c_1]$. Две теоретические кривые (сплошные линии) получены по данным двух групп исследователей, использовавших разные компьютерные программы ATLAS [7] и MARCS [17]. Видим, что при $T_{\text{эф}} < 5500$ К теоретические кривые существенно расходятся. При этом кривая, полученная с программой ATLAS, хорошо согласуется с наблюдаемой зависимостью $T_{\text{эф}}$ от $[c_1]$ (штриховая кривая) вплоть до значения $T_{\text{эф}} = 4500$ К; однако при $T_{\text{эф}} < 4500$ К между теорией и наблюдениями имеет место сильное несоответствие. Интересно, что теоретическая кривая, полученная с программой MARCS, при $T_{\text{эф}} < 5500$ К лежит заметно выше как наблюдаемой зависимости, так и теоретической кривой ATLAS. Для дальнейшего анализа является важной область температур $T_{\text{эф}}$ от 4000 до 4950 К и значений $[c_1]$ от 0.2 до 0.3, которая на рис. 1, б показана заштрихованным прямоуголь-

ником. Здесь наблюдаемый индекс $[c_1]$ не показывает никакой существенной зависимости от $T_{\text{эф}}$; поэтому в этой области он непригоден для определения $T_{\text{эф}}$.

Итак, во-первых, при температурах $T_{\text{эф}} < 4500$ К расчеты индексов Q и $[c_1]$ не могут описать наблюдаемые величины Q и $[c_1]$ для К-гигантов и сверхгигантов. Поэтому сравнение наблюдаемых значений Q и $[c_1]$ с расчетами этих величин с целью определения эффективной температуры при $T_{\text{эф}} < 4500$ К является некорректным. В данной работе предложен другой подход — прямое применение наблюдаемых индексов Q и $[c_1]$ путем подстановки их в найденные нами зависимости $T_{\text{эф}}$ от Q и $[c_1]$. Во-вторых, на основании рис. 1 мы можем указать интервалы $T_{\text{эф}}$, в которых найденные зависимости могли бы дать достаточно надежные оценки $T_{\text{эф}}$. Мы полагаем, что зависимость $T_{\text{эф}}$ от Q можно применять для относительно холодных звезд с $T_{\text{эф}} < 5100$ К, где ход Q с $T_{\text{эф}}$ сравнительно крутой (рис. 1, а), в то время как зависимость $T_{\text{эф}}$ от $[c_1]$, как следует из сказанного выше, можно использовать только для более горячих звезд с $T_{\text{эф}} > 4900$ К (рис. 1, б). Перекрываясь в области $T_{\text{эф}} = 4900 \dots 5100$ К, эти зависимости могли бы обеспечить определение $T_{\text{эф}}$ во всей области температур, занимаемой G- и K-гигантами и сверхгигантами.

Возникает вопрос о расхождении между теорией и наблюдениями при $T_{\text{эф}} < 4500$ К. Из расчетов [7] следует, что при таких низких температурах даже в случае гигантов и сверхгигантов (в случае холодных карликов это хорошо известно) становится важной роль конвекции, и следовательно, та методика, которая применяется для ее учета в расчетах моделей атмосфер. Можно предположить, что традиционная теория длины перемешивания, применяемая в таких расчетах, при $T_{\text{эф}} < 4500$ К становится несостоятельной. Необходимо переходить к применению трехмерных нестационарных моделей атмосфер, как, например, в работе [21].

ОТБОР ЗВЕЗД С ВЫСОКОТОЧНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ $T_{\text{эф}}$, ПОЛУЧЕННЫМИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИНФРАКРАСНЫХ ПОТОКОВ

Фотометрические индексы, которые сравнительно просто получить из наблюдений, в отличие от спектроскопических индикаторов эффективной температуры $T_{\text{эф}}$, хорошо подходят для оценки $T_{\text{эф}}$ даже в случае удаленных звезд, когда невозможно получить спектр звезды с высоким разрешением. Построение эмпирических зависимостей $T_{\text{эф}}$ от Q и $[c_1]$ мы будем основывать на высокоточных значениях $T_{\text{эф}}$, найденных для близких G- и K-гигантов и сверхгигантов методом инфракрасных потоков (IRFM). В настоящей работе использованы данные работ [4, 5, 19], из которых взяты эффективные температуры $T_{\text{эф}}$, определенные с помощью IRFM. Эти работы содержат достаточно много G и K-гигантов и сверхгигантов. Найденные в них значения $T_{\text{эф}}$ получены

с высокой точностью; кроме того, из сравнения $T_{\text{эф}}$ для общих звезд следует, что нет существенных систематических различий между этими работами.

В результате отбора, описанного ниже, мы выбрали из работ [4, 5, 19] для дальнейшего анализа 81 звезду. Эти объекты были разделены на две группы — звезды с нормальной и пониженной металличностью. Объясняется это тем, что гиганты и сверхгиганты с пониженной металличностью, как оказалось, показывают систематические отличия в наблюдаемом индексе Q от нормальных звезд с такими же температурами $T_{\text{эф}}$. В табл. 1 представлены 65 отобранных звезд с нормальной металличностью и 16 звезд с пониженной металличностью. Под нормальной металличностью мы имеем в виду значения $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -0.2 до $+0.2$, в среднем $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$; к звездам с пониженной металличностью мы относим объекты с $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -0.3 до -0.7 , в среднем $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$. Звезды за пределами интервала $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -0.7 до $+0.2$ не рассматривались. Поскольку все рассмотренные звезды являются довольно яркими, для каждой из них в литературе имеется, как правило, несколько оценок $[\text{Fe}/\text{H}]$, которые можно найти, например, в базе данных SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>). Напомним, что величина $[\text{Fe}/\text{H}]$ характеризует содержание железа в логарифмической шкале по отношению к содержанию на Солнце.

Как видно из табл. 1, выбранные звезды являются яркими; их видимые звездные величины $m_V < 5.6$. Другим критерием отбора было

Таблица 1. Параметры отобранных звезд, имеющих нормальную и пониженную металличность ($[\text{Fe}/\text{H}]$ 0.0 и -0.5)

HR	HD	Sp	m_V	, мсд	d , пк	$T_{\text{эф}}$, К (IRFM)	Источ-ник	$\lg g$	M/M_{\odot}	Q	$[c_1]$
[Fe/H] 0.0											
165	3627	K3 III	3.28	30.91	32	4343	[19]	2.22	1.46	0.568	0.256
168	3712	K0 III	2.25	14.29	70	4553	[19]	1.85	5.51	0.290	
180	3919	G8 III	4.61	13.27	75	5100	[5]	2.78	3.10	0.026	
253	5234	K2 III	4.83	9.93	101	4453	[4]	2.17	2.57	0.376	0.229
402	8512	K0 III	3.60	28.66	35	4689	[4]	2.67	2.17	0.164	0.287
434	9138	K4 III	4.84	10.73	93	4046	[4]	1.66	1.41	0.566	0.263
464	9927	K3 III	3.57	18.41	54	4380	[19]	2.10	2.26	0.528	0.249
489	10380	K3 III	4.45	8.98	111	4132	[19]	1.64	2.27	0.575	0.238
603	12533	K3 II	2.14	9.19	109	4259	[19]	1.35	7.56	0.594	
617	12929	K2 III	2.00	49.56	20	4501	[19]	2.37	2.03	0.289	0.247
694	14770	G8 III	5.19	8.17	122	4951	[5]	2.57	3.54	0.052	
874	18322	K1 III	3.89	23.89	42	4608	[4]	2.55	2.05	0.200	0.273
941	19476	K0 III	3.80	28.93	35	4879	[4]	2.90	2.42	0.124	0.285
1318	26846	K3 III	4.90	13.46	74	4577	[4]	2.47	2.15	0.301	0.267
1457	29139	K5 III	0.98	48.94	20	3883	[19]	1.32	1.55	0.793	0.182
2012	39003	G9.5 III	3.95	14.16	71	4604	[4]	2.31	3.20	0.261	0.213
2427	47174	K3 Iab	4.80	7.84	128	4394	[5]	1.99	3.07	0.412	
2443	47442	K0 II-III	4.43	7.74	129	4633	[5]	2.13	4.34	0.208	
2985	62345	G8 III	3.57	23.07	43	5001	[4]	2.79	3.02	0.019	0.281
2990	62509	K0 III	1.15	96.54	10	4833	[19]	2.88	2.28	0.135	0.298
3003	62721	K4 III	4.88	9.61	104	3988	[19]	1.54	1.46	0.711	0.281
3475	74739	G8 Iab	4.03	9.85	102	4911	[4]	2.32	4.25	0.052	0.292
3547	76294	G9 II-III	3.13	19.51	51	4817	[19]	2.45	3.66	0.075	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР ГИГАНТОВ И СВЕРХГИГАНТОВ

Окончание табл. 1

HR	HD	S_p	m_V	, мсд	d , пк	$T_{\text{эф}}$, К (IRFM)	Источ- ник	lgg	M/M_{\odot}	Q	$[c_1]$
3705	80493	K7 III	3.16	16.06	62	3851	[19]	1.23	1.77	0.827	
3903	85444	G7 III	4.12	12.36	81	5085	[5]	2.57	3.59	-0.022	
3994	88284	K0 III	3.61	28.98	35	4865	[4]	2.84	2.54	0.188	
4247	94264	K0 III	3.83	34.38	29	4670	[19]	2.80	1.69	0.171	0.279
4291	95345	K1 III	4.85	9.05	110	4490	[4]	2.18	2.91	0.278	0.278
4392	98839	G7.5 III	4.99	6.12	163	4872	[4]	2.29	4.29	0.083	0.278
4432	99998	K3.5 III	4.77	5.40	185	3919	[19]	1.19	2.67	0.701	0.171
4716	107950	G6 III	4.77	8.44	118	5033	[4]	2.50	3.76	-0.017	
4932	113226	G8 III	2.83	29.76	34	5049	[19]	2.74	3.17	0.054	
5429	127665	K3 III	3.58	20.37	49	4271	[4]	2.00	1.77	0.509	
5480	129312	G7 III	4.86	6.07	165	4854	[4]	2.23	4.46	0.037	0.254
5649	134505	G7 III	3.41	27.80	36	5058	[5]	2.88	2.84	-0.001	0.291
6132	148387	G8 III	2.74	35.42	28	5007	[5]	2.82	2.94	0.024	
6147	148786	G9 III	4.29	13.39	75	5106	[5]	2.69	3.32	0.049	
6603	161096	K2 III	2.75	39.85	25	4533	[4]	2.47	1.89	0.397	0.305
6698	163917	G9 III	3.31	21.64	46	4871	[4]	2.60	3.30	0.156	
6703	163993	G8 III	3.70	23.84	42	5011	[5]	2.84	2.88	0.011	
6705	164058	K5 III	2.23	21.14	47	3927	[19]	1.28	2.20	0.782	0.185
6770	165760	G8 III	4.65	11.96	84	4969	[4]	2.66	3.33	0.047	0.311
6807	166640	G8 III	5.57	8.28	121	5079	[5]	2.75	3.17	-0.001	
6895	169414	K2 III	3.84	27.42	36	4450	[19]	2.43	1.50	0.322	0.226
6970	171391	G8 III	5.13	9.91	101	5116	[5]	2.75	3.19	-0.066	
6973	171443	K3 III	3.85	16.38	61	4248	[4]	1.93	1.89	0.565	
7259	178345	K0 II	4.12	6.88	145	4575	[5]	1.94	5.07	0.206	
7328	181276	G9 III	3.80	26.27	38	4935	[19]	2.89	2.62	0.048	0.313
7429	184406	K3 III	4.45	30.31	33	4473	[4]	2.63	1.10	0.399	0.275
7479	185758	G1 II	4.39	7.67	130	5415	[5]	2.46	3.91	-0.136	0.370
7581	188114	K0 II-III	4.13	17.94	56	4683	[5]	2.55	2.61	0.127	0.236
7615	188947	K0 III	3.88	24.17	41	4796	[4]	2.76	2.47	0.145	0.281
7754	192947	G8.5 III-IV	3.58	30.82	32	4978	[4]	2.96	2.54	0.009	0.296
7949	197989	K0 III	2.48	44.86	22	4710	[19]	2.67	2.32	0.116	0.300
8093	201381	G8 III	4.52	20.47	49	5093	[5]	3.03	2.55	0.018	0.274
8167	203387	G8 III	4.30	16.58	60	5105	[5]	2.84	2.98	-0.063	
8232	204867	G0 Ib	2.91	6.07	165	5474	[5]	1.87	5.99	-0.029	0.464
8255	205512	K1 III	4.88	14.09	71	4609	[4]	2.52	2.17	0.229	0.241
8414	209750	G2 Ib	2.95	6.23	161	5206	[5]	1.81	6.26	0.038	0.329
8498	211388	K3 II-III	4.13	5.25	190	4140	[5]	1.39	4.99	0.610	
8632	214868	K2 III	4.51	9.80	102	4303	[19]	1.92	2.53	0.423	0.220
8649	215167	K3 III	4.69	7.53	133	4072	[4]	1.51	2.38	0.567	0.185
8650	215182	G2 II-III	2.95	15.22	66	5104	[5]	2.36	4.16	-0.070	0.392
8916	220954	K1 III	4.28	21.96	46	4699	[4]	2.70	2.13	0.223	0.273
9057	224342	F8 III	6.03	3.10	323	5520	[4]	2.35	4.32	-0.196	0.495
					[Fe/H]	0.5					
163	3546	G8 III	4.37	19.91	50	4935	[19]	2.75	1.91	-0.161	0.342
1726	34334	K2.5 III	4.55	14.04	71	4193	[4]	1.74	0.81	0.357	0.220
1907	37160	K0 III	4.09	27.76	36	4693	[4]	2.57	1.16	-0.062	0.301
2035	39364	K1 III-IV	3.81	28.68	35	4599	[4]	2.41	1.11	-0.031	0.318
3403	73108	K2 III	4.60	12.74	78	4387	[4]	1.94	1.25	0.303	—
4382	98430	K0 III	3.56	17.56	57	4468	[4]	1.98	1.66	0.172	—
4518	102224	K0.5 III	3.71	17.76	56	4378	[19]	1.90	1.34	0.302	0.254
4608	104979	G8 III	4.13	19.98	50	4824	[4]	2.57	1.84	-0.075	0.187
5340	124897	K1.5 III	-0.04	88.83	11	4231	[19]	1.66	1.21	0.382	0.337
5681	135722	G8 III	3.47	26.78	37	4834	[19]	2.58	1.86	-0.012	0.289
5787	138905	K0 III	3.92	19.99	50	4711	[4]	2.40	1.73	0.017	0.275
5889	141714	G3.5 III	4.60	19.18	52	5247	[5]	3.02	2.25	-0.211	0.313
6220	150997	G7.5 III	3.49	30.02	33	4948	[19]	2.77	1.93	-0.068	—
6869	168723	K0 III-IV	3.26	53.93	19	4835	[4]	2.88	1.18	-0.025	0.307
8551	212943	K0 III	4.79	21.99	45	4588	[4]	2.51	0.90	0.125	0.296
8961	222107	G8 III	3.82	37.87	26	4605	[19]	2.60	0.84	-0.034	0.283

условие, чтобы они имели достаточно большие и высокоточные параллаксы; это необходимо для уверенного определения величины l_{gg} (см. ниже). Следствием отбора по параллаксам явился тот факт, что в наш список попали довольно близкие звезды с расстояниями $d < 200$ пк. Некоторым исключением является поздний F-гигант HR 9057, самая горячая звезда в нашем списке ($T_{эф} = 5520$ К); для него $m_V = 6.03$ и $d = 323$ пк.

Из упомянутых работ [4, 5, 19] отбирались звезды с такими значениями $T_{эф}$, которые полностью перекрывали бы область $T_{эф}$, занимаемую K- и G-гигантами и сверхгигантами. В табл. 1 включены звезды со значениями $T_{эф}$ от 3850 до 5520 К. Напомним, что эти значения были определены методом IRFM, поэтому они имеют довольно высокую точность. Ошибки определения $T_{эф}$, приведенные в работах [4, 5, 19], позволяют заключить, что типичная ошибка значений $T_{эф}$, представленных в табл. 1, составляет $\pm(60...80)$ К.

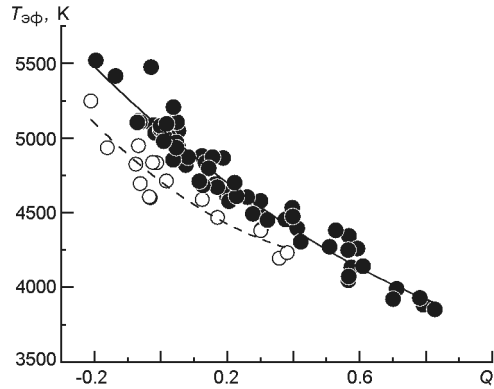
При отборе звезд были учтены также значения ускорения силы тяжести l_{gg} , которые должны были соответствовать гигантам и сверхгигантам. Все отобранные звезды попадают в область l_{gg} от 1.2 до 3.0. Значения l_{gg} находились нами по звездным параллаксам (в мсд — миллисекундах дуги). Методика определения l_{gg} по параллаксам описана в работах [3, 14]. Выше уже отмечалось, что для близких звезд, как в нашем случае, этот метод дает беспрецедентную точность определения l_{gg} (несколько сотых единицы). Попутно приходится определять массу M каждой звезды; для этого мы использовали эволюционные треки [8] в случае звезд с нормальной металличностью и треки [9] в случае звезд с пониженной металличностью. Следует отметить, что во втором случае использование треков [9] вместо [8] приводит к некоторому уменьшению величины l_{gg} и заметному понижению массы M . Из табл. 1 видно, что рассмотренные звезды имеют массы M в диапазоне от 0.8 до $7.6M_{\odot}$, где M_{\odot} — масса Солнца.

Еще одним обязательным условием при отборе звезд из работ [4, 5, 19] было наличие наблюдаемого индекса Q ; значения Q найдены с помощью каталога [16] и базы данных SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>). Что касается индекса $[c_1]$, то его наблюдаемые значения, как оказалось, известны не для всех выбранных звезд; они найдены с помощью каталога [10]. Наблюдаемые величины Q и $[c_1]$ приведены в двух последних графах табл. 1.

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ И НАБЛЮДАЕМЫМИ ИНДЕКСАМИ Q И $[c_1]$

В работе [15] на основе данных, полученных для 102 ранних и средних В-звезд главной последовательности, были построены калибровочные зависимости между $T_{эф}$ и индексами Q и $[c_1]$, которые позволяли по наблюдаемым значениям Q и $[c_1]$ быстро определять эффективную

Рис. 2. Зависимость между эффективной температурой $T_{\text{эф}}$ и индексом Q для звезд с нормальной металличностью (черные кружки) и пониженной металличностью (светлые кружки). Сплошная кривая — соотношение (1), штриховая — (2)



температуру $T_{\text{эф}}$ для звезд указанного типа. Та же идея фактически применена в настоящей работе — построение зависимости между $T_{\text{эф}}$ и индексами Q и $[c_1]$; однако при этом мы не используем собственные оценки $T_{\text{эф}}$, как в [15], а берем высокоточные значения $T_{\text{эф}}$ для ярких и близких звезд, полученные с помощью IRFM в других работах.

На рис. 2 показана зависимость между $T_{\text{эф}}$ и Q , построенная по данным табл. 1. Черными кружками здесь представлены звезды с нормальной металличностью ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$), а светлыми — звезды с пониженной металличностью ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.5$). Мы аппроксимировали обе зависимости полиномами второго порядка; они показаны на рис. 2 сплошной и штриховой кривой соответственно. Видим, что вторая зависимость (для звезд с пониженной металличностью) лежит систематически ниже первой. При обсуждении рис. 1, а уже было отмечено, что эмпирическую зависимость $T_{\text{эф}}$ от Q следует использовать для относительно холодных звезд. Теперь мы можем уточнить, что полученные кривые $T_{\text{эф}}(Q)$ на рис. 2 можно применять для определения эффективной температуры в интервале $T_{\text{эф}}$ от 3800 до 5100 К для звезд с нормальной металличностью (сплошная кривая) и от 4200 до 5100 К для звезд с пониженной металличностью (штриховая кривая). Соответствующие интервалы Q составляют приблизительно от 0.9 до 0.0 в первом случае и от 0.4 до 0.2 во втором.

Таким образом, оценка $T_{\text{эф}}$ по индексу Q может быть выполнена с помощью следующих соотношений:

$$T_{\text{эф}} = 5064.0 - 1942.8Q + 639.59Q^2 \quad ([\text{Fe}/\text{H}] = 0.0, 0.0 \leq Q \leq 0.9), \quad (1)$$

$$T_{\text{эф}} = 4708.1 - 1684.9Q + 1353.9Q^2 \quad ([\text{Fe}/\text{H}] = 0.5, 0.2 \leq Q \leq 0.4). \quad (2)$$

Что касается индекса $[c_1]$, то для построения зависимости $T_{\text{эф}}$ от $[c_1]$ подходит сравнительно небольшое число звезд. Прежде всего, значения $[c_1]$, в отличие от Q , известны не для всех выбранных звезд. В табл. 1 индекс $[c_1]$ приведен для 42 из 65 объектов с нормальной металличностью и для 13 из 16 объектов с пониженной металличностью. Далее, как отмечалось выше, при $T_{\text{эф}} < 4900$ К индекс $[c_1]$ становится нечувствительным к $T_{\text{эф}}$; поэтому приходится исключить из анализа

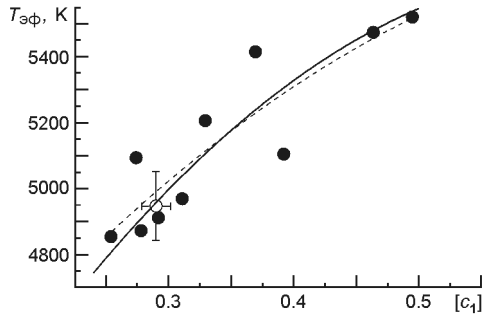


Рис. 3. Зависимость между эффективной температурой $T_{\text{эф}}$ и индексом $[c_1]$ для звезд с нормальной металличностью (черные кружки). Кружком с координатами $[c_1] = 0.290 \pm 0.012$ и $T_{\text{эф}} = 4947 \pm 106$ К представлены восемь гигантов с очень близкими параметрами $[c_1]$ и $T_{\text{эф}}$ (см. текст). Штриховая кривая — аппроксимация наблюдаемых точек полиномом второй степени. Сплошная кривая — расчеты [7] по программе ATLAS при $\lg g = 2.0$; она соответствует соотношению (3)

многие звезды с $T_{\text{эф}} < 4900$ К. На рис. 3 представлено десять звезд (черные кружки) со значениями $T_{\text{эф}}$ от 4854 до 5520 К и нормальной металличностью ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$). Кроме того, имеется компактная группа из восьми гигантов со значениями $\lg g$, максимально приближенными к $\lg g = 3$ (в среднем $\lg g = 2.89 \pm 0.09$). Они имеют очень близкие значения $T_{\text{эф}}$ и $[c_1]$, поэтому, чтобы не загромождать рис. 3, мы представили их средней точкой с координатами $[c_1] = 0.290 \pm 0.012$ и $T_{\text{эф}} = 4947 \pm 106$ К (светлый кружок). Аппроксимация полиномом второй степени по десяти указанным звездам представлена штриховой линией, а сплошной кривой показана теоретическая зависимость, соответствующая расчетам по программе ATLAS [7] при $\lg g = 2.0$. Видим, что имеется очень хорошее согласие между этими двумя кривыми. Другими словами, в интервале температур $T_{\text{эф}}$ от 4900 до 5500 К наблюдаемые значения индекса $[c_1]$ хорошо описываются теоретической кривой. Интересно, что на эту кривую, которая соответствует ускорению свободного падения $\lg g = 2.0$, попадает точка с существенно отличающимся значением $\lg g = 2.89 \pm 0.09$ (кружок). Это свидетельствует о том, что при $T_{\text{эф}} \approx 5000$ К индекс $[c_1]$ слабо зависит от $\lg g$. Однако при температурах $T_{\text{эф}} \approx 5500$ К, как показывают расчеты, зависимость может быть более заметной.

Мы пришли к выводу, что в интервале $4900 < T_{\text{эф}} < 5500$ К, или $0.27 < [c_1] < 0.50$, для определения эффективной температуры по индексу $[c_1]$ можно пользоваться теоретической зависимостью, представленной на рис. 3 сплошной кривой. Наше уравнение для этой кривой имеет следующий вид:

$$T_{\text{эф}} = 3325.0 + 7267.5[c_1] - 5648.8[c_1]^2 \quad (3)$$

$$([\text{Fe}/\text{H}] = 0.0, 0.27 < [c_1] < 0.50).$$

Следует отметить, что указанный интервал $4900 < T_{\text{эф}} < 5500$ К соответствует гигантам и сверхгигантам класса G. Таким образом, для более холодных звезд класса K он не подходит; в последнем случае можно использовать соотношения (1) и (2). Существует общая область $T_{\text{эф}}$ между 4900 и 5100 К, в которой могут работать все три соотношения (1)—(3). Рассматривая связь между индексами Q и $[c_1]$ и эффективной температурой $T_{\text{эф}}$, следует иметь в виду, что эти индексы

могут в какой-то мере зависеть и от величины l_{gg} . Как уже указывалось, значения l_{gg} для звезд нашего списка лежат в диапазоне от 1.2 до 3.0. Интересно, что значение $l_{gg} = 2$, согласно [14], является приблизительно границей между сверхгигантами (класс светимости I) и гигантами (классы светимости II и III). Чтобы проверить возможную связь между индексами Q и $[c_1]$ и величиной l_{gg} , мы разделили все звезды на две группы — с $l_{gg} < 2$ и $l_{gg} > 2$. Оказалось, что зависимости $T_{эф}(Q)$ и $T_{эф}([c_1])$ не показывают какого-либо систематического различия между этими двумя группами. Напомним также, что на рис. 3 точка с $l_{gg} = 2.89$ оказалась фактически лежащей на кривой, рассчитанной при $l_{gg} = 2.0$. Поэтому можно предположить, что соотношения (1), (2) и (3) применимы во всем диапазоне значений l_{gg} между 1.2 и 3.0.

ТОЧНОСТЬ МЕТОДА; СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ ДАННЫМИ

Какова точность определения $T_{эф}$ при использовании уравнений (1), (2) и (3)? Чтобы ответить на этот вопрос, следует, прежде всего, оценить влияние ошибок в индексах Q и $[c_1]$. Ошибки в наблюдаемых значениях Q и $[c_1]$ для звезд из табл. 1 можно определить по разбросу измеренных показателей цвета $U - B, B - V, b - y$ и c_1 , которые входят в соотношения, определяющие Q и $[c_1]$ (см. выше). Как видно из базы данных SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>), для каждой из этих ярких звезд имеется, как правило, несколько измерений указанных величин. Мы нашли, что для большинства звезд ошибка

Q варьирует в интервале от ± 0.01 до ± 0.04 ; в таком же интервале варьирует и ошибка $[c_1]$. Типичными можно считать погрешности $Q = \pm(0.02 \dots 0.03)$ и $[c_1] = \pm(0.02 \dots 0.03)$.

Оказалось, что неточности в определении $T_{эф}$ из уравнения (1) зависят не только от ошибки Q , но и от самой величины Q . Наш анализ показал, что ошибка $T_{эф}$ получается малой для самых холодных звезд с $Q = 0.6 \dots 0.7$; здесь $T_{эф} = \pm(10 \dots 30)$ К при $Q = \pm(0.02 \dots 0.03)$. С другой стороны, для относительно горячих звезд с $Q = 0.1$ эта ошибка существенно выше: $T_{эф} = \pm(40 \dots 60)$ К при $Q = \pm(0.02 \dots 0.03)$. Важно, что даже при $Q = \pm 0.04$ величина $T_{эф}$ получается меньше ± 100 К. Что касается уравнения (2), полученного для звезд с пониженной металличностью, здесь ошибка $T_{эф}$ при $Q = 0.1$ оказалась примерно такая же, но при $Q = 0.3$ она в два раза меньше, чем для уравнения (1).

При применении уравнения (3), как и в предыдущем случае, ошибка $T_{эф}$ зависит не только от погрешности $[c_1]$, но и от самого индекса $[c_1]$. Из нашего анализа следует, что величина $T_{эф}$ получается сравнительно малой для относительно горячих звезд с $[c_1] = 0.4 \dots 0.5$; здесь $T_{эф} = \pm(40 \dots 80)$ К при $[c_1] = \pm(0.02 \dots 0.03)$. Однако при уменьшении индекса $[c_1]$ и, соответственно, температуры $T_{эф}$ по-

грешность увеличивается, и уже при $[c_1] = 0.3$ достигает ± 100 К.

Из изложенного анализа следует, что при определении эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ с помощью индекса Q , когда применяются уравнения (1) или (2), обеспечивается достаточно высокая точность во всем рекомендованном выше интервале $T_{\text{эф}} = 3800 \dots 5100$ К. Типичная ошибка $T_{\text{эф}}$ при этом составляет ± 50 К и меньше. Отметим, что указанная область $T_{\text{эф}}$ полностью перекрывает диапазон $T_{\text{эф}}$, занимаемый К-гигантами и сверхгигантами (примерно от 3800 до 4800 К). В случае G-звезд (кроме самых поздних, где еще применим индекс Q) можно использовать только индекс $[c_1]$ путем его подстановки в уравнение (3); последнее было рекомендовано применять в интервале $T_{\text{эф}} = 4900 \dots 5500$ К. В этом случае относительно высокая точность достигается только при рассмотрении наиболее горячих звезд, когда $[c_1]$

0.4...0.5 и $T_{\text{эф}} = 5300 \dots 5500$ К. При меньших значениях $[c_1]$ (меньших температурах $T_{\text{эф}}$) ошибка $T_{\text{эф}}$ достигает ± 100 К и больше.

Чтобы получить дополнительную оценку точности нашего метода, можно сравнить вычисленные из соотношений (1)—(3) значения $T_{\text{эф}}$ с температурами $T_{\text{эф}}$, которые были найдены с помощью IRFM и приведены в табл. 1. Другими словами, можно оценить среднюю ошибку по разбросу отдельных точек на рис. 2 и 3 около кривых, заданных уравнениями (1), (2) и (3). Мы нашли, что указанный разброс характеризуется стандартным отклонением ± 94 К в случае соотношения (1), ± 98 К в случае (2) и ± 115 К в случае (3). Необходимо учесть, что этот разброс частично обусловлен ошибками исходных значений $T_{\text{эф}}$, найденных с помощью IRFM. Если принять, что метод IRFM дает точность $\pm (60 \dots 80)$ К (см. выше), тогда типичная ошибка нашего метода составляет приблизительно $\pm (50 \dots 70)$ К для соотношений (1) и (2) и $\pm (80 \dots 100)$ К для соотношения (3). В целом эти оценки не показывают значительного отличия от оценок, полученных выше. В частности, они подтверждают, что использование индекса Q при определении $T_{\text{эф}}$ для К-звезд, вообще говоря, дает более высокую точность, чем использование индекса $[c_1]$ при определении $T_{\text{эф}}$ для G-звезд.

Некоторое представление о точности нашего метода может дать также сравнение с оценками $T_{\text{эф}}$ для G- и К-гигантов и сверхгигантов с помощью упоминавшегося выше спектроскопического метода (по отношению глубин пар линий с разными потенциалами возбуждения), предложенного в работах [1] и [11].

В нашем списке имеется восемь звезд, общих с [1], и три звезды, общие с [11]. Для первых восьми звезд мы определили $T_{\text{эф}}$ по индексу Q из уравнений (1) и (2), для остальных трех звезд — по индексу $[c_1]$ из уравнения (3). Сравнивая наши значения $T_{\text{эф}}$ для этих 11 общих звезд с данными [1, 11], мы нашли, что разница составляет в среднем 38 К. Если внести поправку за эту систематическую величину, тогда различия между данными двух методов характеризуются стандартным отклонением ± 79 К. В эту величину вносят вклад ошибки обоих методов. Если допустить, что этот вклад одинаков, тогда мы получаем для

Таблица 2. Сравнение разных оценок физических параметров Арктур

$T_{\text{эф}}$, К	$\lg g$	M/M_{\odot}	Примечания
4231±49	1.65±0.07	1.25±0.32	$T_{\text{эф}}$ – IRFM [19]
4262±20	1.69±0.03	1.30±0.15	$T_{\text{эф}}$ – соотношение (2)
4286±30	1.66±0.05	1.08±0.06	Данные [18]

каждого метода ошибку ± 56 К. Видим, что даже такой упрощенный анализ для сравнительно небольшого числа общих звезд подтверждает хорошую точность нашего метода.

В список рассмотренных нами звезд был включен Арктур (HR 5340), яркий и очень близкий К-гигант, неоднократно подвергавшийся разносторонним исследованиям. Как известно, Арктур часто рассматривается как пробный камень для проверки каких-либо методик или результатов, относящихся к изучению холодных звезд. Следуя этой традиции, мы сравнили наши значения $T_{\text{эф}}$, $\lg g$ и M для Арктур с недавними результатами работы [18]. Такое сравнение представлено в табл. 2; данные [18] приведены в ее последней строке (следует отметить, что найденное в [18] значение $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.52 \pm 0.04$ подтверждает пониженную металличность звезды). Отметим, что параметр $T_{\text{эф}}$ был определен в работе [18] по распределению наблюдаемого потока в широком спектральном диапазоне, а величина $\lg g$, как и у нас, была найдена по параллаксу.

В табл. 2 мы указали значения $T_{\text{эф}}$, найденные как с помощью метода IRFM [19], так и с помощью нашего метода, конкретно из соотношения (2) по наблюдаемому индексу $Q = 0.382 \pm 0.018$. В обоих случаях согласие с работой [18] хорошее; тем не менее, температура $T_{\text{эф}}$, полученная из равенства (2), оказалась существенно ближе к значению [18]. Найденные нами в обоих этих случаях величины $\lg g$ в пределах ошибки совпадают с $\lg g$ из [18]. Согласие между оценками массы M находится в пределах ошибки определения этой величины. Главный вывод, который следует из табл. 2, состоит в том, что пример Арктур подтверждает высокую точность определения $T_{\text{эф}}$ нашим методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была поставлена задача разработать относительно простой, но вместе с тем достаточно точный метод определения эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ для холодных гигантов и сверхгигантов спектральных классов G и K. Для этой цели были использованы два фотометрических индекса, свободных от влияния межзвездного поглощения: индекс Q в системе UBV и индекс $[c_1]$ в системе $uvby$. Сопоставив наблюдаемую зависимость этих индексов от величины $T_{\text{эф}}$, найденной методом IRFM, с теоретическими расчетами, мы нашли,

что имеются существенные расхождения между наблюдениями и теорией при температурах $T_{\text{эф}} < 4500$ К. Сделан вывод, что прямое сравнение наблюдаемых индексов Q и $[c_1]$ с теоретическими расчетами при таких низких температурах может приводить к существенным ошибкам при определении $T_{\text{эф}}$. Особенно ненадежным становится такое сравнение в случае индекса $[c_1]$ при $T_{\text{эф}} < 4900$ К. Поэтому предлагается использовать эти индексы другим путем, а именно: подстановкой наблюдаемых значений Q и $[c_1]$ в найденные нами зависимости $T_{\text{эф}}$ от Q и $[c_1]$, которые основаны на определениях $T_{\text{эф}}$ методом IRFM.

Полученные зависимости, представленные соотношениями (1), (2) и (3), позволяют находить $T_{\text{эф}}$ по индексу Q в области $3800 < T_{\text{эф}} < 5100$ К и по индексу $[c_1]$ в области $4900 < T_{\text{эф}} < 5500$ К. Зависимости $T_{\text{эф}}$ от Q оказались разными для звезд с нормальной металличностью ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$) и пониженной металличностью ($[\text{Fe}/\text{H}] = 0.5$); им соответствуют равенства (1) и (2). Исследование точности предложенного метода позволяет заключить, что она сравнима с точностью метода IRFM. Если принять, что IRFM дает точность $\pm(60...80)$ К, тогда типичная ошибка нашего метода составляет приблизительно $\pm(50...70)$ К для соотношений (1) и (2) и $\pm(80...100)$ К для соотношения (3). Для наиболее холодных ярких звезд (как, например, Арктур) ошибка определения $T_{\text{эф}}$ может составлять всего лишь ± 20 К.

1. Ковтюх В. В., Мишенина Т. В., Горбанева Т. И. и др. Определение высокоточных эффективных температур гигантов по спектральным критериям // *Астрон. журн.*—2006.—**83**, № 2.—С. 158—167.
2. Любимков Л. С. Химический состав звезд: метод и результаты анализа. — Одесса: Астропринт, 1995.—323 с.
3. Любимков Л. С., Рачковская Т. М., Поклад Д. Б. Определение фундаментальных параметров сверхгигантов классов F и G // *Астрофизика.*—2009.—**52**, № 2.—С. 237—256.
4. Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C. The effective temperature scale of giant stars (F0-K5). I. The effective temperature determination by means of the IRFM // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**139**.—P. 335—358.
5. Blackwell D. E., Lynas-Gray A. E. Determination of the temperatures of selected ISO flux calibration stars using the Infrared Flux Method // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1998.—**129**.—P. 505—515.
6. Blackwell D. E., Petford A. D., Shallis M. J. Use of the infra-red flux method for determining stellar effective temperatures and angular diameters. The stellar temperature scale // *Astron. and Astrophys.*—1980.—**82**.—P. 249—252.
7. Castelli F., Kurucz R. L. // *Modeling of Stellar Atmospheres: IAU Simp. N 210 / Eds N. E. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray.* 2003. Poster A20.
8. Claret A. New grids of stellar models including tidal-evolution constants up to carbon burning. I. From 0.8 to $125 M_{\odot}$ at $Z = 0.02$ // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**424**.—P. 919—925.
9. Claret A. New grids of stellar models including tidal-evolution constants up to carbon burning. III. From 0.8 to $125 M_{\odot}$: the Large Magellanic Cloud ($Z = 0.007—0.01$) // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**453**.—P. 769—771.

10. *Hauck B., Mermilliod M.* Uvby-beta photoelectric photometric catalogue // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1998.—**129**.—P. 431—433.
11. *Kovtyukh V. V.* High-precision effective temperatures of 161 FGK supergiants from line-depth ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**378**.—P. 617—624.
12. *Lyubimkov L. S., Lambert D. L., Kaminsky B. M., et al.* Lithium abundance in atmospheres of F- and G-type supergiants and bright giants // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2012.—**427**.—P. 11—26.
13. *Lyubimkov L. S., Lambert D. L., Korotin S. A., et al.* Nitrogen enrichment in atmospheres of A- and F-type supergiants // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011. —**410**.—P. 1774—1786.
14. *Lyubimkov L. S., Lambert D. L., Rostopchin S. I., et al.* Accurate fundamental parameters for A-, F- and G-type supergiants in the solar neighbourhood // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**402**.—P. 1369—1379.
15. *Lyubimkov L. S., Rachkovskaya T. M., Rostopchin S. I., Lambert D. L.* Surface abundances of light elements for a large sample of early B-type stars. II. Basic parameters of 107 stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**333**.—P. 9—26.
16. *Mermilliod J.-C., Mermilliod M.* Catalogue of mean UBV data on stars. — New York: Springer-Verlag, 1994.—1387 p.
17. *Önehag A., Gustafsson B., Eriksson K., Edvardsson B.* Calibration of Strömgen *uvby-H* photometry for late-type stars — a model atmosphere approach // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**498**.—P. 527—542.
18. *Ramirez I., Allende Prieto C.* Fundamental parameters and chemical composition of Arcturus // *Astrophys. J.*—2011.—**743**.—P. 135—148.
19. *Ramirez I., Melendez J.* The effective temperature scale of FGK stars. I. Determination of temperatures and angular diameters with the Infrared Flux Method // *Astrophys. J.*—2005.—**626**.—P. 446—464.
20. *Richichi A., Fabbroni L., Ragland S., Scholz M.* A homogeneous temperature calibration for K and M giants with an extension to the coolest stars // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**344**.—P. 511—520.
21. *Trampedach R., Asplund M., Collet R., et al.* A grid of three-dimensional stellar atmosphere models of solar metallicity. I. General properties, granulation, and atmospheric expansion // *Astrophys. J.*—2013.—**769**.—P. 18—32.
22. *Van Leeuwen F.* Hipparcos, the new reduction of the raw data. — Dordrecht: Springer, 2007.—449 p.

Статья поступила в редакцию 07.10.13