

УДК 524.314

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕР ГРУППЫ А–F-ЗВЕЗД

*О.А. Аль-Хави, И.Ф. Бикмаев, С.С. Мельников,
М.И. Бикмаева, Н.А. Сахибуллин*

Аннотация

В работе определены фундаментальные параметры атмосфер (эффективная температура T_{eff} , ускорение силы тяжести $\log g$, микротурбулентная скорость V_{mic}) группы звезд спектральных классов А–F. В исследуемую группу были включены звезды Главной последовательности и сверхгиганты в диапазоне температур 6000–9000 К. Полученные фундаментальные параметры необходимы для расчетов химического состава методом моделей атмосфер. Выполнено сравнение с опубликованными значениями параметров, полученными другими авторами. Различия находятся в пределах случайных ошибок определения параметров.

Ключевые слова: звезды спектральных классов А–F, фундаментальные параметры атмосфер.

Введение

Химический состав звездных атмосфер является основным и наиболее ценным источником информации об эволюции вещества в недрах звезд, в межзвездной среде и в нашей Галактике в целом.

Подавляющая часть звезд Галактики принадлежит звездам спектральных классов А–F–G–K. Среди звезд спектральных классов А и ранних подклассов F многие оказываются звездами с пекулярным химическим составом, который не может быть объяснен в рамках химической эволюции Галактики и теории нуклеосинтеза в недрах звезд. Проблема возникновения пекулярностей к настоящему времени еще не решена. Звезды с пекулярным химическим составом были обнаружены во второй половине XX в. по наблюдениям на фотографических пластинках. Из-за невысокого отношения сигнал/шум в фотографических спектрах ($S/N = 20\text{--}50$) были обнаружены звезды лишь с сильной пекулярностью, достигающей нескольких порядков в избытке ряда элементов. Фотографические пластинки не позволяли выявлять звезды со слабой пекулярностью. Поэтому были практически неизучены звезды, в которых пекулярность имеется, но выражена слабо. В результате к настоящему времени неизвестно, каким образом пекулярности возникают и нарастают ли они со временем, как зависят от других параметров звезд – температуры, ускорения силы тяжести, микротурбулентной скорости, скорости вращения и т. д. Эта задача является сложной в наблюдательном отношении, так как необходима большая выборка звезд с различными параметрами атмосфер для обоснованных выводов. Важность решения этой задачи заключается в том, что пекулярности химического состава, вызванные физическими условиями формирования линий в звездных атмосферах, должны быть количественно установлены и отделены от реальных эффектов синтеза химических элементов в недрах звезд и эволюции вещества в Галактике. В настоящей работе определяются фундаментальные

параметры звезд спектральных классов А–F. Звёзды спектрального класса А и ранних подклассов F имеют эффективную температуру в диапазоне 7000–9000 К. По своему химическому составу эти звезды подразделяются на 3 основных типа с учетом химической пекулярности: нормальные звезды классов А–F, металлические Am-звезды, магнитные Ap-звезды. В нашем исследовании мы исключили магнитные звезды, чтобы сосредоточиться на звездах, где магнитное поле не участвует в возникновении химических пекулярностей. В связи с этим нами была специально подобрана выборка звезд, включающая в себя несколько звезд с нормальным (солнечным) химическим составом и звезды, для которых по литературе было известно, что их химический состав отличается от солнечного. Целью нашего исследования являются:

- 1) наиболее точное определение фундаментальных параметров;
- 2) анализ точности спектральных наблюдений исследуемой группы звезд на 1.5-метровом телескопе РТТ150 (национальная обсерватория ТЮБИТАК, Турция);
- 3) корректные расчеты химического состава, основанные на п. 1, 2 и использовании метода моделей атмосфер.

Спектральные наблюдения были выполнены в 2009–2011 гг. с помощью кудэ-эшелле спектрометра высокого разрешения телескопа РТТ-150. Спектральное разрешение $R = 50000$, диапазон длин волн 4000–8500 Å. Отношение сигнал/шум равно 200.

Прежде чем приступить к расчету химического состава, необходимо установить параметры моделей атмосфер, с использованием которых в дальнейшем будут проведены расчеты. Для этого, в свою очередь, нужно определить фундаментальные физические параметры исследуемых звезд, что и будет сделано в настоящей статье.

1. Эффективная температура, ускорение силы тяжести и микротурбулентная скорость

Эффективная температура звезды является одним из основных фундаментальных параметров, определяющих физическое состояние атмосферы. Прямые методы определения этой температуры базируются на интегрировании полного наблюдаемого потока звезды от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов. Для исследуемых нами звезд опубликованные потоки для широкого диапазона длин волн отсутствуют. Поэтому мы использовали наиболее принятый фотометрический метод, основанный на использовании потоков в избранных диапазонах длин волн. Отношения потоков в соседних участках спектра представляют собой измеренные показатели цвета в одной из общепринятых фотометрических систем. Показатели цвета для многих звезд измерены с высокой точностью и их значения табулированы в электронных базах данных. В нашей работе эффективная температура была определена по показателям цвета $(B-V)$, $(b-y)$, $(B2-G)$, $(B2-V1)$, $(V-K)$, прокалиброванным в шкале метода инфракрасных потоков. Показатели цвета взяты из астрономической базы данных Simbad (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>). Калибровочные уравнения опубликованы в [1–3] и имеют следующий вид:

$$T_{\text{eff1}} = 5040/\Theta, \quad \Theta = 0.629 + 0.644 \cdot (B2 - V1) + 0.065 \cdot (B2 - V1)^2;$$

$$T_{\text{eff2}} = 5040/\Theta, \quad \Theta = 0.838 + 0.501 \cdot (B2 - G) + 0.030 \cdot (B2 - G)^2;$$

$$T_{\text{eff3}} = 5040/\Theta, \quad \Theta = 0.458 \cdot (B2 - G) + 0.835;$$

$$T_{\text{eff4}} = 5040/\Theta, \quad \Theta = 0.640 \cdot (B2 - V1) + 0.632;$$

$$T_{\text{eff5}} = 9034 - 12562 \cdot (b - y) + 11813 \cdot (b - y)^2;$$

$$T_{\text{eff6}} = 9134 - 8600 \cdot (B - V) + 5398 \cdot (B - V)^2;$$

Табл. 1

Результаты определения эффективной температуры

Номер HD	Звезда	T_{eff1}	T_{eff2}	T_{eff3}	T_{eff4}	T_{eff5}	T_{eff6}	T_{eff7}	T_{eff8}
2628	28 And	–	–	–	–	7113	7297	6884	–
20902	Alfa Per	6372	6348	6340	6388	–	–	–	–
27962	68 Tau	–	9147	8952	–	8805	8725	–	–
32115	–	–	–	–	–	7282	7425	–	–
72037	2 UMa	7987	8006	7882	7951	7865	7855	–	7826
78362	Tau UMa	7129	7129	7030	7119	6914	6966	–	7039
95608	60 Leo	9147	9180	8984	9097	8784	–	–	8847
142860	41 Ser	6363	6469	6453	6371	6235	6319	–	6353
146136	94 Her	6756	6728	–	6738	–	–	–	–
165908	99 Her	6065	6065	6139	6084	6059	6267	–	–
166230	101 Her	8195	–	8115	8155	7989	–	–	7927
173648	6 Lyr	8076	8220	7962	8038	7836	7788	–	7908
182564	58 Dra	–	–	–	–	–	8408	8620	–
189849	15 Vul	–	–	–	–	7690	7650	–	–
195295	41 Cyg	6729	6684	6640	6729	–	–	–	–

$$T_{\text{eff7}} = 8921 - 2848 \cdot (V - K) + 441 \cdot (V - K)^2;$$

$$T_{\text{eff8}} = 7749 - 7911 \cdot (B2 - V1) + 7856 \cdot (B2 - V1)^2.$$

Результаты определения эффективной температуры по приведенным калибровочным формулам представлены в табл. 1.

В третьей колонке табл. 2 приводится усредненное значение эффективной температуры и случайная ошибка ее определения для каждой звезды. В среднем неопределенность в эффективной температуре составляет 100 К.

Значения параметра ускорения силы тяжести найдены по фундаментальной зависимости:

$$\log g = 4 \log T_{\text{eff}} + 0.4(Mv + B.C.) + \log(M/M_{\odot}) - 12.51,$$

где $Mv = V + 5 + 5 \log(\pi)$, π – тригонометрический параллакс, значения которого взяты из Каталога спутника HIPPARCOS (<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat>), $B.C.$ – болометрическая поправка (для звезд в исследуемом диапазоне температур она практически равна нулю и не учитывалась). Массы звезд в единицах массы Солнца (M/M_{\odot}) были оценены по эволюционным трекам из работы [4]. Постоянное слагаемое 12.51 отражает солнечные значения эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 5780$ К и ускорения силы тяжести $\log g = 4.44$. Точность определения ускорения силы тяжести составляет 0.2 dex. Микротурбулентная скорость V_{mic} была определена из условия независимости содержания от эквивалентных ширин линий атомов и однократно ионизованных ионов следующих элементов – Fe, Cr, Ti. Точность определения микротурбулентной скорости составила 0.3 км/с.

В табл. 2 даны итоговые значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести, определенные в настоящей работе, а также приведены опубликованные значения, полученные другими авторами. Различия находятся в пределах ошибок определения.

2. Выводы

В работе выполнено определение фундаментальных параметров атмосфер группы звезд спектральных классов A–F в диапазоне эффективных температур 6000–9000 К. Сравнение с опубликованными данными других авторов показало хорошее

Табл. 2

Фундаментальные параметры звезд и сравнение с опубликованными данными

Номер HD	Звезда	T_{eff} , К	T_{eff} , К опубл.	$\log g$	$\log g$ опубл.	V_{mic} , км/с	Масса, M/M_{\odot}
2628	28 And	7100 ± 170	7260 [7]	3.7	3.6 [7]	3	2
20902	Alfa Per	6360 ± 20	–	1.9	–	3	7
27962	68 Tau	8910 ± 160	9025 [8]	4.1	3.95 [8]	3	2.3
32115	–	7350 ± 70	7250 [11]	4.2	4.2 [12]	3	1.3
72037	2 UMa	7900 ± 65	7920 [9]	4.1	4.2 [9]	3	1.8
78362	Tau UMa	7030 ± 80	7390 [13]	3.8	4.2 [13]	3	1.8
95608	60 Leo	8970 ± 150	8840 [10]	4.2	4.1 [10]	3	2
142860	41 Ser	6370 ± 80	–	4.2	–	1.5	1.2
146136	94 Her	6740 ± 10	–	2.4	–	2.5	5
165908	99 Her	6080 ± 15	6050 [7]	4.2	4.5 [7]	1.5	1
166230	101 Her	8080 ± 100	–	3.6	–	2	2.5
173648	6 Lyr	7980 ± 15	–	3.7	–	3	2
182564	58 Dra	8510 ± 105	–	3.7	–	2	2.5
189849	15 Vul	7670 ± 20	–	3.5	–	2.5	2.25
195295	41 Cyg	6700 ± 40	6570 [5, 6]	2.4	2.3 [5, 6]	3	5

согласие для ряда общих звезд. Полученные фундаментальные физические параметры будут использованы для расчета химического состава атмосфер указанной группы звезд.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-02-00351-а).

Авторы благодарны сотрудникам национальной обсерватории ТЮБИТАК (Турция) за предоставление телескопа РГТ-150 для исследований.

Summary

O. A. Al-Hawi, I. F. Bikmaev, S. S. Melnikov, M. I. Bikmaeva, N. A. Sakhibullin. Determination of the Fundamental Parameters of Atmospheres of A–F Stars.

In this work, the fundamental atmospheric parameters (effective temperature T_{eff} , surface gravity $\log g$, microturbulent velocity V_{mic}) of the group of A–F-type stars have been determined. Main sequence and supergiant stars in the temperature range of 6000–9000 K have been included in the group of stars under study. The obtained fundamental parameters are necessary for chemical abundance calculation using atmosphere modeling approach. The comparison with the published values of the parameters determined by other authors has been performed. The differences with the published values are within the accidental errors of parameters determination.

Keywords: A–F-type stars, fundamental parameters of atmospheres.

Литература

1. *Hauck B., North P.* Effective temperature of Ap and Am stars from Geneva photometry // *Astron. Astrophys.* – 1993. – V. 269, No 1–2. – P. 403–410.
2. *Meléndez J., Ramírez I.* IRFM temperature calibrations for the Vilnius, Geneva, RI(C) and DDO photometric systems // *Astron. Astrophys.* – 2003. – V. 398, No 2. – P. 705–719.
3. *Blackwell D. E., Lynas-Gray A. E.* Determination of the temperatures of selected ISO flux calibration stars using Infrared Flux Method // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 1998. – V. 129, No 3. – P. 505–515.
4. *Maeder A., Meynet G.* Tables of isochrones computed from stellar models with mass loss and overshooting // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 1991. – V. 89, No 3. – P. 451–467.

5. *Lyubimkov L.S., Lambert D.L., Korotin S.A., Poklad D.B., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I.* Nitrogen enrichment in atmospheres of A- and F-type supergiants // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2011. – V. 410, No 3. – P. 1774–1786.
6. *Lyubimkov L.S., Lambert D.L., Rostopchin S.I., Rachkovskaya T.M., Poklad D.B.* Accurate fundamental parameters for A-, F- and G-type Supergiants in the solar neighbourhood // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2010. – V. 402, No 2. – P. 1369–1379.
7. *Adelman S.J., Caliskan H., Kocer D., Cay I.H., Tektunali H.G.* Elemental abundance analyses with DAO spectrograms – XXIII. The superficially normal stars 28 And (A7 III) and 99 Her (F7 V) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2000. – V. 316, No 3. – P. 514–518.
8. *Gebran M., Vick M., Monier R., Fossati L.* Chemical composition of A and F dwarfs members of the Hyades open cluster // *Astron. Astrophys.* – 2010. – V. 523. – P. A71-1–A71-13.
9. *Takeda Y., Kang D.-I., Han I., Lee B.-C., Kim K.-M.* Can sodium abundances of A-type stars be reliably determined from Na I 5890/5896 lines? // *Publ. Astron. Soc. Japan.* – 2009. – V. 61. – P. 1165–1178.
10. *Shorlin S.L.S., Wade G.A., Donati J.-F., Landstreet J.D., Petit P., Sigut T.A.A., Strasser S.* A highly sensitive search for magnetic fields in B, A and F stars // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 392, No 2. – P. 637–652.
11. *Bikmaev I.F., Ryabchikova T.A., Bruntt H., Musaev F.A., Mashonkina L.I., Belyakova E.V., Shimansky V.V., Barklem P.S., Galazutdinov G.* Abundance analysis of two late A-type stars HD 32115 and HD 37594 // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 389, No 2. – P. 537–546.
12. *Fossati L., Ryabchikova T., Shulyak D.V., Haswell C.A., Elmasli A., Pandey C.P., Barnes T.G., Zwintz K.* The accuracy of stellar atmospheric parameter determinations: a case study with HD 32115 and HD 37594 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2011. – V. 417, No 1. – P. 495–507.
13. *Hui-Bon-Hoa A.* Metal abundances of field A and Am stars // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 2000. – V. 144, No 2. – P. 203–209.

Поступила в редакцию
14.03.13

Аль-Хави Омар А. Абдулнаби – аспирант кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: omaralsamarrai@yahoo.com

Бикмаев Ильфан Фяритович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: ibikmaev@yandex.ru

Мельников Сергей Сергеевич – научный сотрудник кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: smelnikovs@rambler.ru

Бикмаева Мадина Ильфановна – аспирант кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: sirius2013@yandex.ru

Сахибуллин Наиль Абдуллович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: Nail.Sakhbullin@kpfu.ru