

УДК 524.31.026

М. Е. Боярчук, Я. В. Павленко, А. В. Шаврина

Содержание кислорода и углерода в атмосферах К-гигантов 9 Волопаса и ρ Волопаса

Для двух К-гигантов 9 Воо (КЗ—4 III) и ρ Воо (КЗ III) определено содержание кислорода и углерода путем сравнения наблюдаемых и теоретических эквивалентных ширины линий поглощения нейтрального кислорода ($\lambda\lambda$ 630.023, 636.388 нм) и бленды линий полосы (0, 0) молекулы C_2 (λ 513.5 нм), а также методом синтетического спектра в области канта полосы Свана (0, 1) молекулы C_2 (λ 563.5 нм). Использовались спектрограммы с дисперсией 0.6 нм/мм, полученные на 2.6-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории АН СССР.

Звезды 9 Воо и ρ Воо показывают одинаковый дефицит углерода ($[C] = -0.4$). Звезда со значительным избытком лития 9 Воо характеризуется большим содержанием кислорода: $[O] = -0.1$ для 9 Воо, $[O] = -0.3$ для ρ Воо.

THE ABUNDANCES OF OXYGEN AND CARBON IN THE ATMOSPHERES OF K-GIANTS ρ BOOTIS AND 9 BOOTIS, by Boyarchuk M. E., Pavlenko Ya. V., Shavrina A. V.—The abundances of oxygen and carbon were determined in the atmospheres of two K-giants, Li-rich star 9 Boo and metal-deficient star ρ Boo, using spectrograms (dispersion 0.6 nm/mm) obtained with the 2.6 m telescope of the Crimean Astrophysical Observatory.

Определению содержания в атмосферах звезд продуктов CNO-цикла посвящены многие работы. Особый интерес представляют звезды поздних спектральных классов с аномалиями химического состава. Мы определили содержания углерода и кислорода в атмосферах двух К-гигантов 9 Воо (КЗ—4 III) и ρ Воо (КЗ III). Эффективные температуры, ускорения свободного падения на поверхности, микротурбулентные скорости и содержания элементов для этих звезд определены в [1] на основе анализа эквивалентных ширины большого числа линий нейтральных и ионизованных элементов в области $\lambda\lambda$ 470—680 нм методом моделей атмосфер. Атмосферы этих гигантов значительно различаются по содержанию химических элементов: для ρ Воо характерен дефицит железа, кобальта, марганца и титана ($\Delta\epsilon \approx -0.3 \div -0.4$ dex) по отношению к солнечному содержанию этих элементов. В атмосфере 9 Воо содержание железа и титана нормальное, натрия, ванадия и хрома — повышенное ($\Delta\epsilon \approx +0.4$ dex), марганца — пониженное ($\Delta\epsilon \approx -0.4$ dex). Но самая большая особенность этой звезды — очень высокое содержания лития в ее атмосфере. Согласно работам Л. Ф. Хяни и Л. А. Яковины, в атмосфере 9 Воо наблюдается избыток лития $\lg \epsilon(Li) = 2.5$ [3] и $\lg \epsilon(Li) = 2.0$ [4], в то время как для большинства К-гигантов содержание лития находится в пределах $\lg \epsilon(Li) = -1.0 \div 0$, а для Солнца $\lg \epsilon(Li) = +1.0$ [10]. Все это вызвало интерес к определению содержания углерода и кислорода в атмосферах этих звезд.

Мы использовали те же спектрограммы, что и в [1]. Содержание кислорода обычно определяется из анализа запрещенных линий [O I] $\lambda\lambda$ 630.023, 636.388 нм. Для определения содержания углерода мы вынуждены были обратиться к анализу молекулярного спектра C_2 , так как атомарные линии углерода в рассматриваемой области не наблюдаются или очень слабы. Молекула C_2 выбрана для анализа, поскольку ее концентрация более чувствительна к содержанию углерода в атмосфере звезды по сравнению с другими содержащими углерод двухатомными молекулами.

Анализ на основе моделей атмосфер выполнялся с помощью комплекса программ, позволяющих анализировать молекулярные спектры, отдельные подпрограммы которого взяты из ATLAS5 [7]. Ионизацион-

но-диссоциативное равновесие рассчитывалось с учетом 40 наиболее обильных молекул. Поскольку значительная часть кислорода и углерода в атмосферах К-гигантов связана в молекулы CO, а концентрация других молекул зависит от отношения O/C, необходимо подобрать содержания кислорода и углерода, которые соответствовали бы наблюдаемым эквивалентным ширинам как линий [O I], так и бленды C₂. При этом для каждого варианта содержаний кислорода и углерода выполнялся перерасчет химического равновесия для выбранных моделей атмосфер. Такое совместное определение содержаний кислорода и углерода позволило определить отношение O/C с точностью до 0.1 dex.

Определение содержания кислорода и углерода мы провели вначале путем сравнения наблюдаемых и рассчитанных методом моделей атмосфер эквивалентных ширинок линий [O I] $\lambda\lambda$ 630.023 и 636.388 нм и бленды линий поглощения полосы Свана (0, 0) молекулы C₂ (λ 513.5 нм). Данные о линиях приведены в табл. 1. Мы рассчитали также вклад других атомных линий в наблюдаемые эквивалентные ширины линий [O I] и в бленду C₂. Этот вклад оказался незначительным и нами не учитывался.

Наилучшее согласие наблюдаемых и рассчитанных эквивалентных ширинок [O I] и C₂ получено нами при одинаковом дефиците углерода [C] = -0.5 для обеих звезд и содержании кислорода [O] = -0.2 и [O] = -0.4 для ρ Boo и ρ Boo соответственно (табл. 2). Для контроля определения содержания углерода выбрана другая область спектра — $\lambda\lambda$ 563—564 нм, куда попадает кант полосы (0, 1) системы Свана молекулы C₂. Эквивалентные ширины отдельных линий в этой области измерить не удалось, поэтому был рассчитан синтетический спектр. Данные об атомных линиях взяты из списка [8]. Для отдельных линий силы осцилляторов уточнены по работам [2, 5] (табл. 3).

В расчеты синтетического спектра включены также линии поглощения полос (5, 0), (10, 4) красной системы CN. Длины волн, потен-

Таблица 1. Данные о линиях [O I] и C₂

Линия	λ , нм	E'' , см ⁻¹	lg gf	W_{λ} , пм	
				ρ Boo	9 Boo
[O I]	630.023	0.0	-9.75	4.94	7.08
	636.388	158.5	-10.25	1.88	2.70
C ₂	513.557	4868.6	0.362	4.40	1.80
	513.558	4724.8	0.350		
	513.569	4584.1	0.342		

Таблица 2. Содержание углерода и кислорода в атмосферах ρ Boo и ρ Boo

Звезда	$T_{\text{эф}}$, К	lg g	v_t , км/с	[Fe]	λ , нм	[C]	[O]	[O/C]	O/C
ρ Boo	4200	1.5	2.3	0.0	513.5	-0.5	-0.2	0.3	3.6
					563.5	-0.4	-0.1	0.3	3.6
ρ Boo	4400	1.5	2.0	-0.3	513.5	-0.5	-0.4	0.1	2.2
					563.5	-0.4	-0.3	0.1	2.2
ρ Boo [6]	4250	1.5	1.7	-0.5	563.5	-0.53	-0.44	0.09	2.19

Примечание. Мы использовали $\lg \epsilon(\text{Fe})_{\odot} = 7.60$, $\lg \epsilon(\text{C})_{\odot} = 8.67$, $\lg \epsilon(\text{N})_{\odot} = 7.99$, $\lg \epsilon(\text{O})_{\odot} = 8.92$ [9].

циалы возбуждения и силы осцилляторов всех молекулярных линий рассчитаны нами. Хорошее согласие наблюдаемого спектра с синтетическим в области канта полосы (0, 1) λ 563.5 нм и совпадение рассчитанных эквивалентных ширин линий [O I] с наблюдаемыми получено при содержаниях кислорода и углерода на 0.1 dex меньших, чем найдено при анализе эквивалентной ширины бленды λ 513.5 нм (см. табл. 2). Эти новые значения содержаний кислорода и углерода (табл. 2) приводят к увеличению рассчитанной эквивалентной ширины бленды C₂ примерно на 30 %, что соответствует поднятию уровня непрерывного спектра в области λ 513.5 нм приблизительно на 3 %. Мы отдаем предпочтение результатам, полученным по более красной области спектра (λ 563.5 нм), где меньше сильных атомных линий. Кроме того, метод синтетического спектра позволяет более уверенно проводить непрерывный спектр.

Таблица 3. Уточненные силы осцилляторов атомных линий в области $\lambda\lambda$ 563.0—564.0 нм

λ , нм	Элемент	lg gf	Литературный источник
563.397	Fe I	-0.73	[5]
563.585	Fe I	-1.66	[5]
563.669	Fe I	-2.33	[5]
563.827	Fe I	-0.99	[5]
563.711	Ni I	-0.74	[2]
563.875	Ni I	-1.67	[2]

Полученные содержания кислорода и углерода и их отношения для обеих звезд представлены в табл. 2. Они даны по отношению к Солнцу. Например, $[C] \equiv \lg \epsilon(C)_* - \lg \epsilon(C)_\odot$. Кроме того, приводим $T_{\text{эф}}$, lg g, v_t и [Fe], полученные в [1] и используемые нами в настоящем анализе. Влияние ошибок этих величин на точность определения содержаний кислорода и углерода рассмотрено в [6, 11]. Мы оцениваем ошибку наших значений [O] и [C] величиной 0.2 dex, для отношения O/C она снижается до 0.1 dex из-за высокой чувствительности химического равновесия в атмосферах K-гигантов к величине O/C. Как показали наши расчеты, изменение содержаний кислорода и углерода на 0.2 dex с одинаковым знаком, т. е. без изменения O/C, приводит к таким же изменениям эквивалентных ширин линий O I и C₂, как и изменение O/C на 0.1 dex.

Отметим, что определение содержаний кислорода и углерода в атмосфере 9 Boo выполнено впервые. В последней строке табл. 2 приведены также оценки определения содержания кислорода и углерода в атмосфере ρ Boo, полученные в [6]. Видно, что результаты хорошо согласуются. Мы принимали нормальное (солнечное) содержание азота в атмосферах обеих звезд $\lg \epsilon(N) = 7.99$ [9]. Расчеты показали, что изменение содержания азота даже в широких пределах практически не влияет на концентрации O I и C₂.

При анализе спектральной области $\lambda\lambda$ 563—564 нм мы принимали $\epsilon(N) = \epsilon(N)_\odot$ и $\epsilon(N) = 10\epsilon(N)_\odot$. Усиление линий CN во втором случае не изменило результаты определения содержаний углерода и кислорода.

При определении химического состава звездных атмосфер возможным источником погрешностей могут быть эффекты отклонения от условий ЛТР. Как показали наши расчеты, слабые линии [O I] и C₂ образуются достаточно глубоко в атмосферах K-гигантов: максимум концентрации нейтрального кислорода и молекулы C₂ достигается при $\tau_{\text{Ross}} \geq 0.2$. Функции источников молекулярных и интеркомбинационных линий кислорода на таких глубинах контролируются неупругими соударениями со свободными электронами и атомами. Таким образом, приближение ЛТР вполне приемлемо в рамках настоящей работы.

Красные гиганты 9 Boo и ρ Boo показывают одинаковый дефицит углерода при различающихся более чем в два раза эквивалентных ширин линиях молекулы C₂. Это объясняется существенно большим (на 0.2 dex) содержанием кислорода в атмосфере 9 Boo.

По результатам [11], отношение O/C для 24 K-гигантов заключено в пределах 2.1—5.9 (для большинства из них O/C=3.0—3.5). Наши значения O/C находятся в тех же пределах (табл. 2).

1. Боярчук М. Е., Орлов М. Я., Шаврина А. В. Содержание элементов в атмосферах K-гигантов 9 Волопаса и ρ Волопаса // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 6.—С. 59—61.
2. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов.— Киев : Наук. думка, 1989.—196 с.
3. Хяни Л. Ф. Звезда 9 Воо — K-гигант с высоким содержанием лития // Письма в Астрон. журн.—1984.—10, № 2.—С. 130—134.
4. Яковина Л. А. Анализ химического состава атмосфер красных гигантов методом синтетического спектра: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Киев, 1986.—11 с.
5. Corliss C. H., Warner B. Absolute oscillator strengths for Fe I // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1964.—8, N 83.—P. 395—438.
6. Kjaergaard P., Gustafsson B., Walker G. A. H., Hultqvist L. Carbon, nitrogen, and oxygen abundances in G8-K3 giant stars // Astron. and Astrophys.—1982.—115, N 1.—P. 145—163.
7. Kurucz R. L. ATLAS5 — a program for calculating stellar model atmospheres // Smithsonian Astrophys. Observ. Spec. Rep.—1970.—N 309.—291 p.
8. Kurucz R. L., Peytremann E. A table of semiempirical gf values // Ibid.—1975.—N 362.—1219 p.
9. Lambert D. L. The abundances of the elements in the solar photospheres. VIII. Revised abundances of carbon, nitrogen and oxygen // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1978.—182, N 1.—P. 249—272.
10. Lambert D. L., Dominy J. F., Sivertsen S. Lithium in late-type giants. I. G and K giants // Astrophys. J.—1980.—235, N 1.—P. 114—125.
11. Lambert D. L., Ries L. M. Carbon, nitrogen, and oxygen abundances in G and K giants // Ibid.—1981.—248, N 1.—P. 228—248.

Крым. астрофиз. обсерватория АН СССР, Научный, Поступила в редакцию 15.03.88,
 Глав. астрон. обсерватория АН УССР, Киев после доработки 18.11.88