

УДК 524.31

Т. И. Горбанева¹, Т. В. Мишенина¹, К. Субиран²,
Л. Э. Канцен¹, С. А. Коротин¹

¹НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета
65014 Одесса, парк Шевченко. skydust@tm.odessa.ua

²Обсерватория Бордо, ВР21, F-33270 Флуарак, Франция

Процессы перемешивания в атмосферах холодных гигантов. Наблюдательные проявления горения водорода

Определены параметры атмосферы ($T_{\text{эф}}$, $\lg g$, $[Fe/H]$, V_t), массы и содержание 21 элемента для 19 гигантов диска. Оценена точность трех методов определения $\lg g$ — по условию ионизационного равновесия для атомов железа, с использованием параллаксов (и масс) и подгонки крыльевев линии кальция Ca I λ 616.217 нм. Содержание углерода, азота и кислорода определено по расчетам молекулярного синтетического спектра, магния и натрия — в предположении неЛТР и европия — с детальным учетом сверхтонкой структуры. Исследованы проявления собственной эволюции звезд и процессов перемешивания в их атмосферах. Получены средние значения содержания элементов группы CNO — дефицит углерода, избыток азота и «нормальное» содержание кислорода, что свидетельствует о прохождении реакций CNO-цикла горения водорода и последующий вынос переработанного вещества на поверхность. Обнаружен небольшой избыток натрия и тренд его содержания с $\lg g$. Подобный тренд обнаружен и для азота. Это может свидетельствовать в пользу прохождения реакций горения водорода также в NeNa-цикле, где дополнительный Ne может быть получен в процессе ряда превращений из азота.

ПРОЦЕСИ ПЕРЕМІШУВАННЯ В АТМОСФЕРАХ ХОЛОДНИХ ГІГАНТІВ. СПОСТЕРЕЖНІ ПРОЯВИ ГОРІННЯ ВОДНЮ, Горбаньова Т. І., Мішеніна Т. В., Субіран К., Канцен Л. Е., Коротін С. А. — Визначено параметри атмосфери, маси і вміст 21 елемента в атмосферах 19 гігантів. Оцінено точність трьох методів визначення $\lg g$ — за умовою іонізаційної рівноваги для атомів заліза, з використанням параллаксів та мас та підгонки крил лінії кальцію Ca I λ 616.217 нм. Вміст вуглецю, магнію та натрію визначено в припущенні неЛТР та європію — з детальним врахуванням надтонкої структури. Досліджено прояви власної еволюції зір та процеси перемішування в їхніх атмосферах. Одержано середні значення вмісту елементів групи CNO — дефіцит вуглецю, надлишок азоту та «нормальний» вміст кисню, що свідчить про проходження реакцій CNO-циклу згорання водню і наступне за цим винесення переробленої речовини на поверхню. Виявлено невеликий надлишок натрію та тренд його вмісту з $\lg g$. Це свідчить на користь

проходження реакцій згорання водню також у NeNa-циклі, де у процесі ряду перетворень з азоту може бути одержано додатковий Ne.

SOME PROCESSES OF MIXING IN THE ATMOSPHERES OF COLD GIANTS. OBSERVED EVIDENCE OF BURNING OF HYDROGEN, by Gorbanyeva T. I., Mishenina T. V., Soubiran C., Kantsen L. E., Korotin S. A. — Some atmosphere parameters (T_{eff} , l_{gg} , $[\text{Fe}/\text{H}]$, V_{\downarrow}) and the abundances of 21 elements for 19 giants of the disk are determined. The gravity is determined through three methods, namely, by condition of ionization balance for atoms of iron, with the use of parallaxes (and masses) and the adjustment of wings of the Ca I λ 616.217 nm line. The abundances of the carbon, nitrogen and oxygen are determined from a molecular synthetic spectrum, the abundances of the magnesium and natrium are deduced in the assumption of NLTE, and the abundance of europium is determined from a sophisticated consideration of hyperfine structure. The study of the evidence of stellar evolution and mixing in the stellar atmospheres is carried out. The average values for the abundances of elements of the CNO-group are obtained. They point to the underabundance of the carbon, overabundance of nitrogen and «normal» abundance of the oxygen, which is indicative of the reactions of the CNO-cycle of hydrogen burning and subsequent transfer of the enriched material on a surface. A small surplus of the natrium and a trend of its abundance with l_{gg} are found. A similar trend is revealed in the case of the nitrogen as well. This, probably, points to reactions of burning of hydrogen also in NeNa-cycle where additional Ne can be obtained during a number of transformations from nitrogen.

ВВЕДЕНИЕ

Холодные гиганты — это звезды, находящиеся на продвинутой эволюционной стадии. Химический состав их атмосфер отражает не только химический состав дозвездного вещества, но и процессы нуклеосинтеза, проходящие внутри звезд, а также степень (или глубину) перемешивания вещества. Когда звезда достигает ветви гигантов, поверхностная конвективная зона расширяется вглубь, и вещество, подвергнувшееся ядерному преобразованию, выносится наружу. При этом поверхностный химический состав изменяется. Вынос продуктов горения происходит в эпизоде первого перемешивания, когда в ядре звезды (массы меньше чем $2.3M_{\odot}$) выгорает около 10 % водорода. Стандартный CNO-цикл горения водорода внутри звезд небольших и умеренных масс ($1-3 M_{\odot}$) уменьшает содержание углерода на $-0.1...-0.2$ dex и увеличивает содержание азота на 0.3 dex и более [20]. В звездах массой $M < 2.3M_{\odot}$ гелиевое ядро становится вырожденным прежде, чем загорится гелий. Так ядро увеличивается по массе, гравитационная энергия превращается в тепловую, и в итоге, когда масса ядра достигает $0.45-0.5 M_{\odot}$, загорается гелий. Он горит в серии вспышек, звезда становится «slump-гигантом» и превращает гелий в углерод в невырожденных условиях.

Результаты исследований содержаний элементов CNO и их изотопов в атмосферах гигантов близкой к солнечной металличности [24, 29] находятся в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями, однако стандартная теория эволюции не предсказывает изменений содержаний O, Na, Al. В последние годы большой интерес вызывает возможность горения водорода в NeNa- и в MgAl-циклах и вынос продуктов горения в поверхностные слои вследствие более глубокого перемешивания. Звезды на восходящей ветви гигантов имеют гелиевое ядро, окруженное слоем горения водорода и протяженной конвективной оболочкой. Между слоем горения водорода и

основанием конвективной оболочки имеется небольшая по массе область, находящаяся в лучистом равновесии. Градиент молекулярного веса в этом слое определяет возможность проникновения оболочки в более глубокие слои. В работе [7] показано, что реакция $^{22}\text{Ne}(p, \gamma)^{23}\text{Na}$ обеспечивает заметный выход натрия во время горения водорода в конвективном ядре у главной последовательности звезд. Позже было найдено [6], что такая реакция при условии $[^{22}\text{Ne}/\text{Na}] = 0$ может производить достаточное количество натрия в слое, где происходит превращение O в N (ON-цикл) внутри эволюционирующих красных гигантов. Протонные захваты различными изотопами от кислорода до магния были привлечены также для объяснения синтеза алюминия, в частности в реакции $^{26}\text{Mg}(p, \gamma)^{27}\text{Al}$. Возможность протекания вышеупомянутых реакций в недрах звезд с дефицитом металлов была показана в ряде работ [18, 30 и др]. Подобные расчеты объясняют низкое содержание кислорода наряду с избытком натрия и алюминия, обнаруживаемые в гигантах шаровых скоплений (ШС) с дефицитом металлов $-0.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2.8$ [25, 26].

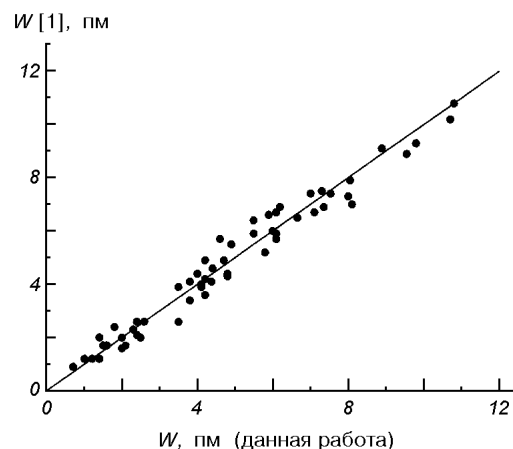
В последнее время подобное поведение содержания натрия, кислорода и магния обнаружено у звезд главной последовательности, принадлежащих ШС и отражает, вероятно, также и химический состав дозвездной среды. Тем не менее, гипотеза о прохождении NeNa-, MgAl-циклов и наличия более глубокого перемешивания у гигантов ШС является правомочной. Нельзя исключить такую возможность и для гигантов солнечной металличности, тем более что избытки натрия у гигантов и сверхгигантов обнаружены многими исследователями [2, 9, 17]. Как показано в работах [3, 9, 10], объяснить избыток Na наличием отклонений от ЛТР не удастся.

Цель нашей работы — определение параметров и содержания элементов в атмосферах 19 гигантов для тестирования современных теорий эволюции и нуклеосинтеза.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Спектральный материал был получен на 1.93 м телескопе Обсерватории Верхнего Прованса (Франция), оснащенный эшелле-спектрометром ELODIE [37]. Разрешающая способность спектрометра 42000, участок длин волн $\lambda\lambda$ 440.0—680.0 нм, отношение сигнала к шуму — 130—230. Первичная обработка спектров (экстракция изображений, учет космических частиц, деление на плоское поле и т.д.) была проведена ранее [24].

Дальнейшая обработка спектров (проведение уровня непрерывного спектра, измерение эквивалентных ширин линий W_λ и пр.) была выполнена нами



при помощи пакета программ DECH20 [4]. Эквивалентные ширины измерены методом подгонки профиля Гаусса.

На рис. 1 сравниваются полученные нами значения W_λ линий в спектре звезды HD 180711 с данными [1], полученными на 2.6-м телескопе Крымской астро-

Рис. 1. Сравнение полученных значений эквивалентных ширин линий W с данными [1]. Прямая — линия равных значений

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых звезд

HD	Sp	V	π , 0.001"	$M_{\text{бол}}$	u, км/с	v, км/с	w, км/с	M/M_{\odot}
85503	K0 III	3.88	24.52	0.206	37.5	-18.8	-16.8	1.5
96833	K1 III	3.01	22.21	-0.848	8.3	-10.3	-7.2	2
102224	K0 III	3.71	16.64	-0.826	34	-11.3	-20.6	2
104979	G8 III	4.13	19.08	0.204	55.1	-2.9	-32.2	2.5
113226	G8 IIIvar	2.83	31.9	0.069	38.1	-17.8	-11	2.5
177463	K1 III	5.41	10.07	-0.075	16.8	-18.1	-12.3	2
180711	G9 III	3.08	32.54	0.291	20.6	23.6	1.0	2
184406	K3 III	4.45	29.5	1.212	16.9	-24.4	-38.9	1
185351	K0 III	5.18	24.64	1.854	-24	-12.5	5.6	2
188119	G8 III	3.83	22.4	0.275	15.5	3.7	-10.5	2.5
191026	K0 IV	5.36	41.34	3.215	-44.4	-47.9	-7.1	1
197989	K0 III	2.50	45.26	0.367	52.1	-1.0	-6.0	2
198149	K0 IV	3.41	69.43	2.312	34.2	-97.6	11	1.5
199870	G8 III	5.56	12.32	0.650	48	-26.3	-11.1	2
205435	G8 III	4.00	26.2	0.833	-14.5	6.2	-10.2	2
207130	K0 III	5.18	13.19	0.336	-33.4	-29.9	-10.9	2
216228	K0 III	3.51	28.27	0.389	-22	-3.5	-15.1	2
219449	K0 III	4.21	21.97	0.373	72	-42.4	-6.2	1.5
221345	K0 III	5.22	13.09	0.357	62.4	-101	-36.1	2

физической обсерватории при помощи ПЗС-камеры (обратная линейная дисперсия — 0.3 нм/мм). Видно, что согласие между двумя системами W_{λ} хорошее.

ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕР

Основные характеристики исследуемых звезд приведены в табл. 1. Спектральные классы Sp , звездные величины V взяты из базы данных SIMBAD, параллаксы π — из наблюдений спутника HIPPARCOS [40]. БолOMETрические звездные величины $M_{\text{бол}}$ вычислены с использованием болOMETрических поправок из работы [19]. Оценка массы M звезд выполнена по эволюционным трекам. Компоненты пространственной скорости u , v , w взяты из работы [38]. Положение исследуемых звезд на диаграмме Г-Р приведено на рис. 2. Расчеты эволюционных треков, учитывающих перемешивание и истечение вещества, взяты из работы [31].

В качестве первого приближения для определения эффективных температур исследуемых звезд были взяты значения $T_{\text{эф}}$ из работы [38]. Эти данные основаны на оригинальном методе, использующем большое число линий в спектре и калибровки эффективной температуры $T_{\text{эф}}$, полученные из литературных источников. Затем $T_{\text{эф}}$ была уточнена нами по условию независимости содержания железа, определенного по данной линии Fe I от энергии ее нижнего уровня.

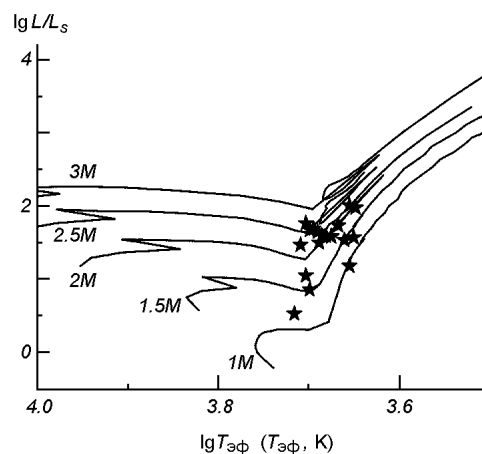


Рис. 2. Положение исследуемых звезд на диаграмме Г-Р

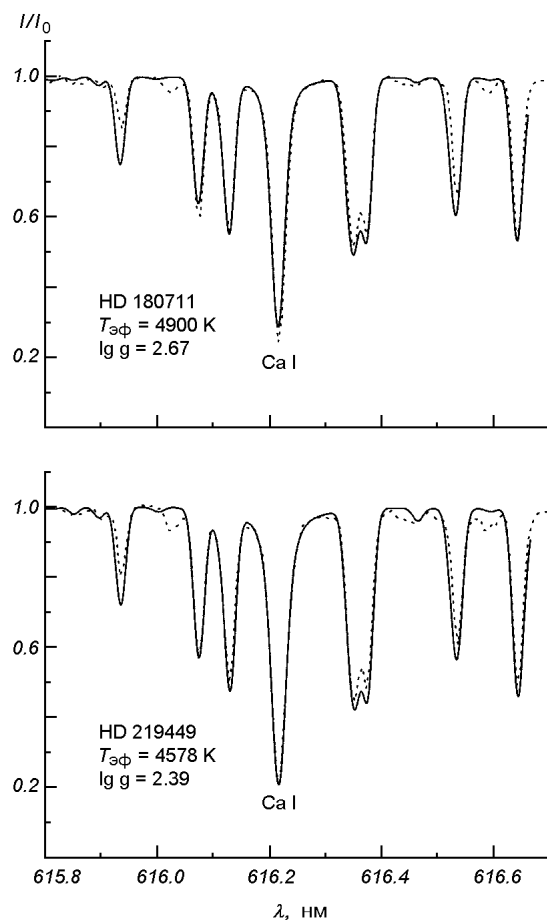


Рис. 3. Определение $\lg g$ методом подгонки крыльев линии кальция Ca I λ 616.2 нм: штриховая линия — спектр звезды, сплошная — синтетический спектр

Ускорение свободного падения g определено из условия ионизационного равновесия для атомов нейтрального и ионизованного железа. Известен ряд факторов, снижающих точность этого метода: неопределенности сил осцилляторов $\lg gf$ линий и температурной структуры моделей атмосфер, неЛТР-эффекты. Поэтому значения $\lg g$ уточнялись по формулам $\lg g = 4 \lg T_{\text{эф}} + 0.4 M_{\text{бол}} + \lg(M/M_{\text{солн}}) - 12.5$ (где приняты параметры для Солнца $T_{\text{эф}} = 5770$ К, $\lg g = 4.40$) и $M_{\text{бол}} = V + 5 + 5 \lg \pi + \text{BC}$ (где BC — болометрическая поправка) [19, 40]. Дополнительно был использован метод подгонки крыльев линии кальция Ca I λ 616.2 нм, проанализированный в работе [16]. Пример использования

крыльев приведен на рис. 3. Значения $\lg g$, полученные тремя методами, неплохо согласуются между собой (табл. 2). Значения микротурбулентной скорости V_t определены из условия независимости содержаний железа, определенных по разным линиям от их эквивалентной ширины.

Значения параметров атмосфер приведены в табл. 2. Погрешности определения параметров равны: $\Delta T = \pm 100$ К, $\Delta \lg g = \pm 0.3$ dex, $\Delta V_t = \pm 0.2$ км/с.

Полученные нами значения $T_{\text{эф}}$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$ отличаются от обобщенных данных [39] незначительно: их разности составляют 47 ± 60 К и -0.01 ± 0.06 соответственно.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Химический состав исследуемых звезд определен с использованием сетки моделей Куруца [27]. Выбор модели проводился стандартной интерполяцией моделей по $T_{\text{эф}}$ и $\lg g$.

Содержания ряда элементов, включая железо, определены в ЛТР-приближении по измеренным эквивалентным ширинам линий с использованием солнечных сил осцилляторов $\lg gf$ [5] и программы Куруца WIDTH9.

В табл. 3 даны полученные нами разности содержаний элементов по отношению к водороду в атмосферах исследуемых звезд и атмосфере Солнца $[\text{E}/\text{H}]$, ошибка σ индивидуального определения и количество n

Таблица 2. Параметры атмосфер исследуемых звезд

HD	$T_{\text{эф}}$	lgg	lgg (m)	lgg (ca)	V_t	[Fe/H]
85503	4472	2.33	2.36	2.51	1.55	0.21
96833	4520	2.15	2.08	2.15	1.45	-0.14
102224	4450	2.02	2.06		1.40	-0.46
104979	4950	2.76	2.76		1.40	-0.44
113226	5050	2.80	2.74	2.80	1.40	0.03
177463	4650	2.40	2.44	2.25	1.30	-0.27
180711	4900	2.67	2.68	2.74	1.30	-0.16
184406	4520	2.60	2.61	2.65	1.10	0.07
185351	5050	3.25	3.36	3.25	1.10	-0.01
188119	5000	2.80	2.80	2.60	1.25	-0.39
191026	5200	3.80	3.65	3.90	0.90	-0.05
197989	4798	2.70	2.67	2.70	1.30	-0.17
198149	5000	3.19	3.40	3.00	1.10	-0.27
199870	4880	2.68	2.81	2.80	1.30	-0.03
205435	5120	3.00	2.97	3.00	1.30	-0.12
207130	4733	2.64	2.64	2.65	1.40	0.04
216228	4850	3.00	2.70	3.00	1.30	-0.06
219449	4578	2.39	2.47	2.39	1.40	-0.11
221345	4731	2.63	2.64		1.40	-0.35

Таблица 3. Содержание элементов в атмосферах исследуемых звезд

Элемент	HD 85503			HD 96833			HD 102224			HD 104979		
	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n
Al	0.37	0.01	2	-0.05	0.11	2	-0.24	0.1	2	-0.26	0.09	2
Si	0.3	0.17	12	0	0.12	15	-0.24	0.15	20	-0.29	0.13	16
Ca	0.23	0.15	6	-0.08	0.11	6	-0.26	0.15	7	-0.27	0.13	5
Sc II	0.29	0.13	10	0.09	0.19	10	-0.26	0.14	9	-0.27	0.13	9
Ti	0.13	0.16	37	-0.2	0.13	34	-0.36	0.11	33	-0.34	0.09	33
Ti II	0.18	0.13	4	-0.16	0.13	3	-0.35	0.05	3	-0.32	0.04	3
V	0.34	0.07	20	-0.12	0.13	29	-0.3	0.14	31	-0.38	0.1	27
Cr	0.19	0.19	26	-0.09	0.20	30	-0.46	0.11	25	-0.33	0.2	19
Fe	0.21	0.11	106	-0.14	0.11	104	-0.46	0.09	133	-0.44	0.1	142
Fe II	0.27	0.20	7	-0.02	0.17	6	-0.35	0.2	7	-0.3	0.16	8
Co	0.39	0.17	12	-0.02	0.18	15	-0.29	0.16	17	-0.27	0.16	17
Ni	0.22	0.18	37	-0.02	0.15	48	-0.4	0.14	50	-0.39	0.1	48
Y II	0.11	0.16	6	-0.03	0.16	10	-0.48	0.17	8	0.12	0.19	11
Zr	-0.27	0.11	12	-0.44	0.09	9	-0.76	0.12	12	-0.04	0.13	8
La II	0.02	0.00	2	-0.04	0.05	3	-0.42	0.01	2	0.33	0.08	4
Ce II	0.21	0.13	7	0.11	0.06	9	-0.26	0.12	8	0.38	0.16	14
Nd II	0.35	0.13	4	0.19	0.18	5	-0.08	0.1	7	0.52	0.1	7
Sm II		0.10	3	-0.11	0.05	2	-0.25	0.09	3	0.09	0.13	3
	HD 113226			HD 177463			HD 180711			HD 184406		
Al	0.1	0.02	2	-0.14	0.05	2	-0.04	0.09	2	0.27	0.07	2
Si	0.17	0.08	17	-0.06	0.12	20	-0.03	0.14	19	0.21	0.16	16
Ca	0.09	0.1	4	-0.13	0.12	6	0	0.13	7	0.13	0.11	4
Se II	0.14	0.16	10	0.01	0.16	10	0.03	0.17	11	0.17	0.13	10
Ti	-0.05	0.11	31	-0.25	0.11	34	-0.15	0.1	31	0.08	0.11	34
Ti II	0.18	0.17	4	-0.18	0.11	3	-0.14	0.15	3	0.02	0.08	3
V	-0.02	0.11	29	-0.16	0.12	32	-0.09	0.13	30	0.24	0.14	23
Cr	0.12	0.1	24	-0.17	0.11	27	-0.12	0.13	23	0.16	0.17	23
Fe	0.03	0.11	156	-0.2	0.1	151	-0.16	0.1	132	0.07	0.13	136
Fe II	0.1	0.14	9	-0.06	0.11	7	-0.06	0.15	7	0.16	0.2	8
Co	0.03	0.15	16	-0.08	0.2	15	-0.08	0.17	17	0.25	0.15	11
Ni	0.07	0.12	50	-0.1	0.15	53	-0.1	0.1	44	0.25	0.2	52
Y II	0.2	0.18	6	-0.12	0.18	8	-0.13	0.18	11	0.08	0.13	6
Zr	-0.12	0.19	5	-0.4	0.08	8	-0.2	0.19	7	-0.28	0.19	12
La II	0.05	0.09	3	-0.08	0.17	3	-0.04	0.16	3	0.04	0.15	3
Ce II	0.16	0.11	7	0.08	0.12	13	-0.06	0.09	9	0.32	0.14	6
Nd II	0.32	0.13	4	0.22	0.05	5	0.08	0.11	5	0.4	0.14	4
Sm II				0	0.17	2	-0.04	0.1	3	0.19	0.12	2

Окончание табл. 3

Элемент	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n
	HD 185351			HD 188119			HD 191026			HD 197989		
Al	0.09	0.14	2	-0.24	0.08	2	0.15	0.01	2	-0.05	0.11	2
Si	0.1	0.13	22	-0.21	0.08	18	0.07	0.11	20	-0.02	0.1	20
Ca	0.1	0.11	5	-0.27	0.1	5	0.09	0.13	5	-0.07	0.14	5
Sc II	-0.02	0.12	9	-0.21	0.11	8	0.1	0.16	9	0.03	0.13	9
Ti	-0.01	0.11	35	-0.32	0.09	31	0.01	0.12	39	-0.2	0.09	36
Ti II	0.11	0.16	4	-0.22	0.05	3	0.06	0.13	4	-0.17	0.12	3
V	0.05	0.09	28	-0.37	0.1	26	0.06	0.1	27	-0.17	0.13	31
Cr	0.05	0.11	25	-0.29	0.17	17	-0.01	0.14	28	-0.27	0.11	28
Fe	-0.01	0.11	170	-0.39	0.08	161	-0.05	0.1	154	-0.17	0.12	140
Fe II	0.07	0.17	8	-0.27	0.17	12	0.06	0.16	10	-0.05	0.14	9
Co	0.07	0.16	16	-0.36	0.08	13	0.03	0.13	15	-0.08	0.12	15
Ni	0.01	0.12	53	-0.33	0.11	48	0	0.08	51	-0.16	0.12	55
Y II	0.05	0.15	9	-0.3	0.19	9	-0.06	0.15	4	-0.19	0.15	8
Zr	-0.14	0.12	8	-0.37	0.13	5	-0.22	0.16	7	-0.49	0.14	12
La II	-0.04	0.1	3	-0.29	0.12	3	0.02	0	1	-0.13	0.12	3
Ce II	0.03	0.13	11	-0.08	0.13	9	-0.03	0.12	9	0.01	0.14	12
Nd II	0.19	0.05	3	0.01	0.06	3	0.16	0.15	5	0.18	0.19	6
Sm II	-0.05	0.16	3	-0.15	0.09	3	0.16	0.03	2	0.04	0.11	3
	HD 198149			HD 199870			HD 205435			HD 207130		
Al	-0.1	0	1	0.19	0.14	2	-0.08	0.06	2	0.15	0.02	2
Si	-0.09	0.07	22	0.08	0.12	17	-0.04	0.08	15	0.19	0.13	19
Ca	-0.15	0.15	8	0.08	0.11	6	-0.08	0.08	7	0.06	0.12	5
Sc II	-0.04	0.11	8	-0.02	0.17	12	-0.15	0.09	11	0.19	0.2	11
Ti	-0.19	0.09	30	-0.05	0.14	36	-0.18	0.09	32	-0.03	0.09	31
Ti II	-0.23	0.13	3	-0.02	0.13	3	-0.03	0.12	4	0.06	0.17	3
V	-0.13	0.12	34	0.01	0.13	27	-0.18	0.11	31	0.15	0.2	34
Cr	-0.14	0.12	30	0.1	0.17	32	-0.13	0.15	31	0.13	0.09	23
Fe	-0.27	0.09	154	-0.03	0.15	160	-0.12	0.1	160	0.04	0.14	125
Fe II	-0.16	0.17	12	0.1	0.16	11	-0.03	0.1	8	0.17	0.15	8
Co	-0.12	0.14	18	0.1	0.17	18	-0.19	0.09	14	0.27	0.13	16
Ni	-0.15	0.12	57	0.07	0.12	51	-0.16	0.08	42	0.2	0.14	51
Y II	-0.26	0.18	8	-0.07	0.14	9	-0.09	0.19	11	0.09	0.13	9
Zr	-0.35	0.14	8	-0.2	0.15	10	-0.21	0.15	10	-0.22	0.2	11
La II	-0.17	0.03	3	-0.08	0.08	2	-0.03	0.12	3	0.02	0.02	2
Ce II	0	0.14	8	-0.01	0.12	11	0.08	0.13	12	0.12	0.11	11
Nd II	0.07	0.13	4	0.2	0.1	5	0.14	0.18	5	0.31	0.12	4
Sm II	-0.14	0.14	4	0.05	0.16	3	-0.11	0.12	4	0.23	0.05	3
	HD 216228			HD 219449			HD 221345					
Al	0.1	0.08	2	0.06	0.05	2	-0.1	0.01	2			
Si	0.09	0.1	18	0.05	0.14	15	-0.15	0.08	19			
Ca	0.02	0.14	4	-0.09	0.12	6	-0.22	0.08	7			
Sc II	0.11	0.15	11	-0.14	0.18	11	-0.14	0.13	8			
Ti	-0.08	0.09	37	-0.2	0.1	33	-0.12	0.14	36			
Ti II	0.06	0.12	3				-0.29	0.17	3			
V	0.07	0.17	33	-0.14	0.11	27	-0.2	0.08	27			
Cr	-0.13	0.17	29	-0.23	0.08	21	-0.37	0.17	21			
Fe	-0.06	0.13	130	-0.11	0.1	134	-0.35	0.1	142			
Fe II	0.03	0.15	6	0.01	0.08	7	-0.24	0.16	9			
Co	0.12	0.19	18	0.01	0.19	16	-0.11	0.17	19			
Ni	0.04	0.17	55	-0.02	0.14	50	-0.27	0.13	53			
Y II	0.1	0.08	8	-0.2	0.2	9	-0.46	0.1	6			
Zr	-0.16	0.18	12	-0.69	0.12	11	-0.54	0.15	8			
La II	0.11	0.05	3	-0.09	0.01	2	-0.39	0.08	2			
Ce II	0.31	0.08	11	-0.11	0.08	9	-0.26	0.07	7			
Nd II	0.35	0.07	4	0.01	0.12	4	-0.03	0.17	4			
Sm II	0.12	0.13	2	0.01	0.18	3	-0.37	0.15	3			

Таблица 4. Содержание углерода, азота, кислорода, натрия и магния в атмосферах исследуемых звезд

HD	$T_{\text{эф}}$	lgg	lgA (C2)	lgA (N)	lgA (O)	lgA (Na)	lgA (Mg)
85503	4472	2.33	8.52	8.5	8.92		
96833	4520	2.15	8.1	8.3	8.7		
102224	4450	2.02	7.75	7.88	8.57		
104979	4950	2.76	7.9	—	8.57	5.88	7.27
113226	5050	2.8	8.2	8.3	8.72	6.42	7.56
161074	4100	1.5	8.2	8.1			
177463	4650	2.4	8.2	8.1		6.22	7.46
180711	4900	2.67	8.1	—	8.8	6.20	7.54
184406	4520	2.6	8.4	8.1	8.85		
185351	5050	3.25	8.2		8.8	6.24	7.55
188119	5000	2.8	8.25		8.62	5.85	7.33
191026	5200	3.8	8.4	—	8.92	6.24	7.54
197989	4798	2.7	8.2	8.1	8.85	6.07	7.51
198149	5000	3.19	8.1	7.9		6.03	7.33
199870	4880	2.68	8.25	8.3	8.72	6.37	7.55
205435	5120	3	8.1	—	8.7	6.23	7.67
207130	4733	2.64	8.28	8.2	8.8	6.32	7.44
216228	4850	3	8.27	8.2	8.78	6.30	7.54
219449	4578	2.39	8.27	8.15	8.72		
221345	4731	2.63	7.95	7.95	—	5.94	7.23

линий данного элемента, использованных в анализе.

Содержания углерода, азота и кислорода получены методом синтетического спектра по программе STARSP [41] с учетом молекулярного диссоциативного равновесия. Для определения содержания углерода была использована молекулярная полоса $C_2 \lambda 563.5$ нм, азота — молекулярная полоса CN $\lambda 647.0$ нм, кислорода — запрещенная линия $\lambda 630.03$ нм. Расчет проводился со следующими потенциалами диссоциации $D_0(C_2) = 6.15$ эВ и $D_0(CN) = 7.76$ эВ. Более подробно метод описан в работе [11].

Важными элементами в исследовании цепочек горения водорода (последующих за CNO) являются натрий и магний. В спектрах низкотемпературных звезд-гигантов линии этих элементов достаточно сильны (эквивалентные ширины превышают величину $W = 20.0$ нм) и можно ожидать заметного влияния отклонений от ЛТР при образовании таких линий. Поэтому для определения содержания натрия и магния мы использовали неЛТР-подход, опираясь на программный комплекс MULTI [15]. При этом рассматривались четыре линии натрия и девять линий магния. Построение моделей атомов Na и Mg выполнено С. А. Коротыным. Методика описана в работах [9, 35]. Содержание европия определено методом синтетического спектра по программе [41] с учетом сверхтонкой структуры [32] в приближении ЛТР. Следует отметить, что в работе [32] оценено влияние отклонения от ЛТР на определение содержания Eu и показано, что неЛТР-поправки не превышают 0.1 dex. Точность подгонки профиля при расчетах синтетического спектра равна 0.05 dex.

В табл. 4 приведены содержания углерода, азота, кислорода в шкале $lgA(H) = 12$, полученные методом синтетического спектра, а также содержания натрия и магния, полученные с учетом неЛТР-эффектов.

Ошибки определения содержаний. Основными источниками внутренних ошибок метода определения химического состава являются: 1) неопределенности выбора параметров атмосфер, 2) неопределенности сил осцилляторов, 3) отклонения от ЛТР. Для примера в табл. 5 приведена оценка

Таблица 5. Влияние неопределенностей параметров на точность определения содержания элементов

Элемент	$\Delta T_{\text{эф}}$	Δl_{gg}	ΔV_t	Δ_{tot}
C I	0.16	0.12	0.00	0.20
O I	0.00	0.13	0.00	0.13
Na I	0.09	0.04	0.06	0.12
Mg I	0.02	0.00	0.04	0.05
Al I	0.06	0.00	0.06	0.09
Si I	0.07	0.07	0.03	0.11
Ca I	0.10	0.03	0.09	0.13
Sc II	0.02	0.12	0.07	0.14
Ti I	0.13	0.01	0.09	0.16
Ti II	0.03	0.12	0.09	0.16
V I	0.15	0.02	0.12	0.19
Cr I	0.08	0.00	0.06	0.10
Fe I	0.00	0.03	0.09	0.09
Fe II	0.15	0.17	0.05	0.23
Co I	0.02	0.07	0.09	0.12
Ni I	0.01	0.06	0.10	0.11
Y II	0.01	0.12	0.09	0.15
Zr I	0.17	0.02	0.04	0.17
La II	0.02	0.12	0.06	0.14
Ce II	0.02	0.11	0.14	0.18
Nd II	0.03	0.12	0.13	0.18
Sm II	0.03	0.12	0.13	0.17

неопределенности содержаний элементов, возникающей вследствие неопределенностей параметров атмосферы для звезды HD 184406.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде чем приступить к обсуждению результатов, остановимся на ряде особенностей звезд нашего списка. Звезда HD 104979 классифицирована как умеренно-бариевая. Бариевые звезды были идентифицированы как класс пекулярных красных гигантов [14]. Химические особенности таких G- и K-гигантов включают избыток углерода и элементов, более тяжелых, чем Fe (элементы s-процесса, образующиеся в процессах медленного нейтронного захвата), например Ba и Sr [28]. Соответствующие температуры и потоки нейтронов обеспечиваются горением гелия. В результате третьего перемешивания обогащенное s-процессом вещество выносится на поверхность звезды [21, 36]. Однако бариевые звезды недостаточно горячи и массивны, чтобы подвергнуться третьему перемешиванию [13, 37]. С открытием двойственной природы этих звезд [33, 34], их химические особенности объясняются обменом массы между компонентами двойной системы, один из которых является проэволюционировавшей звездой (postAGB, например).

Индикаторами собственной эволюции звезды и степени перемешивания вещества на стадии гиганта являются прежде всего содержания элементов C, N, O и их изотопов, претерпевающие изменения в процессе CNO-цикла горения водорода. В последнее время некоторые исследователи обращено внимание на возможность горения водорода в NeNa-, MgAl-циклах, что приводит к увеличению содержания Na, Al. В работе [2] высказано аргументированное предположение, что содержания Si и элементов s-процесса могут изменяться в процессе эволюции, а также обнаружена тенденция к увеличению этих содержаний по мере уменьшения силы тяжести на поверхности звезды для холодных гигантов поля. Поэтому здесь мы обратили особое внимание на определение параметра l_{gg} , и определили его тремя

методами. Следует отметить, что параметры $T_{\text{эф}}$ и $\lg g$ не являются независимыми. Для звезд ветви гигантов такая зависимость приведена в работе [8]. И в случае отсутствия зависимости $[\text{Fe}/\text{H}]$ от $T_{\text{эф}}$ можно ожидать зависимости $[\text{Fe}/\text{H}]$ от $\lg g$. Рассматриваемые нами гиганты лежат в некоторой области металличности ($0.2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.5$), на которой можно проследить и изменение содержаний элементов с $[\text{Fe}/\text{H}]$. Рассмотрим поведение вышеупомянутых элементов как с изменением $\lg g$, так и $[\text{Fe}/\text{H}]$, и сравним его с поведением элементов, образующихся преимущественно в результате вспышек Сверхновых различных типов, обогативших дозвездное вещество, из которого были образованы исследуемые звезды. Это элементы Ca, Ti (образующиеся в процессах альфа-захвата, SN II), элементы железного пика V, Co, Ni (SN Ia SN II) и элементы Nd, Eu, образующиеся в основном в процессах быстрого нейтронного захвата (r-процесса, SN II), осуществляющихся также при вспышках Сверхновых звезд. Как показано в работах [12, 22], в Солнечной системе около 90 % Eu и 70 % Nd произведено в результате r-процесса.

Элементы C, N, O. Для этих элементов, получены следующие средние значения содержаний: $\langle [\text{C}/\text{Fe}] \rangle = -0.25 \pm 0.08$, $\langle [\text{O}/\text{Fe}] \rangle = -0.03 \pm 0.11$, $\langle [\text{N}/\text{Fe}] \rangle = 0.34 \pm 0.07$. Эти величины хорошо согласуются с предсказаниями теории эволюции и с другими результатами [3, 29]. На рис. 4 приведены зависимости содержаний этих элементов от металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ и ускорения свободного падения $\lg g$. Наблюдается некоторая тенденция к увеличению содержания азота с уменьшением $\lg g$. Содержания углерода и кислорода не показывают подобной зависимости. Содержание кислорода

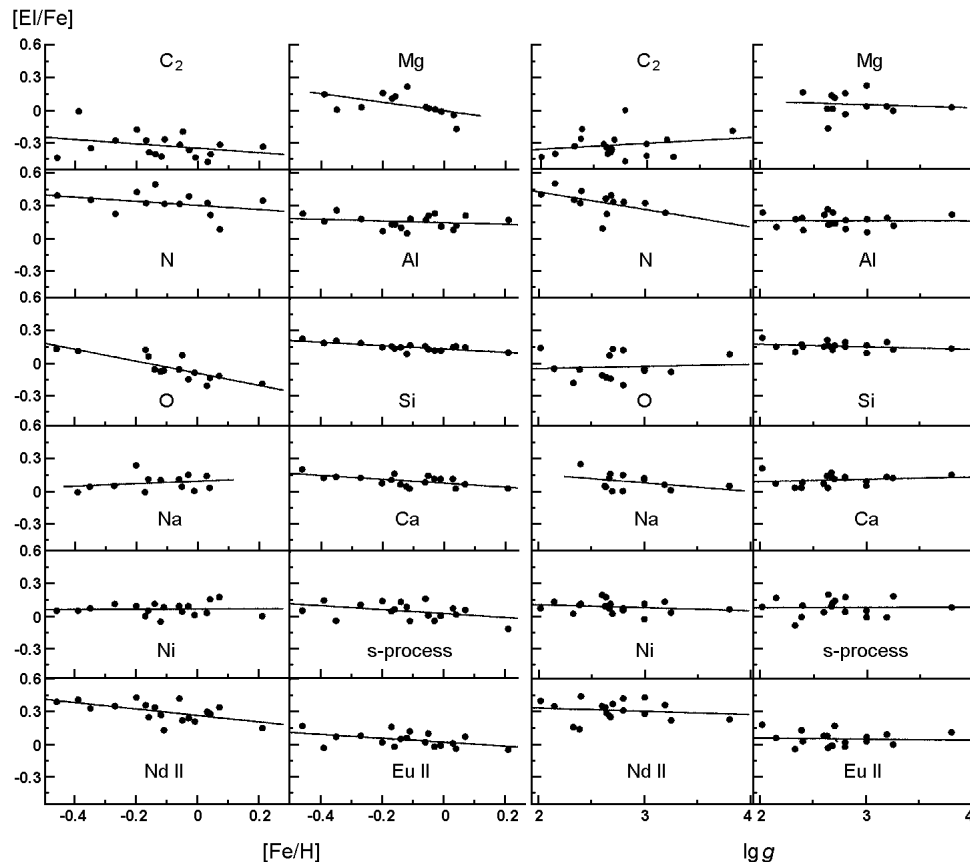


Рис. 4. Зависимость относительного содержания элемента $[E/\text{Fe}]$ от параметров $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $\lg g$

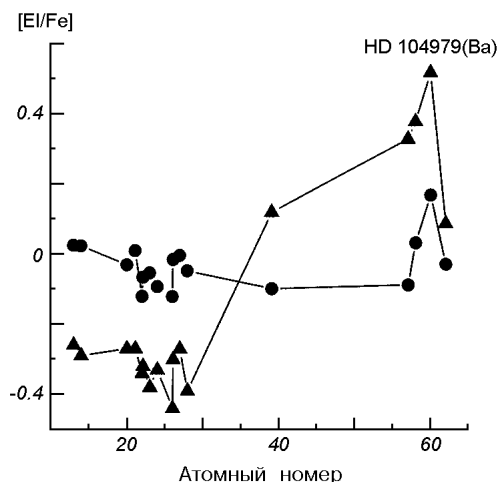


Рис. 5. Распространенность элементов в атмосферах исследуемых звезд: точки — «нормальные» красные гиганты, треугольники — умеренно-бариевая звезда HD 104979

увеличивается с понижением металличности, что подтверждает установленный факт увеличения обогащения межзвездной среды альфа-элементами по отношению к железу для низкометаллических звезд.

Na, Mg, Al, Si — элементы, изменение содержания которых возможно в последующих за CNO цепочках горения водорода. Как видно из рис. 4, наблюдается некоторая тенденция только для натрия — увеличение содержания с уменьшением I_{gg} . Поведение магния и кремния от $[Fe/H]$ типично для альфа-элементов.

Альфа-элемент Ca. Как и в случае других альфа-элементов (O, Mg, Si), для содержания Ca нет заметной зависимости от I_{gg} и наблюдается характерное его увеличение с уменьшением $[Fe/H]$.

Элементы железного пика — V, Co, Ni. Рассматриваемые элементы не проявляют заметных зависимостей от I_{gg} и $[Fe/H]$.

Элементы s-процесса — Y, Ce, La и элементы r-процесса Nd, Eu также не проявляют заметных зависимостей от I_{gg} и $[Fe/H]$.

HD 104979. На рассматриваемых рисунках не приведены данные для умеренно-бариевой звезды HD 104979, поскольку она не относится к классу «нормальных» гигантов. Распределение содержания элементов в ее атмосфере и сравнение с усредненной кривой для нормальных гигантов приведены на рис. 5. Как видно, для содержаний легких элементов нет заметных отличий; заметные отличия наблюдаются только для элементов, образующихся преимущественно в s-процессе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены параметры атмосфер ($T_{\text{эф}}$, I_{gg} , $[Fe/H]$, V_i) и содержание 21 элемента для 19 гигантов диска (среди них одна умеренно-бариевая звезда).

2. Проведена оценка точности трех методов определения I_{gg} : по условию ионизационного равновесия, использование параллаксов (и масс) и подгонка профиля линии кальция Ca I λ 616.217 нм.

3. Содержание C и N определено по молекулярному синтетическому спектру, Mg и Na — в предположении неЛТР и Eu — с детальным учетом сверхтонкой структуры.

4. Проведено исследование проявлений собственной эволюции звезд и процессов перемешивания в их атмосферах. Получены средние значения содержаний элементов группы CNO — дефицит углерода, избыток азота и

«нормальное» содержание кислорода, что свидетельствует о прохождении реакций горения водорода и последующий вынос переработанного вещества на поверхность. Обнаружен небольшой избыток натрия и уменьшение его содержания с увеличением I_{gg} , что свидетельствует о глубоком перемешивании и выносе вещества из более глубоких и горячих слоев, в которых возможно прохождение NeNa-цикла.

5. Подобный тренд обнаружен и для азота. Это может свидетельствовать в пользу прохождения реакций горения водорода в NeNa-цикле, где дополнительный Ne может быть получен в процессе ряда превращений из азота.

6. В результате анализа содержаний углерода, азота и кислорода можно утверждать, что в атмосферах исследуемых звезд есть вещество, переработанное в CNO-цикле.

7. Отсутствие заметной зависимости Al, Si, элементов s-процесса от I_{gg} может свидетельствовать о том, что в атмосферах исследуемых звезд нет переработки вещества в дальнейших цепочках горения водорода.

1. Боярчук А. А., Антипова Л. И., Боярчук М. Е. и др. Атмосферы шести красных гигантов // Астрон. журн.—1996.—73, № 6.—С. 862—874.
2. Боярчук А. А., Антипова Л. И., Боярчук М. Е. и др. Сравнительный анализ содержаний химических элементов в атмосферах красных гигантов различных возрастных групп // Астрон. журн.—2001.—78, № 4.—С. 349—358.
3. Боярчук А. А., Губены И., Кубат И. и др. Эффекты отклонений от ЛТР в атмосферах F-сверхгигантов. Анализ линий Na I (Метод вычислений) // Астрофизика.—1988.—28.—С. 335—342.
4. Галазутдинов Г. А. Система обработки звездных эшеле-спектров. — Нижний Архыз, 1992.—52 с.—(Препринт/ Российская АН. САО; № 92).
5. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
6. Денисенков П. А., Денисенкова С. Н. О корреляции между содержанием Na и CNO элементов в красных гигантах ω Cen // Письма в Астрон. журн.—1990.—16, № 7—С. 642—651.
7. Денисенков П. А., Иванов В. В. Синтез натрия при горении водорода в звездах // Письма в Астрон. журн.—1987.—13, № 6.—С. 520—525.
8. Комаров Н. С. Холодные звезды-гиганты. — Одесса: АстроПринт, 1999.—210 с.
9. Коротин С. А., Мишенина Т. В. Не-ЛТР-анализ содержания натрия в атмосферах пекулярных звезд диска // Астрон. журн.—1999.—76, № 8.—С. 611—617.
10. Машонкина Л., Сахибуллин Н., Шиманский В. Спектральные линии Na I в атмосферах G-карликов в отсутствие ЛТР // Астрон. журн.—1993.—70, № 2.—С. 372—378.
11. Мишенина Т. В., Цымбал В. В. Содержание Li и элементов CNO-группы в атмосферах девяти пекулярных гигантов // Письма в Астрон. журн.—1997.—23, № 9.—С. 693—699.
12. Arlandini C., Kappeler F., Wisshak K., et al. Neutron Capture in Low-Mass Asymptotic Giant Branch Stars: Cross Sections and Abundance Signatures // *Astrophys. J.*—1999.—525, N 2.—P. 886—900.
13. Bergeat J., Knapik A. The barium stars in the Hertzsprung — Russel diagram // *Astron. and Astrophys.*—1997.—321, N 1.—P. L9—L12.
14. Bidelman W. P., Keenan P. C. The Ba II Stars // *Astrophys. J.*—1951.—114, N 2.—P. 473.
15. Carlsson M. A computer program for solving multi-level non-lte radiative transfer problems in moving or static atmospheres // *Uppsala Observ. Rep.*—1986.—33.
16. Cayrel R., Faubert-Scholl M., Feautrier N., et al. On the use of Ca I triplet lines as luminosity indicators // *Astron. and Astrophys.*—1996.—312, N 2.—P. 549—552.
17. Cayrel de Strobel G., Chave-Godard J., Hernandez G., et al. Sodium in late-type stars // *Astron. and Astrophys.*—1970.—7, N 3.—P. 408—431.
18. Denissenkov P. A., Da Costa G. C., et al. The puzzling MgAl anticorrelation in globular-cluster red giants: primordial plus deep mixing scenario? // *Astron. and Astrophys.*—1998.—333, N 3.—P. 926—941.
19. Flower P. J. Transformations from theoretical Hertzsprung—Russell diagrams to color—magnitude diagrams: effective temperatures, B—V colors, and bolometric corrections // *Astrophys. J.*—1996.—469, N 1.—P. 355—365.
20. Iben I. Single and binary star evolution // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1991.—76, N 1.—P. 55—114.
21. Iben I., Renzini A. Asymptotic giant branch evolution and beyond // *Annu. Rev. Astron. and*

- Astrophys.—1983.—**21**.—P. 271—342.
22. *Kappeler F., Beer H., Wisshak K.* s-process nucleosynthesis-nuclear physics and the classical model // *Rep. Prog. Phys.*—1989.—**52**.—P. 945—1013.
 23. *Katz D., Soubiran C., Cayrel R., et al.* On-line determination of stellar atmospheric parameters T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ from ELODIE echelle spectra. I. The method // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**338**, N 1.—P. 151—160.
 24. *Kaergaard P., Gustafsson B.* Carbon, nitrogen, and oxygen abundances in G8—K3 giant stars // *Astron. and Astrophys.*—1982.—**115**, N 1.—P. 145—163.
 25. *Kraft R. P., Sneden C., Langer G. F., Shetrone M. D.* Oxygen abundances in halo giants. V. The oxygen—sodium anticorrelation in a sample of 22 bright giants in M13 // *Astrophys. J.*—1993.—**106**, N 4.—P. 1490—1507.
 26. *Kraft R. P., Sneden C., Langer G. F., et al.* Oxygen Abundances in Halo Giants. VI. M10, A Globular Cluster with Metallicity Similar to M3 and M13 // *Astrophys. J.*—1995.—**109**, N 6.—P. 2586—2599.
 27. *Kurucz R. L.* ATLAS 9 stellar atmosphere program and 2 km s⁻¹ grid. — 1993, CD-ROM 13.
 28. *Lambert D. L.* The chemical composition of cool stars. I. The Barium stars // *Cool stars with excesses of heavy elements: Proc. of the Strasbourg Observatory Colloquium, Strasbourg, France, July 3—6, 1984.* — Dordrecht: Reidel, 1985.—P. 191—221.
 29. *Lambert D. L., Ries L. M.* Carbon, nitrogen, and oxygen abundances in G and K giants // *Astrophys. J.*—1981.—**248**, N 1.—P. 228—248.
 30. *Langer G. E., Hoffman R., Sneden C.* Sodium—oxygen abundance anticorrelations and deep-mixing scenarios for globular-cluster giants // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1993.—**105**.—P. 301—307.
 31. *Maeder A., Meynet G.* Tables of evolutionary star models from 0.85 to 120 M_{\odot} with overshooting and mass loss // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1988.—**76**, N 2.—P. 411—421.
 32. *Mashonkina L., Gehren T.* Barium and europium abundances in cool dwarf stars and nucleosynthesis of heavy elements // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**364**, N 1.—P. 249—264.
 33. *McClure R. D.* The binary nature of the barium stars. II. Velocities, binary frequency, and preliminary orbits // *Astrophys. J.*—1983.—**268**, N 1.—P. 264—273.
 34. *McClure R. D., Fletcher J. M., Nemeč J. M.* The binary nature of the barium stars // *Astrophys. J.*—1980.—**238**, N 1.—P. L35—L38.
 35. *Mishenina T. V., Soubiran C., Kovtyukh V.* On the correlation of elemental abundances with kinematics among galactic disk stars // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**418**, N 2.—P. 551—562
 36. *Sackmann I.-J., Boothroyd A. I.* On Low Mass AGB Stars // *Evolution of Stars: The Photospheric Abundance Connection / Eds G. Michaud, A. Tutukov.* — Dordrecht: Kluwer, 1991.—P. 275.—(IAU Symp. 145).
 37. *Scalo J. M.* A composite Hertzsprung—Russell diagram for the peculiar red giants // *Astrophys. J.*—1976.—**206**, N 2.—P. 474—489.
 38. *Soubiran C., Katz D., Cayrel R.* On-line determination of stellar atmospheric parameters T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ from ELODIE echelle spectra. II. The library of F5 to K7 stars // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1998.—**133**, N 2.—P. 221—226.
 39. *Taylor B. J.* Catalog of temperatures and $[\text{Fe}/\text{H}]$ averager for evolved G and K stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1999.—**134**, N 3.—P. 523—524.
 40. *The Hipparcos and Tycho Catalogues.* — ESA., 1997.
 41. *Tsymbal V. V.* Model Atmospheres and Spectrum Synthesis // *ASP Conf. Ser.* —1996.—**108**.—P. 198.

Поступила в редакцию 19.02.04