

УДК 524.31

Т. В. Мишенина¹, Т. И. Горбанева¹, Л. Э. Канцен¹, К. Субиран²¹Астрономическая обсерватория Одесского национального университета
65014, Одесса, парк Шевченко²Обсерватория Бордо
BP21, F-33270 Флуарак, Франция

Анализ спектров восьми субгигантов

Определены параметры атмосфер, массы и содержание 29 элементов в атмосферах восьми субгигантов, среди которых четыре кандидата в сверхметаллические (SMR) звезды. Спектры исследуемых звезд получены на 1.93-м телескопе Обсерватории Верхнего Прованса (Франция), оснащенном эшелле-спектрометром ELODIE. Проведены анализ и сравнение распространенности элементов в атмосферах SMR-звезд и звезд диска Галактики. Изменение содержания лития и углерода в исследуемых звездах наблюдается при продвижении звезды вдоль ветви субгигантов. Распространенность остальных элементов в атмосферах SMR-звезд в целом согласуется с таковой для звезд тонкого диска и заметно отличается от звезд толстого диска. Исследованные нами SMR-звезды, вероятно, являются звездами тонкого диска, и значения их металличности могут рассматриваться как верхний предел металличности диска. Для исследуемой выборки звезд обогащение элементами межзвездной среды при металличностях $[Fe/H] > 0$ может отличаться от обогащения ее при $[Fe/H] \sim 0$. Оно характеризуется относительно солнечного дефицитом кислорода, избытком натрия, небольшим избытком никеля и кобальта и пониженным содержанием элементов, образующихся в процессах нейтронного захвата.

АНАЛІЗ СПЕКТРІВ ВОСЬМИ СУБГІГАНТІВ, Мішеніна Т. В., Горбаньова Т. І., Канцен Л. Е., Субіран К. — Визначено параметри атмосфери, маси і вміст 29 елементів в атмосферах восьми субгігантів, серед яких чотири кандидати в надметалеві (SMR) зірки. Спектри досліджуваних зірок отримані на 1.93-м телескопі Обсерваторії Верхнього Провансу (Франція), оснащеному ешелле-спектрометром ELODIE. Проведено аналіз і порівняння поширеності елементів в атмосферах SMR-зірок і зірок диску Галактики. Зміна вмісту літію і вуглецю в досліджуваних зірках спостерігається при просуванні зірки уздовж гілки субгігантів. Поширення інших елементів в атмосферах SMR-зірок у цілому узгоджується з поведінкою елементів у зірках тонкого диску і помітно відрізняється від поведінки елементів у зірках товстого диска. Досліджені нами SMR-зірки, ймовірно, є зірками тонкого диску, і значення їхньої металічності можуть розглядатися як верхня межа металічності диска. Для досліджуваної вибірки зірок збагачення міжзоряного середовища на металічностях $[Fe/H] > 0$ може відрізнятися від збагачення на $[Fe/H] \sim 0$. Воно

характеризується відносно сонячного дефіцитом кисню, надлишком натрію, невеликим надлишком нікелю та кобальту і зниженим вмістом елементів, що утворюються в процесах нейтронного захвату.

ANALYSIS OF EIGHT SUBGIANT SPECTRA, by Mishenina T. V., Gorbaneva T. N., Kantsen L. E., Subiran C. — The atmospheric parameters, masses and abundances of 29 elements in 8 subgiants (among them 4 candidates in SMR stars) were determined. The spectra of the stars were obtained at the 1.93-m telescope of the Haute Provence observatory (France) equipped with the echelle-spectrometer ELODIE. The run of abundances with metallicity in SMR and disk stars was analyzed. The lithium and carbon abundances undergo a change along the subgiant branch. The behaviour of other elements in SMR stars follows that in the thin disk stars, and it differs appreciably from that in thick disk stars. The investigated SMR stars are probably stars of the thin disk, and their $[Fe/H]$ values can be accepted as the upper metallicity limit for disk stars. Judging by our sample of stars, the picture of the enrichment of interstellar medium at metallicities $[Fe/H] > 0$ may differ from that at $[Fe/H] \sim 0$. It is characterized, relative to the solar abundances, by a deficit of oxygen, Na overabundance, a slight overabundance of Ni and Co, and a lower abundance of neutron capture elements.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к детальному исследованию химического состава субгигантов вызван наличием среди них звезд повышенной металличности (SMR). Изучение таких объектов важно как с точки зрения понимания природы богатых тяжелыми элементами звездных населений (например, звезд балджа или гигантов эллиптических галактик), так и их возможной связью со звездами, обладающими планетными системами [14]. Понятие SMR-звезд было введено Спинрадом и Тейлором [32] для звезд, показывающих избыточное содержание металлов по сравнению с солнечным ($[Fe/H] > 0.2$ dex). Позже Тейлором [34, 35] были проанализированы опубликованные значения $[Fe/H]$ большого числа звезд, и статус SMR был подтвержден только для семи карликов и субгигантов. В работе [23] рассмотрена выборка из 91 яркой звезды из окрестностей Солнца и найдено, что 73 звезды из них соответствуют критерию Тейлора [35] $[Fe/H] \geq 0.2$ dex. Ранее нами были исследованы как кандидаты в SMR три звезды, отмеченные Тейлором [35]: HD 182572, HD 121370 и HD 218640. Все они согласно [5, 25] показали избытки металличности. Для объяснения феномена SMR-звезд привлекались различные гипотезы: от слипания двух звезд до наличия аномальной микротурбулентности в атмосферах [25], однако ни одна из них не была принята окончательно. На наш взгляд, обнаруживаемые аномалии химического состава характеризуют скорее межзвездную среду, из которой образовались звезды, а не особенности строения их атмосфер и пр. В связи с этим представляется интересным провести анализ распространенности элементов в атмосферах таких звезд и сравнить поведение элементов в SMR-звездах и звездах диска.

Стандартная теория звездной эволюции [18] предсказывает изменение содержания лития, углерода и азота в процессах горения лития и водорода соответственно в ядре звезды, находящейся на стадии главной последовательности (ГП), и последующий вынос переработанного вещества в верхние спектроскопически детектируемые слои атмосферы. Это приводит к изменению поверхностного содержания этих элементов у звезд-гигантов. Содержание лития заметно уменьшается, содержание азота увеличивается до 0.6 dex, содержание углерода уменьшается до $-0.1...-0.2$ dex. Анализ

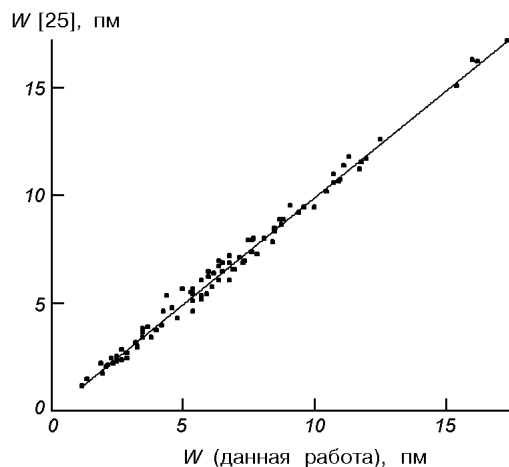


Рис. 1. Сравнение эквивалентных ширин линий W , измеренных в данной работе, с полученными в работе [25]

поведения этих элементов в атмосферах субгигантов важен как с точки зрения отсева элементов, содержание которых изменяется в процессе эволюции звезды и не отражает общей картины обогащения дозвездной среды, так и с точки зрения детализации теории эволюции звезд, находящихся в промежуточной и относительно кратковременной (между ГП и ВКГ) стадии эволюции.

Целью данной работы является детальный спектроскопический анализ восьми субгигантов — обнаружение возможных проявлений выноса вещества в поверхностные слои атмосферы и сравнительный анализ химического состава четырех субгигантов, являющихся кандидатами в SMR-звезды: HD 182572, HD 196755 из списка [35] и HD 150680, HD 161797 из списка [23], с другими субгигантами диска.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Спектры исследуемых звезд получены на 1.93 м телескопе Обсерватории Верхнего Прованса (Франция), оснащенного эшелле-спектрометром ELODIE [31]. Разрешающая способность спектрометра 42000, участок длин волн λ 440—680 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 [19]. Дальнейшая обработка спектров (проведение уровня непрерывного спектра, измерение эквивалентных ширин линий и т. д.) была выполнена нами при помощи пакета программ DECH20 [1]. Эквивалентные ширины W_λ измерены методом аппроксимации наблюдаемых профилей спектральных линий гауссианами. Мы провели сравнение значений W_λ для линий нейтрального железа, измеренных в спектре звезды HD 182572 в данной работе и в работе [25]. Как видно из рис. 1, согласие между двумя системами W_λ хорошее.

ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕР

Основные характеристики исследуемых звезд приведены в табл. 1. Спектральные классы S_p , звездные величины V и показатели цвета $B-V$ взяты из базы данных SIMBAD, параллаксы π — из наблюдений спутника HIPPARCOS [37]. Боллометрические звездные величины $M_{\text{бол}}$ вычислены с использованием поправок из работы [15]. Оценки массы звезд M выполне-

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых звезд

HD	Sp	V	B-V	π , 0.001"	$M_{\text{бол}}$	u, км/с	v, км/с	w, км/с	M
150680	F9IV	2.81	0.64	92.63	2.56	51.9	-46.8	-22.7	1.4
161797	G5IV	3.42	0.75	119.05	3.68	-15.7	-32.1	-6.2	1.1
182572	G8IVvar	5.17	0.76	66.01	4.19	116.6	-31.0	-19.2	1.0
188512	G8IVvar	3.71	0.86	72.95	2.79	10.9	-48.8	-9.7	1.4
191026	K0IV	5.38	0.85	41.34	3.23	-44.4	-47.9	-7.1	1.2
196755	G5IV+	5.07	0.70	33.27	2.59	58.4	-35.8	-17.4	1.4
198149	K0IV	3.41	0.91	69.73	2.39	34.2	-97.6	11.0	1.5
216385	F7IV	5.16	0.47	37.25	2.96	58.4	-7.0	-33.6	1.4

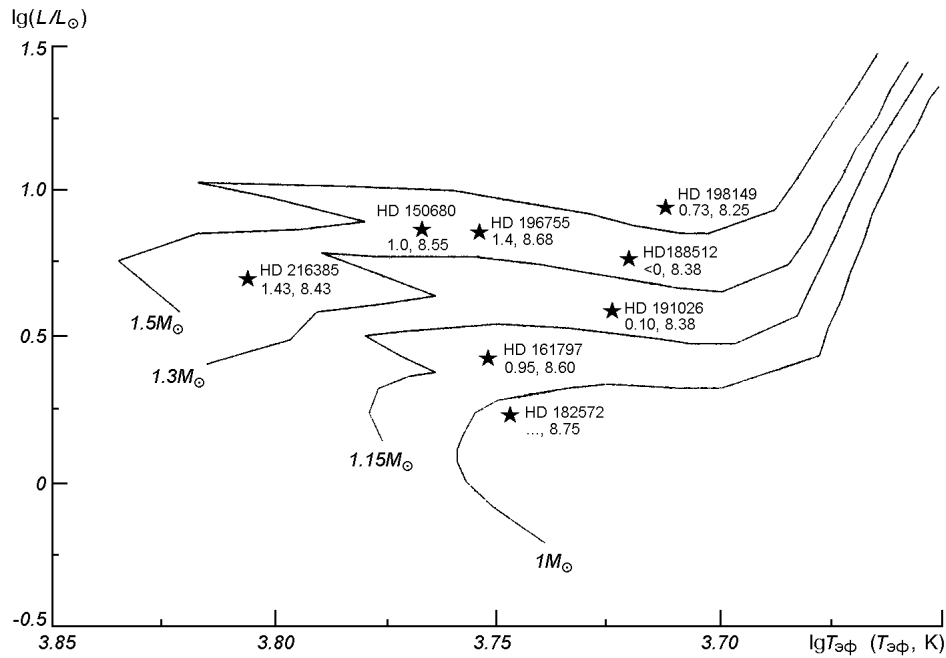


Рис. 2. Положение исследуемых звезд на диаграмме Г—Р. Для каждой звезды указаны содержания лития и углерода в шкале $\text{lg}A(\text{H}) = 12$

ны по эволюционным трекам (рис. 2), учитывающим перемешивание и истечение вещества [22]. Их значения в единицах массы Солнца M_{\odot} приведено в табл. 1. В табл. 1 даны также компоненты пространственной скорости u , v , w в км/с из работы [31].

Использование прямых методов определения эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ возможно лишь для ограниченного числа звезд, поскольку требует знания их радиусов и расстояний. Фотометрические и спектральные методы непрямы и отягощены рядом дополнительных ошибок. Фотометрические методы опираются на теоретические или эмпирические спектральные калибровки и требуют учета межзвездного покраснения, спектральные требуют надежных постоянных затухания и учета возможного влияния отклонений от локального термодинамического равновесия (не-ЛТР). Поэтому для определения $T_{\text{эф}}$ мы использовали следующую итеративную процедуру. В качестве первого приближения $T_{\text{эф}}$ использовались данные, приведенные в работе [31]. Они основаны на статистическом методе, использующем

Таблица 2. Параметры атмосфер исследуемых звезд

HD	$T_{\text{эф}}$, К	$\lg g$	[Fe/H]	V_t , км/с	Литературный источник
150680	5850	3.85	0.01	1.65	Данная работа [31]
	5672	3.74	0.01		
	6010	3.86	-0.30	0.9	[21]
	5717	3.8	0.05		
161797	5740	3.70	-0.07	1.3	[24]
	5650	4.03	0.25		
	5527	4.1	0.30	Данная работа [28]	
	5411	3.87	0.16		
	5400	4.0	0.20		
182572	5386	3.7	0.04	2.6	[24]
	5538	3.91	0.16		
	5580	4.14	0.33	1.0	Данная работа [36]
	5612				
	5400	4.00	0.35		
	5600	4.2	0.32		
188512	5663	4.26	0.50	1.2	[25]
	5570	4.19	0.31		
	5250	3.64	-0.18	1.35	Данная работа [31]
	5041	3.04	-0.04		
191026	5097	3.5	-0.27	1.4	Данная работа [30]
	5300	3.78	-0.05		
196755	5050	3.49	-0.10	1.4	Данная работа [31]
	5680	3.70	0.01		
198149	5611	3.65	-0.02	1.5	Данная работа [31]
	5510	3.6	-0.09		
	5700	4.0	0.02	1.2	[30]
	5150	3.44	-0.06		
	5013	3.19	-0.19		
216385	5024			1.4	Данная работа [36]
	6400	4.07	-0.12		
	6288	3.97	-0.25	[13]	
	6179	3.98	-0.35		
	6250	4.0	-0.20	[31]	

большое число линий в спектре и калибровки эффективной температуры $T_{\text{эф}}$, полученные по литературным источникам. Затем $T_{\text{эф}}$ была уточнена путем достижения независимости содержания железа, определенного по данной линии, от энергии ее нижнего уровня. Для контроля выбора $T_{\text{эф}}$ были рассчитаны теоретические профили линии $\text{H}\alpha$ по программе STARSF [39], и результаты сравнены с наблюдаемыми; для всех исследуемых звезд получено хорошее согласие.

Ускорение свободного падения $\lg g$ определено по стандартной формуле

$$\lg g = 4 \lg T_{\text{эф}} + 0.4 M_{\text{бол}} + \lg(M/M_{\odot}) - 12.5,$$

где для Солнца приняты параметры $T_{\text{эф}} = 5770$ К и $\lg g = 4.40$.

Микротурбулентная скорость V_t определена путем достижения независимости содержания, определенного по данной линии от ее эквивалентной ширины.

Внутренняя погрешность определения параметров: для эффективных температур $\Delta T_{\text{эф}} = \pm 100$ К, ускорений свободного падения $\Delta \lg g = \pm 0.3$ dex, турбулентной скорости $\Delta V_t = \pm 0.2$ км/с.

Наши оценки параметров атмосфер в пределах ошибок определения совпадают с другими оценками (табл. 2). Имеющиеся расхождения объясняются прежде всего различием методов определения параметров.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Определение химического состава выполнено в приближении ЛТР, с использованием сетки моделей атмосфер Куруца [20]. Выбор модели осуществлялся стандартной интерполяцией моделей по $T_{\text{эф}}$ и по lgg . При этом модель по металличности выбиралась с точностью до 0.05 dex, поскольку сетка моделей [20] содержит модели, рассчитанные с шагом 0.1 dex.

Содержание лития определено методом синтетического спектра по программе STARSP [39]. Список линий в области линии ${}^7\text{Li } \lambda 670.7$ нм включает атомные и молекулярные линии [6]. Содержание углерода получено из расчетов атомных линий углерода C I $\lambda\lambda 505.2, 538.0, 658.7$ нм и молекулярных спектров в областях кантов молекулярных полос C₂ $\lambda 563.5$ нм, списки линий взяты из работы [6]. Расчет проводился с потенциалом диссоциации $D_0(\text{C}_2) = 6.15$ эВ. Так как в холодной плазме, где возможно образование молекул, изменение содержания одного из элементов группы C, N или O может повлечь изменение интенсивности линий поглощения других элементов, определение содержания C и O выполнено с учетом их взаимозависимости. Слабые линии [O I] $\lambda\lambda 630.0, 636.3$ нм и O I $\lambda\lambda 615.6, 615.8$ нм использовались нами для определения содержания кислорода. Методом синтетического спектра оценено также содержание меди с учетом сверхтонкой структуры [33].

Определение содержания остальных элементов выполнено по наблюдательным эквивалентным ширинам линий с использованием солнечных сил осцилляторов lggf [2], по программе Куруца WIDTH-9. Используемые нами

Таблица 3. Содержание элементов в атмосферах исследуемых звезд

Элемент	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n
	HD 150680			HD 161797			HD 182572		
C I	-0.13	0.13	2	0.15	0.05	3	0.31	0.18	2
O I	0.05	0.03	2	0.10	0.16	3	0.32	0.04	3
Na I	0.12	0.09	3	0.40	0.06	3	0.52	0.04	3
Mg I	-0.09	0.04	2	0.25	0.00	1	0.33	0.09	2
Al I	0.06	0.00	2	0.23	0.00	1	0.38	0.12	2
Si I	0.07	0.10	20	0.27	0.07	15	0.41	0.06	15
Ca I	0.06	0.14	7	0.28	0.13	12	0.41	0.16	8
Sc II	0.15	0.10	8	0.45	0.18	8	0.52	0.14	8
Ti I	-0.04	0.12	48	0.24	0.12	58	0.34	0.15	72
Ti II	0.01	0.08	13	0.18	0.12	11	0.46	0.16	16
V I	0.06	0.06	17	0.31	0.13	22	0.37	0.17	31
Cr I	0.09	0.14	36	0.31	0.11	26	0.44	0.15	71
Mn I	0.23	0.11	14	0.48	0.19	10	0.59	0.18	12
Fe I	0.01	0.09	127	0.25	0.08	132	0.33	0.08	156
Fe II	0.09	0.12	23	0.27	0.17	24	0.34	0.11	20
Co I	0.13	0.15	16	0.31	0.12	19	0.45	0.14	24
Ni I	0.05	0.09	67	0.34	0.13	70	0.46	0.13	81
Cu I	-0.06	0.05	3	0.10	0.05	3	0.20	0.05	3
Zn I	0.09	0.21	3	0.35	0.15	2	0.28	0.30	2
Sr I	0.07	0.00	1	0.02	0.00	1	0.34	0.00	1
Y I	0.06	0.00	1	0.25	0.00	1	0.45	0.00	1
Y II	0.08	0.13	7	0.24	0.19	6	0.30	0.23	4
Zr I	0.20	0.00	1				0.35	0.25	4
Ba II	0.12	0.07	2	0.22	0.08	3	0.40	0.07	3
La II	0.09	0.00	1	0.19	0.10	2	0.32	0.06	3
Ce II	0.00	0.21	4	0.32	0.14	4	0.40	0.20	6
Pr II				0.27	0.00	1	0.36	0.00	1
Nd II	0.11	0.20	4	0.40	0.13	3	0.42	0.24	4
Sm II	0.03	0.00	1	0.17	0.00	1	0.34	0.00	1
Eu II	0.26	0.00	1						

Элемент	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n	[A/H]	σ	n
	HD 188512			HD 191026			HD 196755		
C I	-0.22	0.00	1	-0.06	0.06	2	0.03	0.06	2
O I	-0.10	0.19	2	0.01	0.15	2	0.06	0.00	1
Na I	-0.10	0.06	3	0.10	0.09	3	0.01	0.10	3
Mg I	-0.09	0.03	2	-0.08	0.02	2	-0.14	0.11	2
Al I	-0.04	0.10	2	0.17	0.04	2	0.15	0.06	2
Si I	-0.16	0.09	18	0.01	0.09	18	0.06	0.12	20
Ca I	-0.05	0.11	6	0.08	0.10	6	0.00	0.11	6
Sc II	-0.13	0.08	7	0.04	0.13	10	0.11	0.13	9
Ti I	-0.13	0.10	67	0.07	0.13	64	-0.01	0.11	52
Ti II	-0.10	0.10	14	0.02	0.19	12	0.02	0.12	14
V I	-0.06	0.12	29	0.18	0.13	27	0.10	0.09	19
Cr I	-0.04	0.14	54	-0.05	0.10	50	0.13	0.14	45
Mn I	-0.18	0.16	11	0.17	0.23	17	0.14	0.19	16
Fe I	-0.18	0.09	140	-0.05	0.08	130	0.01	0.09	112
Fe II	-0.15	0.15	21	-0.04	0.17	23	0.05	0.10	18
Co I	-0.12	0.17	21	0.08	0.10	20	-0.02	0.11	21
Ni I	-0.17	0.09	69	-0.04	0.11	67	0.04	0.10	70
Cu I	-0.20	0.05	3	-0.10	0.05	3	-0.10	0.05	3
Zn I	0.04	0.37	3	0.23	0.19	2	0.06	0.15	2
Sr I	-0.35	0.00	1	-0.05	0.00	1	-0.13	0.00	1
Y I	-0.04	0.00	1	0.15	0.00	1	0.11	0.00	1
Y II	-0.02	0.23	8	-0.08	0.22	6	0.09	0.13	8
Zr I	0.02	0.06	2	0.16	0.17	3	0.15	0.00	1
Ba II	-0.06	0.02	2	-0.11	0.05	2	0.14	0.01	2
La II	0.06	0.09	2	0.17	0.00	1	0.10	0.00	1
Ce II	0.08	0.22	5	0.09	0.27	4	0.09	0.14	5
Pr II				0.05	0.00	1	0.13	0.04	3
Nd II	0.15	0.19	4	0.23	0.10	3	0.30	0.19	3
Sm II	-0.01	0.00	1	0.19	0.00	1	0.02	0.00	1
Eu II	0.00	0.00	1	0.15	0.00	1	0.27	0.00	1
	HD 198149			HD 216385					
C I	-0.22	0.12	3	-0.18	0.01	2			
O I	-0.02	0.14	2	-0.15	0.16	3			
Na I	0.01	0.06	2	-0.15	0.05	3			
Mg I	-0.03	0.10	2	-0.18	0.00	1			
Al I	0.07	0.00	1	-0.09	0.06	2			
Si I	0.00	0.09	19	-0.13	0.08	15			
Ca I	-0.01	0.15	7	-0.09	0.16	7			
Sc II	0.12	0.13	7	-0.05	0.11	8			
Ti I	0.04	0.11	59	-0.10	0.11	29			
Ti II	-0.01	0.14	13	-0.03	0.07	14			
V I	0.15	0.23	31	0.03	0.16	6			
Cr I	-0.01	0.14	40	0.02	0.13	27			
Mn I	0.04	0.18	14	-0.20	0.11	12			
Fe I	-0.06	0.09	136	-0.12	0.10	86			
Fe II	-0.06	0.17	23	-0.09	0.12	18			
Co I	-0.07	0.14	21	-0.05	0.14	14			
Ni I	-0.01	0.15	76	-0.10	0.11	48			
Cu I	-0.05	0.05	3	-0.25	0.05	3			
Zn I	0.04	0.08	2	-0.15	0.10	3			
Sr I	-0.13	0.00	1	-0.04	0.00	1			
Y I	0.03	0.00	1						
Y II	-0.01	0.18	4	0.05	0.22	8			
Zr I	-0.07	0.01	2						
Ba II	-0.04	0.03	3	0.03	0.25	3			
La II	0.07	0.11	2	0.06	0.03	2			
Ce II	0.06	0.17	6	0.06	0.18	5			
Pr II	0.08	0.00	1						
Nd II	0.13	0.08	4	0.15	0.08	2			
Sm II	0.06	0.00	1	-0.06	0.00	1			
Eu II	0.15	0.00	1	0.06	0.00	1			

Таблица 4. Содержание лития и углерода в атмосферах исследуемых звезд

HD	$T_{\text{эф}}$, К	$\lg A(\text{Li})$	$\lg A(\text{C I})$	$\lg A(\text{C}_2)$	Литературный источник
150680	5850	1.0 < 1.0 < 1.05	8.52	8.55	Данная работа [21] [24]
161797	5650	0.95 1.1 1.13	8.80	8.60	Данная работа [21] [24]
182572	5580	—	8.96	8.75	Данная работа
188512	5250	< 0 < 0.09	8.43	8.38	Данная работа [30]
191026	5300	0.10	8.59	8.38	Данная работа
196755	5680	1.4 1.42	8.68	8.48	Данная работа [30]
198149	5150	0.73	8.43	8.25	Данная работа
216385	6400	1.43 1.22	8.43	—	Данная работа [30]

$\lg gf$ [2] учитывают сверхтонкую структуру линий поглощения тяжелых элементов. Для линии $\text{Mg I } \lambda 571.1$ нм были приняты солнечные $\lg gf$ из работы [7].

В табл. 3 приведены полученные нами содержания элементов относительно содержания в атмосфере Солнца $[\text{E}/\text{H}]$, ошибка индивидуального определения σ и количество линий данного элемента n , использованных в анализе. В табл. 4 даны содержания лития и углерода в шкале $\lg A(\text{H}) = 12$, при этом $\lg A(\text{C I})$ — содержание углерода, определенное по линиям C I , а $\lg A(\text{C}_2)$ — содержание углерода, определенное по линиям молекулы C_2 . Как видно из табл. 4, содержание углерода, полученное по молекулярному спектру, ниже в среднем на 0.15 dex содержания, полученного по атомным линиям. Это может быть связано с наличием отклонений от ЛТР в случае образования атомных линий. Для дальнейшего анализа мы использовали значения содержания углерода, полученные по молекулярному спектру, за исключением звезды HD 216385, у которой из-за высокой температуры отсутствует молекулярная полоса $\text{C}_2 \lambda 563.5$ нм, и определение содержания C было выполнено по эквивалентным ширинам атомных линий углерода.

ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Основные причины возникновения ошибок при определении химического состава следующие: 1) конкретный выбор параметров атмосфер, 2) неопределенность сил осцилляторов, 3) отклонения от ЛТР. В табл. 5 приведена оценка неопределенности содержаний элементов, возникающая вследствие неопределенностей параметров атмосферы, звезды HD 182572. Видно, что в случае использования линий нейтральных атомов ошибка в среднем равна 0.10 dex. Для линий Al , Mn , Zn ошибка достигает значения 0.30 dex, для линий Si I она минимальна и равна 0.02 dex. Линии ионизованных атомов более чувствительны к неопределенностям ускорения свободного падения, и ошибка достигает значений 0.13 dex. Линии, находящиеся на кривой роста в области насыщения, подвержены сильному влиянию микротурбулентной скорости, и в этом случае максимальная ошибка обусловлена выбором V_t . Суммарная ошибка вследствие неопределенностей в выборе параметров в среднем равна 0.07—0.13 dex, и отдельных случаях достигает значения 0.30 dex.

Таблица 5. Влияние неопределенностей в определении параметров на точность определения содержания элементов

Элемент	$\Delta T_{\text{эф}}$	$\Delta \lg g$	ΔV_t	Δ_{tot}
C I	-0.07	0.05	-0.01	0.09
Na I	0.06	-0.03	-0.03	0.07
Mg I	0.05	-0.07	-0.04	0.09
Al I	-0.14	-0.21	-0.03	0.25
Si I	0.01	-0.01	-0.01	0.02
Si II	-0.11	0.03	-0.01	0.11
Ca I	0.08	-0.03	-0.05	0.10
Sc I	0.10	0.01	-0.01	0.10
Sc II	0.00	0.10	-0.02	0.10
Ti I	0.10	-0.02	-0.05	0.11
Ti II	0.02	0.09	-0.06	0.11
V I	0.11	0.01	-0.02	0.11
Cr I	0.08	-0.02	-0.04	0.09
Cr II	-0.03	0.09	-0.06	0.11
Mn I	0.08	-0.05	-0.16	0.19
Fe I	0.06	-0.02	-0.05	0.08
Fe II	-0.04	0.11	-0.05	0.13
Co I	0.05	0.04	-0.02	0.07
Ni I	0.04	0.00	-0.06	0.07
Cu I	0.06	-0.03	-0.07	0.10
Zn I	0.00	-0.29	-0.08	0.30
Sr I	0.12	-0.03	-0.13	0.18
Y I	0.11	0.00	-0.05	0.12
Y II	0.00	-0.02	-0.08	0.08
Zr I	0.11	0.01	-0.03	0.11
Zr II	0.00	0.12	0.00	0.12
Ru	0.11	0.02	-0.03	0.12
Ba II	0.03	0.02	-0.09	0.10
La II	0.02	0.12	-0.01	0.12
Ce II	0.01	0.07	-0.05	0.09
Pr II	0.01	0.12	-0.01	0.12
Nd II	0.01	0.12	-0.02	0.12
Sm II	0.02	0.09	-0.09	0.13
Eu II	0.01	0.01	-0.13	0.13

Ранее нами на примере Солнца и SMR-звезды HD 182572 (31 Aql) было проанализировано влияние выбора систем сил осцилляторов на определение металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ [26]. Было найдено, что различие содержания железа, определенного с использованием рассмотренных систем сил осцилляторов, не превышает 0.11 dex для Солнца и 0.10 dex для HD 182572 в случае использования линий Fe I и заметно увеличивается в случае использования линий Fe II –0.32 dex для Солнца и 0.33 dex для звезды HD 182572. Это говорит, в частности, об источниках различий содержаний при использовании различных систем сил осцилляторов и о важности использования единообразного подхода в исследовании химического состава звезд и сравнительного анализа.

Что же касается оценок отклонений от ЛТР в данном диапазоне температур и металличностей для выборки используемых линий, расчеты показали, что не-ЛТР-поправки в основном не превышают 0.1 dex. Так, для линий Fe I в спектре Солнца эта поправка порядка 0.1 dex [8], а для линий Na I и Mg I (в частности, для линии λ 571.1 нм) — менее 0.1 [3, 7]. Для линий Al I эти поправки составляют около 0.15 [9]. В целом не-ЛТР-поправки ниже суммарной ошибки, обусловленной неопределенностями выбора параметров. Ошибки, возникающие вследствие структурных различий в моделях атмосфер и использования одномерных моделей практически сводятся к нулю при использовании единой сетки моделей и сравнительного анализа близких по параметрам звезд.

Таким образом, значения $[Fe/H] \geq 0.2$ dex превышают ошибки определения и являются значимыми.

Отметим некоторые особенности звезд нашего списка.

HD 150680. Визуально-двойная система ζ Her, по ее имени названа движущаяся группа звезд. Оценка массы ζ Her A равна $1.45 M_{\odot}$ в работе [27] очень близка к нашей оценке ($1.4 M_{\odot}$). Там же указано, что ζ Her A также может быть двойной.

HD 182572. Двойная система с заподозренной двойственностью главного компонента.

HD 188512. Заподозренная в переменности звезда, не отнесенная ни к какому типу.

HD 191026. Переменная звезда типа RS CVn. Используемые нами методы определения параметров не зависят от переменности звезды, и переменность звезд не вносит дополнительной ошибки в полученные нами результаты по определению параметров и химического состава звезд, однако двойственность звезд может привести к завышению содержания на фактор 2 [4].

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сначала остановимся на рассмотрении элементов, содержание которых может изменяться в процессе эволюции звезды, а затем проведем исследование различий поведения элементов у SMR-звезд и у субгигантов, звезд тонкого и толстого дисков. В работе [14] звезда HD 182572 с некоторой долей вероятности отнесена к населению толстого диска Галактики.

Литий и углерод. Содержание лития характеризует физические и ядерные процессы, происходящие в звездах. Помимо этого, литий — ключевой элемент в тестировании космологических теорий. Литий разрушается при довольно низких температурах, и степень его истощения зависит от массы звезды, ее возраста и металличности, а также от эффективности физических процессов, таких как вращение, конвекция, звездный ветер и др. В частности, в работах последних лет по исследованию истощения лития на ветви субгигантов показана зависимость содержания лития от массы звезды, но при этом у субгигантов, как и у карликов и гигантов, наблюдается заметный разброс лития [24, 30]. Исследование вращения звезд на ветви субгигантов показало, что звезды низких масс покидают ГП с низкой скоростью вращения. В тоже время массивные звезды показывают замедление вращения, когда достигают ветви гигантов, и при этом не наблюдается заметной корреляции между скоростью вращения и содержанием лития [21, 12]. Одиночные и двойные звезды показывают аналогичные зависимости изменения содержания лития с $T_{\text{эф}}$.

Содержание углерода изменяется в процессе горения водорода в CNO цикле при более высоких температурах, степень его истощения заметно ниже, чем лития.

На рис. 2 нанесены звездочками местоположения звезд в координатах эффективная температура—светимость ($\lg T_{\text{эф}} - \lg L/L_{\odot}$), рядом обозначен номер звезды и значения содержания лития и углерода. Рассматриваемые нами субгиганты демонстрируют разброс содержания лития. В среднем литий уменьшается при прохождении ветви субгигантов, однако нет четкой зависимости между содержанием лития и местоположением звезды на диаграмме Г—Р. Возможно, сказывается дисперсия масс и металличностей. Однако при внимательном рассмотрении рис. 2 мы обнаруживаем, что в нашем случае именно звезды с признаками переменности показывают заметное истощение лития независимо от положения на ветви субгигантов.

Если отбросить эти звезды, то можно проследить изменение содержания лития вдоль ветви субгигантов, что хорошо согласуется с предсказаниями стандартной теории эволюции [18].

Разброс содержания углерода от звезды к звезде заметно меньше, чем для лития. Содержание углерода уменьшается с продвижением по ветви субгигантов. Так как содержания лития и углерода подвержены изменению на ветви субгигантов в процессе собственной эволюции, в дальнейшем анализе мы их рассматривать не будем.

ДЕТАЛЬНЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И SMR-ЗВЕЗДЫ

Из рассмотренных нами четырех кандидатов в SMR-звезды только HD 161797 и HD 182572 показали избыток металличности выше 0.2 dex, соответствующий критерию Тейлора. Они могут быть отнесены к классу SMR-звезд. Обе звезды имеют массу порядка солнечной, близки по возрасту, но заметно отличаются по u -компоненту пространственной скорости. Две другие звезды, HD 150680 и HD 196755, имеют солнечную металличность. Как видно из табл. 2, полученные нами значения $[Fe/H]$ для этих звезд хорошо согласуются с результатами определений $[Fe/H]$ последних лет [14, 24].

Различаются ли кривые распространенности элементов в атмосферах SMR-звезд и у обычных субгигантов диска, исследованных в данной работе? Для сравнения мы использовали усредненные значения по всем элементам для шести субгигантов диска и четырех SMR-звезд. В последнюю группу, помимо HD 161797 и HD 182572, мы включили ранее исследованные нами субгиганты HD 121370 и HD 218640 [5] из списка Тейлора, подтвердившие избыток металличности. На рис. 3 сплошная линия обозначает данные для звезд толстого диска [29], штриховая — полученные нами для субгигантов и пунктирная — для SMR-звезд. Как видно из рис. 3, SMR-звезды отличаются от рассмотренных субгигантов диска повышенным содержанием натрия и более низким содержанием элементов, образующихся в процессах нейтронного захвата. При сравнении данных для SMR-звезд с усредненным значением содержания элементов в атмосферах звезд толстого диска [29] мы наблюдаем заметное расхождение кривых распространенности элемен-

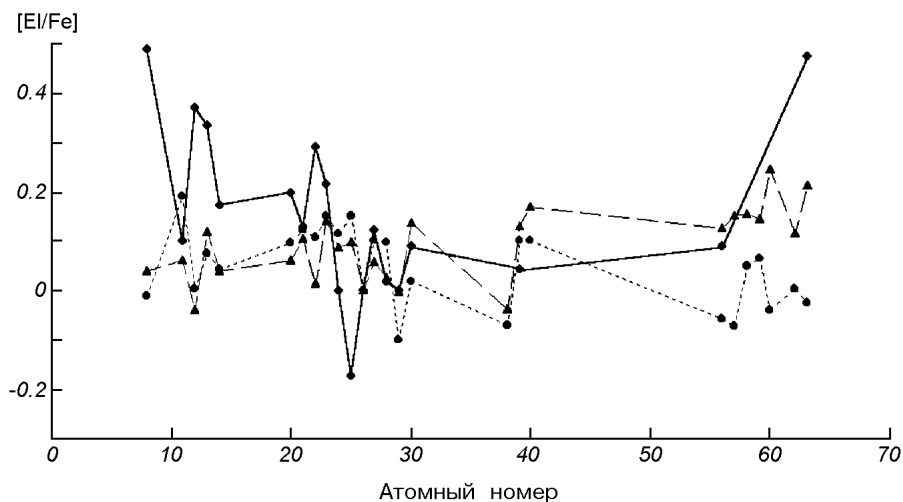


Рис. 3. Распространенность элементов в атмосферах следующих групп звезд: SMR звезды (пунктирная линия), звезды толстого диска (сплошная линия) и тонкого диска [30] (штриховая линия)

тов у звезд толстого диска и исследованных нами SMR-звезд. Таким образом, кривые распространенности не подтверждают общности обогащения дозвездной среды для звезд толстого диска и SMR-звезд. По кинематическим характеристикам только звезда HD 182572 отличается по u -компоненту пространственной скорости, но ее кривая распространенности аналогична кривым других исследованных нами SMR-звезд. Оценка возраста этой звезды — $5 \cdot 10^9$ лет [10] не противоречит возрасту звезд тонкого диска.

Рассмотрим поведение содержания элементов с увеличением $[Fe/H]$ для рассматриваемых звезд (рис. 4).

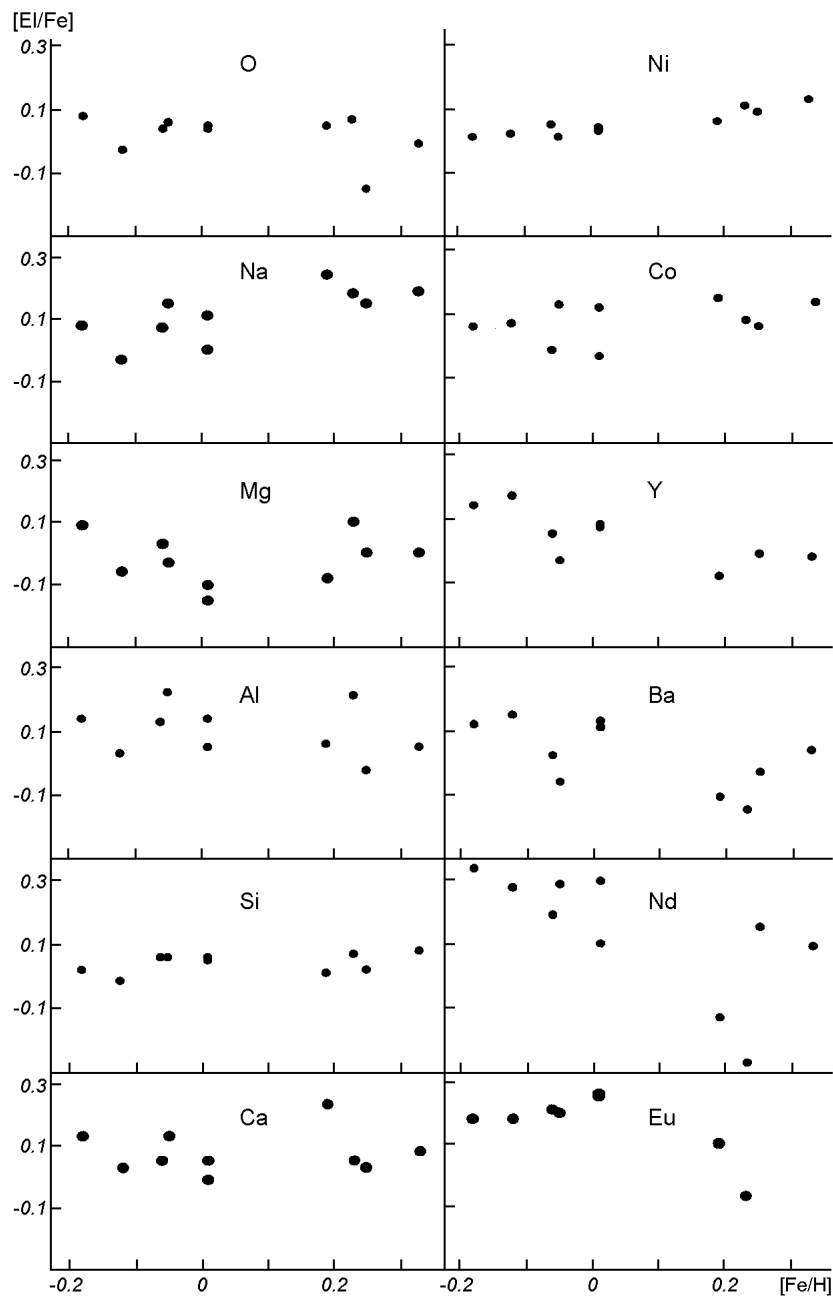


Рис. 4. Ход относительного содержания элемента $[E/Fe]$ с увеличением металличности $[Fe/H]$

Кислород. $[O/Fe]$ показывает небольшой тренд с увеличением металличности. Для звезд диска наблюдается уменьшение $[O/Fe]$ с увеличением $[Fe/H]$ [11], [13], и это является свидетельством увеличения отношения менее массивных сверхновых SN I к более массивным SN II (основных поставщиков кислорода в межзвездную среду) на поздних стадиях эволюции диска.

Натрий. Наблюдается заметный тренд $[Na/Fe]$ с увеличением металличности, что хорошо согласуется с данными для SMR-звезд [14]. Однако такое поведение $[Na/Fe]$ отличается от звезд толстого диска [29] и диска [11]: для них содержание натрия близко к солнечному и не показывает сколько-нибудь заметного тренда. Возможным источником натрия на поздних стадиях эволюции диска могут быть звезды умеренных масс, обогатившие межзвездную среду добавочным натрием, произведенным в результате прохождения $NeNa$ в их недрах [38].

Магний. Значение $[Mg/Fe]$ близко к солнечному, согласуется с результатами для других SMR-звезд. Работы последних лет дают противоречивые данные по содержанию магния в звездах тонкого и толстого диска: от заметного различия (до 0.2 dex [16]) до противоположного вывода о том, что звезды тонкого и толстого дисков показывают близкое к солнечному содержание магния [11].

Алюминий. Тренда нет, разброс выше, чем для O, Na, Mg. Значение $[Al/Fe]$ слегка выше солнечного, хорошо согласуется с ранее полученными результатами по всем рассматриваемым группам звезд [11, 13, 29].

Кремний, кальций, титан. Титан обнаруживает разброс. Кремний и кальций хорошо согласуются с результатами по SMR-звездам и звездам диска [11, 13].

Скандий. Тренда нет, значение содержания слегка превышает солнечное.

Ванадий, хром, кобальт, никель. Элементы железного пика показывают близкое к солнечному отношение содержаний. Никель и кобальт обнаруживают небольшой тренд с металличностью. Подобный тренд для никеля получен для SMR-звезд [14] и для звезд тонкого диска [11] и диска [13].

Элементы, образующиеся в процессе нейтронного захвата. Элементы, образующиеся преимущественно как в r -процессах (Nd, Eu), так в и s -процессах (Y, Zr, Ba, Ce, La) показывают понижение содержания для звезд повышенной металличности. Подобный результат получен для Y, Zr, Ba, Nd для звезд диска [13] и Ba в случае звезд тонкого диска [11]. Такое поведение может быть обусловлено уменьшением числа массивных Сверхновых, основных поставщиков кислорода и элементов, образующихся в r -процессах (Nd, Eu), и (или) снижением продуктивности долгоживущих AGB-звезд, основных поставщиков элементов s -процесса (Y, Zr, Ba, Ce) на высокометаллических стадиях диска.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены параметры атмосфер, массы и содержание 29 элементов в атмосферах восьми субгигантов.

2. Литий и углерод показали изменение содержания при продвижении вдоль ветви субгигантов согласно стандартной теории эволюции.

3. Химический состав SMR-звезд по отношению к менее металличным субгигантам обнаруживает дефицит кислорода, избыток натрия, небольшой избыток никеля и кобальта и пониженное содержание элементов, образующихся в процессах нейтронного захвата в их атмосферах.

4. Сравнительный анализ SMR-звезд и звезд тонкого и толстого дисков показал, что распространенность элементов в атмосферах SMR-звезд замет-

но отличается от обнаруженной у звезд толстого диска, а полученный ход содержания элементов с $[Fe/H]$ в целом согласуется с поведением элементов в звездах тонкого диска на металличностях выше солнечной.

5. SMR-звезды, вероятно, являются звездами тонкого диска, и значения их металличности $[Fe/H]$ можно рассматривать как верхний предел металличности диска.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта 02/07/00091.

1. Галазутдинов Г. А. Система обработки звездных эшеле-спектров. —1992.—52 с.—(Препринт / Спец. астрофиз. обсерватория, № 92).
2. Гуртовенко Э. А. Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
3. Коротин С. А., Мишенкина Т. В. Не-ЛТР анализ содержания натрия в атмосферах пекулярных звезд диска // Астрон. журн.—1999.—76, № 8.—С. 611—617.
4. Любимков Л. С., Рачковская Т. М. Двойная Ап-звезда RR Луп: химический состав компонентов // Астрон. журн.—1995.—72, № 1.—С. 64—71.
5. Мишенкина Т. В. Химический состав двух звезд с повышенной металличностью // Астрон. журн.—1998.—75, № 2.—С. 202—208.
6. Мишенкина 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.
7. Шиманская Н. Н., Маионкина Л. И., Сахибуллин Н. А. Не-ЛТР эффекты в линиях Mg I для звезд разных типов // Астрон. журн.—2000.—77, № 7.—С. 1—20.
8. Щукина Н. Г., Трухильо Буэно Х. Линии Fe I в спектрах холодных звезд: не-ЛТР эффекты в атмосферах звезд солнечного типа // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—14, № 4.—С. 315—329.
9. Baumuller D., Gehren T. Aluminium in metal-poor stars // Astron. and Astrophys.—1997.—325, N 3.—P. 1088—1098.
10. Cayrel de Strobel G., Lebreton Y., Soubiran C., Friel E. D. Old, low-mass, metal-rich (SMR) stars // Astrophys. and Space Sci.—1999.—265. Issue 1/4.—P. 345—352.
11. Chen Y. Q., Nissen P. E., Zhao G., et al. Chemical composition of 90 F and G disk dwarfs // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—2000.—141, N 3.—P. 491—506.
12. de Nashed J. D., Charbonnel C., Lebre A., et al. Lithium and rotation on the subgiant branch. II. Theoretical analysis of observations // Astron. and Astrophys.—2000.—357, N 3.—P. 931—937.
13. Edvardsson B., Andersen J., Gustafsson B., et al. The chemical evolution of the galactic disk // Astron. and Astrophys.—1993.—275, N 1.—P. 101—152.
14. Feltzing S., Gonzalez G. The nature of super metal rich stars // Astron. and Astrophys.—2001.—367, N 2.—P. 253—269.
15. 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.
16. Fuhrmann K. Nearby stars of the Galactic disk and halo // Astron. and Astrophys.—1998.—338, N 1.—P. 161—183.
17. Holweber H., Muller E. A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // Solar Phys.—1974.—39, N 1.—P. 19—30.
18. Iben I. Jr. Single and binary star evolution // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1991.—76, N 1.—P. 55—114.
19. Katz D., Soubiran C., Cayrel R., et al. On-line determination of stellar atmospheric parameters T_{eff} , $\log g$, $[Fe/H]$ from ELODIE echelle spectra. I. The method // Astron. and Astrophys.—1998.—338, N 1.—P. 151—160.
20. Kurucz R. L. Atlas 9 stellar atmosphere programs and 2 km/s grid. — Cambridge: Smithsonian Astrophys. Observ., 1993.—CD-ROM N 13.
21. Lebre A., de Laverny P., de Medeiros J. R., et al. Lithium and rotation on the subgiant branch. I. Observations and spectral analysis // Astron. and Astrophys.—1999.—345, N 3.—P. 936—942.
22. 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.
23. Malagnini M. L., Morossi C., Buzzoni A., Chavez M. Observations and atmospheric parameters of super-metal-rich candidates // Pubs Astron. Soc. Pacif.—2000.—112.—P. 1455—1466.
24. Mallik S. V. Lithium abundance and mass // Astron. and Astrophys.—1999.—352, N 2.—P. 495—507.
25. Mishenina T. V. Spectroscopic analysis of 31 Aquilae // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1996.—119, N 2.—P. 321—328.

26. *Mishenina T. V.* System of oscillator strengths and metallicity of SMR stars // 5th International colloquium on atomic spectra and oscillator strengths / Eds W.-U. L. Tchang-Brillet, I.-F. Wyart, C. Zeippen. — Paris: Publ. de l'Observ. de Paris, 1996.—P. 176.
27. *Morel P., Berthomieu G., Provost J., Thevenin F.* The ζ Her binary system revised // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**379**, N 2.—P. 245—256.
28. *Padgett D.* Atmospheric parameters and iron abundances of low-mass pre-main-sequence stars in nearby star formation regions // *Astrophys. J.*—1996.—**471**, N 2.—P. 847—866.
29. *Prochaska J. X., Naumov S. O., Carney B. W., et al.* The galactic thick disk stellar abundances // *Astron. J.*—2000.—**120**, N 5.—P. 2513—2549.
30. *Randich S., Gratton R., Pallavicini R., et al.* Lithium in population I subgiants // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**348**, N 2.—P. 487—500.
31. *Soubiran C., Katz D., Cayrel R.* On-line determination of stellar atmospheric parameters T_{eff} , $\log g$, [Fe/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.
32. *Spinrad H., Taylor B. J.* Scanner abundance studies. I. An investigation of supermetallicity in late-type evolved stars // *Astrophys. J.*—1969.—**157**, N 3.—P. 1279—1340.
33. *Steffen M.* A model atmosphere analysis of the F5 IV-V subgiant Procyon // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1985.—**59**, N 3.—P. 403—427.
34. *Taylor B. J.* A critical appraisal of published values of [Fe/H] for KII-IV stars // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1991.—**76**, N 2.—P. 715—757.
35. *Taylor B. J.* Supermetallicity at the quarter-century mark: A conservative statistician's review of the evidence // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1996.—**102**, N 1.—P. 105—128.
36. *Taylor B. J.* Catalog of temperatures and [Fe/H] averager for evolved G and K stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1999.—**134**, N 3.—P. 523.
37. *The Hipparcos and Tycho Catalogues.* — ESA, 1997; ESA SP-1200.
38. *Timmes F. X., Woosley S. E., Weaver T. A.* Galactic chemical evolution: hydrogen through zinc // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1995.—**98**, N 2.—P. 617—658.
39. *Tymbal V. V.* Model atmospheres and spectrum synthesis // *ASP Conf. Ser.*—1996.—**108**.—P. 198.

Поступила в редакцию 20.02.02