

## СОДЕРЖАНИЕ СКАНДИЯ, ТИТАНА И ЭЛЕМЕНТОВ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗА В АТМОСФЕРАХ $\gamma$ СТРЕЛЫ И $\alpha$ ТЕЛЬЦА

*В. Ф. Гопка, В. Е. Панчук, Н. С. Комаров*

Применение метода синтетических спектров позволило составить список неблендированных линий скандия, титана, ванадия, хрома, марганца, железа, кобальта и никеля в диапазоне 5340—6700 Å спектра  $\gamma$  Стрелы (K5III). Список использован для анализа методом моделей атмосфер спектроскопических наблюдений  $\gamma$  Стрелы (БТА, 5.7 Å/мм) и опубликованных эквивалентных ширин в спектре  $\alpha$  Тельца. Содержание перечисленных элементов в атмосферах обеих звезд солнечное. Обнаружены систематические ошибки определения химического состава, связанные с особенностями используемой сетки моделей атмосфер.

The use of synthetic spectrum methods allowed to compile a list of unblended scandium, titanium, vanadium, chromium, manganese, iron, cobalt and nickel lines in the range of 5340—6700 Å of  $\gamma$  Sagittae (K5III) spectrum. The list is used for analysis by model atmosphere methods of the spectroscopic observations of  $\gamma$  Sagittae (BTA, 5.7 Å/mm), and of the published equivalent widths in  $\alpha$  Tauri spectrum. The abundance of the above mentioned elements in the atmospheres of both stars is that of solar. Systematic errors in determinations of chemical abundance caused by peculiarities of the model atmosphere methods are detected.

Звезды высокой светимости, принадлежащие к ветви красных гигантов, являются одним из наиболее удобных объектов для изучения вопроса эволюции химического состава Галактики. Высокая светимость этих звезд позволяет исследовать области Галактики, находящиеся на значительном удалении от Солнца, т. е. изучать пространственные вариации химического состава. В стадии красного гиганта могут находиться звезды существенно разных масс и металличностей, что открывает возможность изучения возрастных изменений химического состава различных звездных подсистем.

Эти преимущества в значительной мере ослаблены трудностями построения моделей атмосфер красных гигантов и сложным характером их спектров. Для описания перегруженных линиями спектров холодных звезд применяется метод синтетических спектров, основанный на использовании больших объемов информации о характеристиках атомных и молекулярных спектров и применении быстродействующих ЭВМ. Однако метод синтетических спектров применим только в тех случаях, когда результаты наблюдений представлены в виде зависимости интенсивность—длина волны. В подавляющем большинстве случаев результаты наблюдений спектров красных гигантов представлены пока в виде списков эквивалентных ширин линий, поэтому основной объем современной информации о химическом составе атмосфер холодных звезд получен методом моделей атмосфер в применении к отдельным линиям. Часть этих линий является неразделенными блендами двух и более линий, что приводит к большой дисперсии при вычислении химического состава, определяемого по разным линиям одного и того же элемента. Таким образом, наличие хорошо развитого аппарата расчета синтетических спектров не приводит к заметному повышению качества интерпретации уже имеющихся наблюдений.

В настоящее время в Астрономической обсерватории Одесского университета и САО АН СССР составлен каталог опубликованных эквивалентных ширин линий в спектрах красных гигантов. Ясно, что анализ каталога методом моделей атмосфер кроме редукции систем эквивалентных ширин требует выполнения

предварительного отбора неблендированных линий. В данной работе мы попытались выполнить такой отбор, применив метод синтетических спектров.

**Результаты наблюдений и вычислений.** В качестве объекта исследований мы выбрали гиганты спектрального класса K5III —  $\gamma$  Стрелы и  $\alpha$  Тельца. На ОЗСП БТА были получены две хорошо уширенные спектрограммы  $\gamma$  Стрелы (обратная дисперсия  $5.7 \text{ \AA}/\text{мм}$ ). Спектры записаны на микрофотометре в интенсивностях. Для  $\alpha$  Тельца использованы эквивалентные ширины, опубликованные в [1].

Эффективную температуру мы определили по распределению энергии из [2] в предположении, что в относительно свободных от селективного поглощения участках спектра с  $\lambda$  4600, 6100 и 7550  $\text{\AA}$  излучение фотосферы  $\gamma$  Стрелы планковское. Для модели атмосферы с  $T_0=4000 \text{ K}$  из [3], используя измеренные в спектре  $\gamma$  Стрелы эквивалентные ширины, мы определили величину микротурбулентной скорости  $\xi_t$ . При этом выполнялось условие независимости содержания данного химического элемента  $\lg \epsilon$  от эквивалентной ширины  $W$  используемых линий. Для атомов нейтрального железа  $\xi_t=2 \text{ км/с}$ , для остальных исследованных элементов  $\xi_t$  находится в интервале 1.8—2 км/с, т. е. различия не превышают ошибок определения. Оценки  $\xi_t$  методом кривых роста также дают величину 2 км/с. Ввиду того что подавляющее число линий в спектрах исследуемых звезд принадлежит к нейтральным атомам, мы можем допустить определенный произвол в выборе величины ускорения силы тяжести в атмосфере. Следуя [1], мы приняли  $\lg g=1.5$ .

С указанными выше параметрами атмосферы, используя модель атмосферы из [3], в предположении солнечного химического состава в диапазоне 5340—6700  $\text{\AA}$  был вычислен синтетический спектр, который затем сравнивался со спектром  $\gamma$  Стрелы. Расчет синтетического спектра в столь широком интервале длин волн выполнен впервые, что позволило:

- а) проверить правильность идентификации линий для звезды позднего спектрального класса (это особенно существенно для слабых линий);
- б) выполнить идентификацию неотожествленных линий;
- в) определить количественную меру вклада в интенсивности бленд от различных линий;
- г) отобрать для дальнейшего детального анализа неблендированные и слабоблендированные линии исследуемого элемента.

В результате выполнения перечисленных процедур был составлен список из более чем двухсот слабоблендированных и неблендированных линий. Эти линии использовались затем для определения содержания химических элементов в атмосфере путем сравнения теоретических и наблюдаемых эквивалентных ширин. Чтобы избежать неопределенностей, связанных с интерпретацией сильных линий, из упомянутого списка взяты линии,  $W$  которых (за редким исключением) не превышает 130 м $\text{\AA}$ . С целью выявления систематических ошибок, связанных с использованием конкретной сетки моделей атмосфер, без изменения параметров модели был выполнен расчет химического состава для модели из [3] и для соответствующей модели из [4].

Исходные данные и результаты расчетов для скандия, титана, ванадия, хрома, марганца, железа, кобальта, никеля приведены в таблице. В 1-м столбце таблицы указаны длины волн перечисленных элементов, во 2-м — номера мультиплетов, в 3-м — потенциалы возбуждения  $\chi$  нижнего уровня, в 4-м — силы осцилляторов  $\lg gf$  из [5]—[12]. В 5-м и 8-м столбцах указаны эквивалентные ширины  $W$ , м $\text{\AA}$ , в спектрах  $\gamma$  Стрелы и  $\alpha$  Тельца соответственно. В 6-м и 9-м столбцах приведены результаты определения химического состава по отношению к водороду [ $\lg \epsilon(\text{H})=0$ ], полученные с использованием модели из [3], в 7-м и 10-м столбцах даны  $\lg \epsilon$ , определенные по модели из [4]. В 11-м столбце указаны длины волн основной и дополнительных, блендирующих компонент рассматриваемых деталей спектра, в 12-м дана их идентификация. В последнем, 13-м столбце приведено отношение потоков (выраженное в процентах) в линии (числитель) и в континууме, вычисленное для каждой компоненты. В скобках указан номер слоя модели атмосферы, который вносит наибольший вклад в образование данной детали в спектре  $\gamma$  Стрелы.





5628.65	203	3.42	-1.13	75	6.32	6.34	84	6.15	6.18	5628.60	CrI	79 (27)/88 (12)
5642.38	239	3.86	-0.93				45	6.35	6.35	5642.35	CrI	49 (30)/70 (17)
5719.82	119	3.01	-1.71	83	6.21	6.24				5642.55	CoI	1 (31)/2 (33)
5792.19	17	0.96	-4.45	88	6.43	6.51				5719.80	CrI	2 (31)/2 (32)
5825.81	17	0.96	-4.73	92	6.08	6.17				5725.20	CrI	79 (27)/51 (6)
										5725.75	CrI	92 (23)/98 (1)
										5725.90	NdII	82 (26)/97 (1)
5843.23	119	3.01	-2.41	36	6.23	6.23				5725.95	CrI	2 (32)/30 (1)
5844.61	119	3.01	-1.76	75	6.29	6.32				5843.20	CrI	0 (32)/3 (15)
6047.67	242	3.85	-1.91	26	5.75	5.74	18	5.94	5.94	5843.20	CrI	26 (31)/73 (4)
6501.20	16	0.98	-4.07	122	6.37	6.53	147	5.96	6.18	5844.60	CrI	70 (28)/89 (4)
										6047.65	CrI	6 (32)/23 (12)
6520.07		3.89	-2.06	43	5.92	5.92				6501.20	CrI	98 (18)/99 (1)
6529.20		3.89	-1.56	43	6.41	6.41				6501.22	SiI	0 (18)/4 (35)
6597.57		4.47	-0.88	49	5.94	5.94				6520.05	CrI	4 (32)/18 (10)
6669.25		4.17	-0.56	50	6.24	6.25				6529.20	CrI	17 (31)/44 (16)
Среднее (6.12)					6.18	6.22		6.07	6.12	6597.55	CrI	34 (30)/56 (12)
$\sigma$ (0.15)					0.22	0.24		0.18	0.18	6669.25	CrI	56 (29)/73 (11)
Mn												
6356.05		4.26	-1.71	14	6.27	6.28				6356.05	MnI	8 (32)/15 (15)
6382.19		3.77	-1.78	17	6.77	6.78				6382.20	MnI	25 (31)/44 (14)
6413.94		3.76	-1.99	12	6.74	6.75	59	6.37	6.39	6382.00	VI	0 (32)/23 (1)
6440.98		3.76	-1.36							6413.95	MnI	19 (32)/36 (13)
6519.37		3.77	-2.04	25	6.31	6.31				6440.95	MnI	50 (30)/68 (13)
Среднее (6.60)					6.52	6.53				6440.95	NI	0 (30)/1 (40)
$\sigma$ (0.24)					0.27	0.27				6519.35	MnI	15 (31)/31 (13)
Fe												
5386.34	1064	4.15	1.82	97	4.23	4.26	92	4.31	4.34	5386.35	FeI	73 (28)/77 (17)
5395.22	1143	4.44	-1.83				70	4.30	4.34	5386.40	NI	2 (32)/2 (33)
5398.29	1145	4.44	-0.65	119	4.60	4.66	124	4.44	4.50	5395.20	FeI	42 (31)/42 (31)
5436.30	1161	4.39	-1.44				92	4.35	4.40	5395.25	NI	2 (32)/2 (33)
										5398.25	FeI	87 (26)/90 (31)
										5836.25	FeI	73 (29)/76 (31)
										5836.30	GdI	0 (29)/5 (1)
										5836.50	CrI	0 (31)/2 (2)
										5836.50	ThI	0 (31)/3 (1)
5441.35	1144	4.31	-1.72	79	4.47	4.51	76	4.44	4.52	5441.35	FeI	79 (28)/82 (31)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5491.84	1031	4.19	-2.34	54	4.45	4.48	44	4.61	4.63	5491.80	Fel	72 (29/75 (17)
										5492.00	VI	0 (33/28 (1)
5524.27	1059	4.15	-2.83	28	4.45		28	4.47	4.50	5492.15	MoI	0 (33)/4 (11)
5529.17	872	3.64	-2.71	72			72	4.51	4.53	5524.25	Fel	8 (27/85 (17)
5536.60	345	2.83	-3.87	64	4.64	4.66	72	4.49	4.51	5529.20	Fel	7 (32/43 (15)
										5536.45	Fel	83 (26/91 (33)
5539.83	1130	4.29	-2.57	33			33	4.44	4.46	5536.60	MnI	17 (32/47 (32)
										5539.80	Fel	42 (31/42 (17)
5560.22	1164	4.43	-1.13	89			89	4.67	4.72	0 (31)/1 (39)	Cl	0 (31)/1 (39)
5568.87	869	3.63	-2.93	65	4.44	4.46	56	4.57	4.59	5560.20	Fel	80 (27/84 (31)
										5560.30	VI	0 (33)/2 (40)
5570.07	345	2.84	-4.37	45			45	4.41	4.42	5568.90	Fel	65 (29/75 (15)
5577.03	1314	5.03	-1.55	22			22	4.74	4.77	5568.65	MoI	0 (32)/4 (40)
5579.35	1061	4.23	-2.40	45			45	4.46	4.50	5570.05	TiI	0 (32)/64 (1)
5611.37	869	3.63	-2.99	45			45	4.69	4.71	5570.95	Fel	52 (30)/76 (13)
5661.35	1108	4.28	-1.97	74			74	4.32	4.36	5577.00	VI	0 (33)/7 (1)
5679.03	1183	4.65	-0.81	108	4.38	4.44	108	4.32	4.36	5579.00	Fel	80 (28/86 (32)
5732.30	1313	4.99	-1.51	42	4.40	4.44	42	4.32	4.36	5579.35	Fel	45 (31/46 (17)
										5611.35	Fel	4 (32)/8 (15)
5741.86	1086	4.26	-1.77	76	4.55	4.59	76	4.46	4.50	5661.35	Fel	78 (27/82 (17)
										5679.00	Fel	87 (26/91 (31)
5752.04	1180	-4.55	-0.99	91	4.67	4.71	91	4.32	4.36	5679.25	Fel	64 (29/71 (32)
										5732.25	Fel	0 (32)/10 (1)
										5732.40	YI	0 (32)/10 (1)
										5741.80	Fel	55 (30)/58 (16)
										5744.55	VI	4 (32)/40 (2)
										5752.00	Fel	88 (25/91 (31)
										5751.80	TiI	0 (32)/7 (2)
										5751.90	GdI	0 (32)/36 (1)
										5752.05	RuI	0 (27/8 (1)
										5775.05	Fel	90 (25/92 (16)
										5775.00	CrI	0 (30)/1 (8)
										5778.45	Fel	98 (18/99 (11)
										5778.55	MnI	5 (31)/6 (32)
										5778.75	VI	1 (32)/47 (1)
											VI	0 (32)/3 (13)
										5793.90	Fel	61 (29/66 (16)
										5833.95	Fel	61 (29/77 (14)
										5834.05	FelI	0 (32)/2 (37)
										5833.15	Fel	99 (17/99 (1)
										5833.05	TiI	0 (32)/6 (2)

5855.09	1179	4.61	-1.66	53	4.57	4.60	118	4.55	5855.05	FeI	48 (31)/48 (31)
5883.81	982	3.96	-1.39	119	4.59	4.65	96	4.53	5885.25	GdII	1 (32)/12 (1)
5905.68	1181	4.65	-0.84					4.59	5883.80	FeI	97 (20)/98 (15)
5927.80	1175	4.65	-1.16	70	4.72	4.76	71	4.67	5905.65	FeI	36 (31)/36 (32)
5929.68	1176	4.55	-1.33	82	4.49	4.53	66	4.73	5905.55	CoI	1 (32)/3 (14)
5943.59	63	2.20	-4.28	110	4.43	4.49			5927.80	VII	89 (25)/92 (31)
5976.79	959	3.94	-1.39	122	4.57	4.63	119	4.56	5927.60	SiII	0 (25)/1 (36)
6005.55	207	2.59	-3.58	124	4.31	4.35			5929.65	FeI	18 (32)/27 (34)
6015.25	63	2.22	-4.68	76	4.53	4.57	69	4.62	5929.40	TiI	92 (24)/94 (31)
6056.01	1259	4.73	-0.45	120	4.43	4.50	100	4.72	5943.60	FeI	5 (32)/36 (5)
6078.50	1259	4.79	-0.36	121	4.41	4.48	101	4.71	5976.75	FeI	95 (22)/97 (10)
6079.02	1176	4.65	-1.11	94	4.34	4.40	77	4.61	5976.70	Cl	98 (28)/98 (15)
6094.38	1177	4.65	-1.69	45	4.52	4.55	48	4.55	6005.55	FeI	0 (25)/2 (40)
6096.67	959	3.98	-1.96	85	4.60	4.64	90	4.48	6005.35	FeI	97 (21)/98 (10)
6270.23	342	286	-2.69	129	4.75	4.83	125	4.75	6015.25	MnI	1 (32)/8 (12)
6271.28	685	3.33	-2.84	100	4.41	4.46	89	4.55	6015.20	FeI	88 (24)/94 (10)
6353.85	13	0.91	-6.08	88	4.73	4.95			6015.35	CoI	8 (28)/10 (1)
6380.75	1015	4.19	-1.41	94	4.73	4.77			6055.95	FeI	1 (32)/1 (32)
6436.41	1011	4.19	-2.46						6078.40	FeI	93 (24)/95 (52)
6494.50	1255	4.73	-1.40						6078.45	FeI	90 (25)/94 (32)
6496.47	1258	4.79	-0.66						6079.00	Cl	0 (30)/3 (40)
6509.61	1012	4.07	-2.97	38	4.25	4.28			6094.35	FeI	7 (32)/7 (31)
6591.33	139	4.59	-2.07	26	4.69	4.73			6096.65	FeI	56 (30)/58 (31)
6648.12	122	1.01	-5.74	127	4.55	4.67			6090.75	FeI	87 (25)/91 (15)
									6270.25	SiII	1 (32)/3 (34)
									6270.25	FeI	99 (17)/99 (1)
									6271.30	FeII	3 (32)/13 (36)
									6271.40	FeI	73 (28)/85 (33)
									6271.40	TiI	0 (32)/2 (12)
									6271.45	CoI	4 (32)/4 (32)
									6271.55	CoI	4 (32)/4 (31)
									6353.85	FeI	98 (19)/99 (1)
									6380.75	FeI	97 (20)/97 (31)
									6380.60	CrI	0 (32)/2 (10)
									6380.65	SiII	0 (29)/8 (35)
									6380.75	SrI	0 (20)/2 (1)
									6380.95	GdII	0 (32)/9 (1)
									6436.40	FeI	53 (30)/60 (15)
									6494.50	FeI	64 (29)/69 (32)
									6494.45	MnI	1 (30)/1 (32)
									6496.45	FeI	80 (27)/86 (32)
									6496.45	TiI	0 (27)/1 (36)
									6509.60	FeI	74 (28)/81 (15)
									6591.35	FeI	66 (29)/70 (31)
									6648.10	FeI	98 (18)/99 (1)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6653.91 Среднее (4.43) $\sigma$ (0.01)	1052	4.15	-2.52	34	4.65 4.51 0.15	4.70 4.57 0.16		4.54 0.13	4.59 0.14	6653.80	FeI	68 (28)/76 (15)
Co												
5408.09	112	2.28	-2.61	49	6.87	6.89	70	6.52	6.55	5408.10	CoI	18 (32)/58 (11)
5647.24	112	2.28	-1.93	101	6.74	6.75	113	6.47	6.53	5647.25	CoI	65 (29)/88 (10)
5883.44	90	2.04	-3.00				29	7.17	7.18	5647.10	CoI	3 (32)/3 (32)
5915.57	82	2.14	-2.03	105	6.81	6.87	106	6.74	6.80	5883.45	SI	22 (31)/68 (10)
6005.01	37	1.71	-3.48	51	6.80	6.82	42	6.94	6.95	5915.55	CoI	78 (27)/93 (10)
6273.10		3.58	-0.62	32	7.38	7.41		6.94	6.95	6005.00	CoI	12 (32)/69 (1)
6340.81	200	3.41	-2.02	11	6.79	6.82	32	6.52	6.56	6273.00	CoI	45 (30)/61 (14)
6347.86	174	4.40	-0.36	13	7.05	7.09	45	6.80	6.83	6340.80	CoI	4 (32)/10 (13)
6395.15		3.81	-0.63							6347.85	CoI	13 (32)/13 (32)
6417.78		2.33	-1.85	82	7.11	7.15				6395.15	CoI	30 (31)/39 (14)
Среднее (7.02) $\sigma$ (0.38)										6395.20	VI	0 (32)/3 (1)
Ni										6417.80	CoI	69 (28)/91 (1)
5462.50	192	3.85	-0.93	97	5.55	5.61		6.74	6.77	6417.70	CaI	2 (31)/3 (34)
5589.37	205	3.90	-1.14					0.26	0.25			
5593.75	206	3.90	-0.92	69	6.01	6.06						
5614.78	250	4.15	-0.64	96	5.45	5.51	87	5.72	5.76	5462.50	NiI	79 (27)/84 (32)
5625.33	221	4.09	-0.70	86	5.67	5.68				5462.40	VI	0 (32)/24 (2)
5805.23	234	4.17	-0.64	71	5.89	5.92	67	5.80	5.84	5589.35	NiI	79 (27)/84 (32)
5923.96	259	4.16	-1.58							5589.30	CoI	1 (31)/1 (16)
										5593.75	NiI	84 (26)/88 (32)
										5614.75	NiI	77 (28)/84 (33)
										5614.75	Cl	0 (28)/1 (40)
										5614.85	FeI	1 (32)/1 (31)
										5625.30	NiI	80 (27)/87 (32)
										5625.50	CrI	10 (32)/32 (13)
										5625.55	IrI	0 (32)/2 (10)
										5805.20	NiI	81 (27)/87 (32)
										5805.15	Cl	2 (32)/3 (38)
										5805.20	Cl	0 (27)/26 (40)
										5923.95	NiI	38 (31)/41 (33)
										5923.95	TiI	0 (31)/2 (1)



6007.32	42	1.68	-3.33	135	5.70	5.79	125	5.79	5.88	6007.30	NI	99 (12)/99 (1)
6086.29	249	4.26	-0.53	62	6.01	6.06	73	5.79	5.84	6007.15	Cl	0 (32)/12 (39)
6133.98	229	4.09	-1.83	32	5.51	5.55	28	5.59	5.63	6086.25	NI	66 (29)/75 (33)
6175.37	217	4.09	-0.53	104	5.53	5.60	91	5.72	5.77	6133.95	NI	33 (31)/36 (32)
6176.82	228	4.09	-0.31	115	5.56	5.63	107	5.65	5.71	6134.00	VI	0 (32)/1 (1)
6177.25	58	1.83	-3.50				110	5.68	5.76	6134.25	VI	81 (26)/97 (1)
6204.61	226	4.09	-1.13	63	5.63	5.68	57	5.71	5.76	6175.35	NI	82 (26)/88 (32)
6316.58	248	4.15	-1.44	40	5.65	5.68	40	5.64	5.67	6175.25	FeII	0 (32)/1 (38)
6370.36	127	3.54	-1.94	53	5.76	5.79				6175.60	VI	2 (32)/37 (1)
6378.26	247	4.15	-0.89	74	5.60	5.65	80	5.47	5.51	6176.80	NI	86 (26)/91 (32)
6382.62		1.83	-5.10	14	5.80	5.81				6176.90	CrII	0 (32)/1 (36)
6414.59	244	4.15	-1.22	44	5.79	5.84	48	5.70	5.74	6177.25	NI	64 (28)/91 (1)
6502.22		3.40	-2.47	34	5.76	5.79	33	5.77	5.80	6177.40	FeI	4 (32)/4 (16)
6532.88	64	1.93	-3.39	102	5.84	5.91	104	5.77	5.84	6204.60	NI	37 (31)/40 (32)
6598.61	249	4.23	-0.98	48	5.82	5.87				6316.55	NI	44 (30)/51 (33)
6660.57		1.93	-4.56	14	6.20	6.21				6316.65	TH	0 (32)/6 (1)
Среднее (5.75)					5.74	5.78		5.74	5.79	6370.35	NI	76 (27)/86 (13)
$\sigma$ (0.34)					0.19	0.18		0.13	0.14	6370.25	VI	0 (32)/2 (1)
										6370.05	SiI	23 (31)/49 (34)
										6378.25	NI	69 (29)/76 (33)
										6378.25	VI	0 (30)/1 (1)
										6382.60	NI	14 (31)/61 (1)
										6382.70	TH	0 (32)/7 (1)
										6414.60	NI	16 (32)/16 (33)
										6414.80	NI	10 (32)/10 (33)
										6502.20	NI	45 (30)/62 (42)
										6532.85	NI	90 (24)/97 (1)
										6598.60	NI	58 (29)/67 (33)
										6660.55	NI	33 (30)/80 (1)

**Анализ таблицы.** Прежде всего проверим дополнительно, действительно ли составленный список не содержит значительной доли бленд. Это необходимо сделать хотя бы потому, что использованный в расчете синтетического спектра список линий [12] не полон, когда речь идет об элементах с большим атомным номером. Наличие бленд должно сделать асимметричным (или даже двугорбым, см. [13]) распределение числа линий по величине  $\lg \epsilon$ . Для величины  $\lg \epsilon$  (Fe) из таблицы (для каждого из столбцов 6, 7, 9, 10) были вычислены четыре первых центральных момента, асимметрия  $g_1$  и эксцесс  $g_2$ . Как для модели из [3], так и для модели из [4] для обеих звезд выполняются неравенства [14]:

$$|g_1| \leq 3 \{6(n-1)/[(n+1)(n+3)]\}^{1/2};$$

$$|g_2| \leq 5 \{24n(n-2)(n-3)/[(n+1)^2(n+3)(n+5)]\}^{1/2}$$

(здесь  $n$  — число определений  $\lg \epsilon$  (Fe)), это позволяет утверждать, что все четыре распределения подчиняются нормальному закону. Нормальное распределение имеет также и величина

$$\delta \lg \epsilon (\text{Fe}) = \lg \epsilon (\text{Fe})_{\gamma \text{Sge}} - \lg \epsilon (\text{Fe})_{\alpha \text{Tau}}$$

Проверим теперь влияние случайных ошибок в используемых величинах сил осцилляторов. Если предположить, что различия в величине  $\lg \epsilon$  от линии к ли-

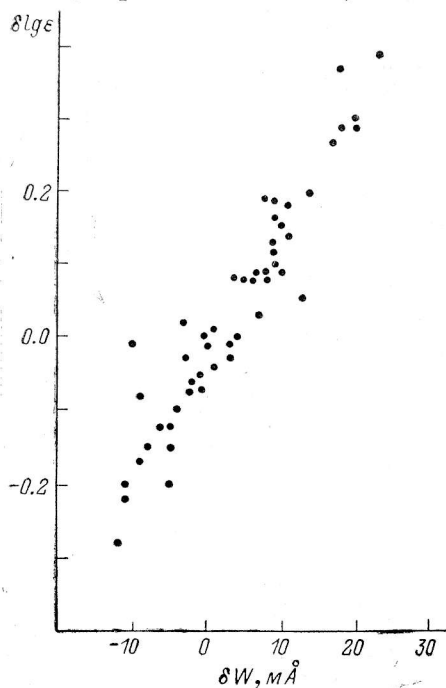


Рис. 1. Зависимость разности содержаний элемента  $\delta \lg \epsilon = \lg \epsilon_{\gamma \text{Sge}} - \lg \epsilon_{\alpha \text{Tau}}$  от разности эквивалентных ширин  $\delta W = W_{\gamma \text{Sge}} - W_{\alpha \text{Tau}}$ , рассчитанная для всех исследуемых элементов.

нии связаны в основном с ошибками сил осцилляторов,  $\lg gf$ , то для атмосфер двух звезд, имеющих одинаковую  $T_e$  и близкий химический состав, должны наблюдаться взаимная корреляция величин  $\lg \epsilon$ , определенных по общим для двух звезд линиям. Коэффициент корреляции величин  $\lg \epsilon (\text{Fe})_{\gamma \text{Sge}}$  и  $\lg \epsilon (\text{Fe})_{\alpha \text{Tau}}$  оказался небольшим ( $r=0.33$ ), это позволяет сделать предположение о том, что в случае нейтрального железа основной причиной различий  $\lg \epsilon$  от линии к линии являются не ошибки  $\lg gf$ , а точность измерений  $W$  или индивидуальные различия атмосфер двух звезд. Эти индивидуальные различия могут проявляться в небольших отклонениях температурного распределения с глубиной в атмосфере, в этом случае следует ожидать корреляции величины  $\delta \lg \epsilon (\text{Fe})$  с величиной, средней по обеим звездам эквивалентной ширины  $\bar{W} = (1/2)(W_{\gamma \text{Sge}} + W_{\alpha \text{Tau}})$  линий нейтрального железа, по которым определена  $\delta \lg \epsilon (\text{Fe})$ . Анализ показал, что такая корреляция отсутствует.

Проверим теперь гипотезу о том, что различия  $\delta \lg \epsilon (\text{Fe})$  обязаны ошибкам измерений  $W$ . Так как обе звезды анализируются на модели с одинаковыми параметрами, следует ожидать наличия жесткой функциональной связи между величинами  $\delta \lg \epsilon$  и  $\delta W = W_{\gamma \text{Sge}} - W_{\alpha \text{Tau}}$ . Такая зависимость приведена на рис. 1. Из рис. 1 следует, что при  $\delta W = 5 \text{ m}\text{\AA}$  соответствующее изменение химического состава  $\delta \lg \epsilon = 0.05$ . Среднее по всем использованным для рис. 1 линиям значение эквивалентной ширины равно  $60 \text{ m}\text{\AA}$ , выбранная произвольно разница  $\delta W$  составляет около 10 % от этой величины и соответствует ошибке в проведении уровня непрерывного спектра около 1 %. Такая ошибка вполне допустима, если учесть, что мы сравниваем наблюдения разных авторов. Следовательно, различие средних для каждой звезды содержаний железа (0.03 dex, см. таблицу) может быть связано с ошибками измерений.

Мы вычислили также коэффициенты уравнения регрессии  $\lg \epsilon(\text{Fe}) = a + b\chi$ . Если эффективные температуры исследуемых звезд различаются, то в предположении больцмановского равновесия должны различаться коэффициенты  $b$ . В обоих случаях  $b = -0.02 \text{ эВ}^{-1}$  при дисперсии  $\sigma^2 = 0.02$ , т. е. для обеих звезд условие больцмановского равновесия атомов железа выполняется при одной и той же эффективной температуре  $T_e = 4000 \text{ К}$ .

Проанализируем теперь неопределенности, вносимые в величину  $\lg \epsilon$  использованием той или иной модели атмосферы. На рис. 2 для линий четырех химических элементов построены зависимости  $\Delta \lg \epsilon = \lg \epsilon_1 - \lg \epsilon_2$  от эквивалентной ширины  $W$  (здесь, как и в таблице,  $\lg \epsilon_1$  вычислено по модели из [3], а  $\lg \epsilon_2$  — по модели из [4]). При построении рис. 2 использованы результаты анализа как  $\gamma$  Стрелы, так и  $\alpha$  Тельца. Если бы использованные модели не различались

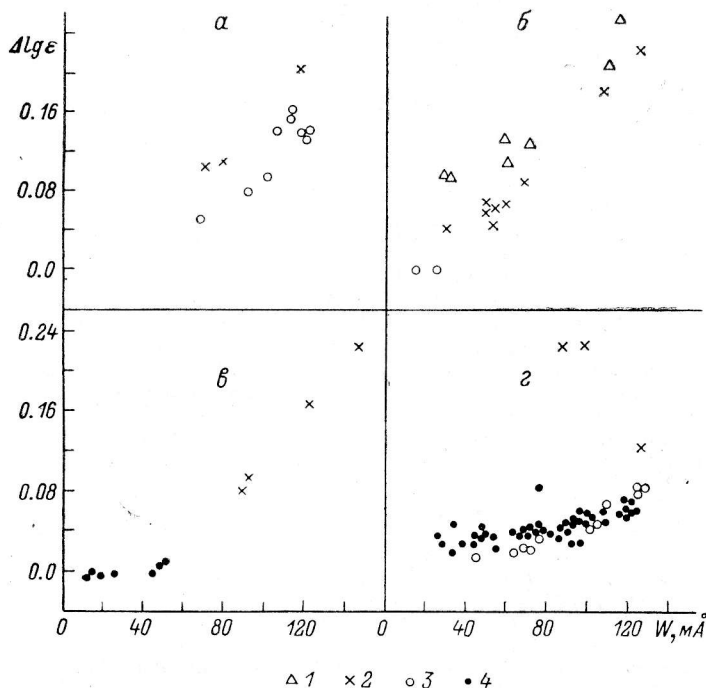


Рис. 2. Зависимость разности содержаний элемента  $\Delta \lg \epsilon = \lg \epsilon_1 - \lg \epsilon_2$ , вычисленных по различающимися моделям атмосфер, от эквивалентной ширины  $W$ .

$a$  — титан;  $б$  — ванадий;  $в$  — хром;  $г$  — железо;  $\chi$ , эВ: 1 — 0—0.3, 2 — 0.8—1.2, 3 — 2.0—3.0, 4 — 3.8—4.8.

распределениями температура—давление, а различались бы только величиной шага разбиения по слоям, то величина  $\Delta \lg \epsilon$  была бы случайным образом распределена вблизи нуля. Но различие систематическое, причем его величина нарастает при переходе к более сильным линиям. Группируя линии по потенциалам возбуждения нижнего уровня  $\chi$ , видим, что наибольшую систематическую разность дают определения химического состава, выполненные по линиям с низким  $\chi$ . Кроме того, даже для линий с  $\chi = 2 \div 3 \text{ эВ}$  разность  $\Delta \lg \epsilon$  неодинакова для различных элементов. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при сравнении кривых распространенностей химических элементов, полученных при помощи разных сеток моделей и (или) по линиям разных мультиплетов.

В таблице даны также средние по всем линиям значения содержания каждого элемента и среднеквадратичные ошибки  $\sigma$ . Для сравнения их с результатами исследования химического состава атмосферы Солнца в первом столбце в строке «Среднее» и в скобках приведены результаты работы [15]. Мы пришли к выводу, что содержание Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni в атмосферах  $\gamma$  Стрелы и  $\alpha$  Тельца совпадает и равно солнечному.

**Выводы.** В результате применения метода синтетических спектров для  $\gamma$  Sge и  $\alpha$  Tau получен список линий, свободных от блендирования. Иссле-

дование этого списка методом моделей атмосфер позволило выявить тип систематических ошибок определения химического состава, связанных с различием в используемых сетках моделей атмосфер. Учитывая приведенное выше определение микротурбулентной скорости  $\xi_t$ , рис. 2 можно интерпретировать как необходимость вводить при переходе от одной сетки моделей к другой новые значения  $\xi_t$ , различные для каждого элемента (и более того, для каждой группы мультиплетов с близкими  $\chi$ ). Таким образом,  $\xi_t$ , определяемая из условия независимости  $\lg \epsilon$  от  $W$ , играет роль параметра, компенсирующего недостатки той или иной модели атмосферы. Интересным является также и то, что спектры двух звезд, зарегистрированные на разных инструментах и обработанные разными авторами, при анализе методом моделей атмосфер показали практически идентичный химический состав.

Авторы признательны В. Г. Ключковой, Т. В. Мишениной, И. Ф. Бикмаеву за помощь в наблюдениях и редукации спектрограмм, а также А. В. Юценко и В. В. Цымбалу за помощь в вычислениях.

#### Литература

1. Paradijs J. van Equivalent width data for  $\alpha$  Tau // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1974. 18. P. 447—461.
2. Спектрофотометрия звезд в диапазоне 550—900 нм / Комаров Н. С. и др. Киев: Наук. думка, 1983. 310 с.
3. Johnson H. R., Vernat A. P., Grupp B. M. Red giant model atmospheres. I: A grid of opacity sampled models // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1980. 42. P. 501—523.
4. A grid of model atmospheres for metallic-deficient giant stars. I // Bell R. A., Eriksson K., Gustafsson B., Nordlund A. // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1975. 42. P. 407—432.
5. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. Построение солнечных внутренне согласованных шкал сил осцилляторов и содержание химических элементов. V: Скандий // *Кинематика и физика небесных тел.* 1985. 1, № 1. С. 75—76.
6. Костык Р. И. Силы осцилляторов нейтрального титана // *Астрон. журн.* 1982. 59, № 4. С. 693—698.
7. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Построение фундаментальных систем сил осцилляторов и содержание химических элементов в фотосфере Солнца. FeI: Препринт ИТФ-79—138 P.1980.
8. Костык Р. И. Силы осцилляторов нейтрального хрома // *Астрометрия и астрофиз.* 1981. № 45. С. 3—9.
9. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. Построение солнечных внутренне согласованных шкал сил осцилляторов и содержание химических элементов. VI: Mn I // *Солнеч. данные.* 1984. № 9. С. 85—87.
10. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И., Орлова Т. В. Построение солнечных внутренне согласованных шкал сил осцилляторов и содержание химических элементов. Определение сил осцилляторов CoI по эквивалентным ширинам фраунгоферовых линий с учетом их сверхтонкой структуры // *Астрон. журн.* 1983. 60, № 4. С. 458—462.
11. Костык Р. И. Силы осцилляторов нейтрального никеля // *Астрометрия и астрофиз.* 1982. № 46. С. 58—61.
12. Kurucz R. L., Peutremann E. A table of semiempirical of values // *Smithsonian Astroph. Observ. Spec. Rep.* 1975. Nr 362. P. 1—1219.
13. Борисов Ю. В., Панчук В. Е. Спектроскопическое исследование AC Геркулеса. I: Параметры атмосферы и химический состав // *Астрофиз. исслед. (Изв. САО).* 1986. 22. С. 17—24.
14. Пустильник И. Б. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968.
15. Vieux E. Abundance of singly-ionized elements of the iron group in the Sun // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1978. 184. P. 683—694.

Поступила в редакцию 19 декабря 1986 г.