

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕР ТРЕХ ЗВЕЗД-ГИГАНТОВ СКОПЛЕНИЯ ГИАД

Т. В. Мишенина,* Н. С. Комаров,* Л. Э. Канцен*

На основе спектрограмм с дисперсией 5.6 Å/мм, полученных на БТА САО АН СССР, исследован химический состав и физические условия в атмосферах трех звезд-гигантов скопления Гиад. Эмпирический анализ отклонений от ЛТР по линиям нейтрального железа с низким и высоким потенциалом возбуждения показывает незначительные отличия, лежащие в пределах ошибок определений. Определено содержание 22 химических элементов методом моделей атмосфер. Получено, что содержание элементов в атмосферах исследуемых звезд отличается от солнечного. При этом установлен дефицит кислорода, избыток натрия (~0.5 dex) и элементов, начиная с иттрия (~0.2 dex).

The abundances and physical conditions in the atmospheres of three Hyades giants have been investigated using the high-dispersion (5.6 Å/mm) spectra obtained at the 6-m telescope of SAO USSR AS. The empirical analysis of the deviations from LTE run by Fe lines with low and high excitation potentials showed slight differences within the limits of the determination errors. The abundances of 22 chemical elements in K-giant atmospheres derived by the model atmosphere method differ from the solar one. Underabundance of O and overabundance of Na for ~0.5 dex and of elements after Y for ~0.2 dex are established.

Исследование химического состава звезд ближайшего к Солнцу скопления Гиад (модуль расстояния $m-M=3^m3$ [1]) затрагивает широкий круг астрофизических проблем: определение положения начальной главной последовательности, установление шкалы галактических расстояний, тестирование теорий нуклеосинтеза и звездообразования, уточнение наличия перемешивания и т. д.

В данной работе проведено исследование трех звезд-гигантов этого скопления. В табл. 1 приведен список звезд и их характеристики: номер звезды по каталогу HD, название звезды, V — звездная величина, $B-V$ — показатель цвета, Sp — спектральный класс, π'' — параллакс [2]. Звезда δ Тау является спектроскопически двойной, предполагаемый компонент — M -карлик позднего подкласса [3]. Оценка масс m звезд-гигантов скопления по трекам Пачинского [4] дает значение $m \sim 2m_{\odot}$, где m_{\odot} — масса Солнца.

Используя формулу [5]

$$T_G \approx 7.6 \cdot 10^9 \frac{1 + 30Z}{(m/m_{\odot})^{2.7}} \left(\frac{0.23}{Y}\right)^{1.6} \text{ лет},$$

где Y , Z — относительное содержание (по массе) гелия и тяжелых элементов, определим возраст, когда звезда-гигант с массой $\sim 2m_{\odot}$ достигнет вершины ветви гигантов: $T \approx 9.3 \cdot 10^8$ лет. Возраст скопления Гиад оценивается в 6.61×10^8 лет [1].

Анализ исследований химического состава звезд скопления, проведенный различными авторами, показывает, что металличности $[Fe/H]$, получаемые по спектрофотометрическим и фотометрическим наблюдениям излучения звезд, различаются, при этом последние на 0.1–0.2 dex выше спектрофотометрических. В целом же спектрофотометрические определения $[Fe/H]$ дают значения 0.1–0.3 dex, фотометрические — 0.2–0.3 dex, наблюдения с помощью ретикона ~0.2 dex [6].

Наши исследования направлены на решение вопроса о содержании элементов в атмосферах звезд γ , δ , ϵ Тау на основе анализа спектрограмм с высоким спектральным разрешением, полученных на БТА САО АН СССР.

* Астрономическая обсерватория Одесского Государственного университета им. И. И. Мечникова.

ТАБЛИЦА 1

Характеристики звезд-гигантов скопления Гиад

HD	*	V	B-V	Sp	π''
27371	γ Tau	3.64	0.99	K0III	0.023
27697	δ Tau	3.76	0.98	K0III	0.016
28305	ε Tau	3.54	1.02	K0III	0.018

Спектрограммы звезд-гигантов были получены в 1984 г. В. Г. Ключковой, В. Е. Панчуком и И. Ф. Бикмаевым на 1-й камере ОЗСП БТА на пластинках Kodak 103aF в диапазоне длин волн λ 5300—6700 Å с обратной дисперсией 5.6 Å/мм. Возможность получения такого материала появилась благодаря реконструкции 1-й камеры ОЗСП [7]. Запись спектрограмм осуществлялась в САО АН СССР на микрофотометре в прямых интенсивностях. Непрерывный спектр проводился по пикам интенсивностей. Для отождествления линий использовался синтетический спектр, рассчитанный по программе SYNT [8] в диапазоне длин волн λ 5300—6700 Å. При расчете была использована модель атмосферы из [9] с параметрами: эффективная температура $T_{\text{эф}}=5000$ К, логарифм ускорения силы тяжести $\lg g=3.0$, содержание химических элементов — солнечное. Для уточнения отождествления линий поглощения также применялся Атлас Солнца [10] и каталог эквивалентных ширин линий W_{λ} в спектрах К, М-гигантов, созданный на Одесской астрономической обсерватории В. Ф. Карамышом и др. Отбор неблендированных и слабоблендированных линий проводился с учетом разрешения спектрограмм (0.15—0.20 Å) и возможных погрешностей в силах осцилляторов в списке Куруца—Пейтремана [11], которые использовались при расчете синтетического спектра. Определение эквивалентных ширин линий W_{λ} в спектрах исследуемых звезд проводилось по зависимости $\lg W_{\lambda}/\lambda$ от остаточной интенсивности R_{λ} . Эта зависимость была получена по неблендированным (и слабоблендированным) линиям. Сравнение W_{λ} , определенных в настоящей работе и по спектральному материалу с обратной дисперсией 15 Å/мм [12], дает коэффициент корреляции, равный 0.98 [13].

Кратко остановимся на выборе параметров моделей атмосфер, используемых для определения химического состава атмосфер исследуемых звезд. Эффективная температура $T_{\text{эф}}$ определялась несколькими способами:

а) по шкалам эффективных температур: по шкале [14], построенной с использованием прямых измерений радиусов, установлено значение $T_{\text{эф}}=4800$ К; по шкале [15], построенной преимущественно по результатам абсолютной спектрофотометрии звезд, значение $T_{\text{эф}}=5000$ К;

б) самосогласованные с моделями атмосфер [9] значения цвета $B-V$ дают наиболее низкие значения $T_{\text{эф}}=4700$ К;

в) температуры, полученные в предположении, что в максимально свободных от поглощения в атомных линиях и молекулярных полосах участках спектра с λ 4600, 6100 и 7550 Å излучение фотосферы планковское, равны 5050 К;

г) эффективные температуры, определенные методом спектральных индексов [15], выражены средней эффективной температурой, равной (4930 ± 40) К, а в работе [16] — (5020 ± 25) К;

д) эффективная температура, определяемая методом фотометрических индексов, примененным к результатам Женевской фотометрии, равна (4930 ± 15) К [17].

Величины ускорения силы тяжести на поверхности исследуемых звезд установлены следующим образом:

а) по болометрической звездной величине, найденной с использованием болометрических поправок [15] и принадлежности звезд к скоплению, получено значение $\lg g=2.6 \div 2.7$;

ТАБЛИЦА 2

Эквивалентные ширины линий и химический состав атмосфер

Элемент, λ	χ	$\lg gf$	γ Tau		δ Tau		ϵ Tau	
			W_λ	$-\lg \epsilon_\gamma$	W_λ	$-\lg \epsilon_\delta$	W_λ	$-\lg \epsilon_\epsilon$
O I								
6300.29	0.00	-9.68	20	3.36	24	3.28	20	3.36
Na I								
5688.21	2.10	-0.45	201	5.14	197	5.18	197	5.18
6154.22	2.10	-1.56	102	5.27	109	5.19	107	5.22
6160.75	2.10	-1.26	141	5.02	129	5.19	137	5.10
Mg I								
5711.07	4.34	-1.55	143	4.57	—	—	170	4.23
6318.75	5.11	-1.73	100	4.22	88	4.39	100	4.22
Si I								
5645.60	4.93	-1.42	83	4.66	89	4.58	93	4.51
5665.54	4.92	-2.16	66	4.30	73	4.17	73	4.18
5793.06	4.93	-1.84	57	4.67	61	4.61	60	4.62
5948.57	5.08	-0.93	113	4.55	118	4.51	103	4.69
6145.01	5.61	-0.82	56	4.97	60	4.91	68	4.81
6237.31	5.61	-0.53	81	4.88	86	4.80	81	4.88
6243.80	5.61	-0.77	70	4.80	70	4.80	67	4.84
6244.46	5.61	-0.69	70	4.88	61	5.02	78	4.76
6583.70	5.95	-1.64	24	4.40	22	4.46	26	4.33
Ca I								
5581.97	2.52	-0.54	166	5.45	160	5.53	140	5.78
5588.75	2.52	0.14	220	5.63	—	—	228	5.58
5867.56	2.93	-1.52	31	6.14	34	6.09	40	5.97
6166.43	2.52	-1.30	117	5.44	123	5.36	130	5.25
6471.65	2.52	-0.90	156	5.32	148	5.43	151	5.37
6493.77	2.52	0.02	216	5.63	208	5.69	220	5.62
6499.64	2.52	-0.68	148	5.63	152	5.59	152	5.59
Sc I								
6210.61	0.00	-1.02	35	9.45	36	9.44	44	9.31
Sc II								
5657.82	1.51	-0.50	132	8.44	—	—	123	8.58
6245.56	1.51	-0.93	81	8.91	66	9.17	75	9.02
6279.69	1.50	-1.16	81	8.70	99	8.42	99	8.41
6300.62	1.51	-1.78	20	9.22	31	8.91	23	9.12
6604.54	1.36	-1.08	85	8.89	65	9.23	74	9.08
Ti I								
5384.63	0.83	-2.70	18	7.06	11	7.36	20	6.99
5426.25	0.02	-2.93	35	7.40	33	7.46	49	7.19
5440.50	1.43	-1.90	19	7.50	18	7.53	14	7.65
5449.15	1.44	-1.90	16	7.26	14	7.33	27	6.96
5471.19	1.44	-1.18	22	7.76	22	7.76	28	7.65
5716.44	2.30	-0.67	30	7.11	33	7.08	27	7.20
5739.47	2.25	-0.69	29	7.22	29	7.22	43	6.95
5866.44	1.07	-0.79	106	7.20	116	7.06	122	6.96
5903.32	1.07	-1.90	27	7.39	29	7.38	42	7.12
5922.11	1.05	-1.41	77	7.11	66	7.28	88	6.95
5937.80	1.07	-1.85	41	7.19	35	7.32	—	—
5978.54	1.87	-0.41	69	7.26	63	7.35	66	7.31
6064.61	1.05	-1.85	55	7.01	48	7.12	55	7.01
6091.17	2.27	-0.29	46	7.31	50	7.24	42	7.38
6092.81	1.89	-0.82	33	7.41	48	7.18	50	7.15
6126.21	1.07	-1.16	74	7.40	97	7.05	—	—
6146.22	1.87	-1.06	21	7.45	29	7.31	21	7.45
6303.75	1.44	-1.49	40	7.15	35	7.27	38	7.21
6312.23	1.46	-1.49	33	7.23	40	7.15	23	7.48
Ti II								
5336.78	1.58	-1.58	97	7.50	111	7.24	—	—
6559.57	2.05	-2.14	50	7.22	46	7.31	59	7.06
6606.97	2.06	-2.77	29	6.97	32	6.92	29	6.97
VI								
5646.10	1.05	-1.19	47	7.78	32	8.02	39	7.92
5657.44	1.06	-1.03	51	7.84	38	8.06	42	7.98
5668.35	1.08	-1.07	36	8.03	38	8.00	34	8.06
5737.06	1.06	-0.54	52	8.33	68	8.10	62	8.18

Т А Б Л И Ц А 2 (продолжение)

Элемент, λ	χ	$\lg gf$	γ Tau		δ Tau		ϵ Tau	
			W_λ	$-\lg \epsilon_i$	W_λ	$-\lg \epsilon_i$	W_λ	$-\lg \epsilon_i$
5830.67	3.11	0.70	13	8.07	17	7.96	11	8.13
5846.26	3.13	0.81	17	8.00	27	7.78	21	7.92
6058.16	1.04	-1.42	32	7.82	28	7.93	27	7.96
6111.64	1.04	-0.78	68	7.90	63	7.97	71	7.86
6135.36	1.05	-0.81	64	7.92	53	8.08	76	7.74
6150.14	0.30	-1.53	74	7.95	73	7.96	88	7.75
6274.64	0.27	-1.69	62	8.02	55	8.12	45	8.38
6285.15	0.28	-1.50	66	8.14	67	8.12	68	8.11
6292.80	0.29	-1.46	114	7.44	97	7.72	114	7.45
6357.28	1.85	-1.26	15	7.52	21	7.33	15	7.52
6531.41	1.22	-0.99	35	8.02	27	8.17	35	8.03
6605.91	1.19	-1.48	32	7.62	29	7.69	31	7.64
C:I								
5340.44	3.44	-0.70	74	5.81	—	—	—	—
5628.64	3.42	-0.54	57	6.30	58	6.29	67	6.12
5729.19	3.84	-1.13	14	6.13	26	5.84	18	6.03
5746.41	3.85	-1.09	20	6.01	18	6.06	18	6.06
5783.86	3.32	-0.27	85	6.22	92	6.08	97	5.99
5787.92	3.32	-0.19	86	6.26	91	6.16	70	6.56
6330.02	0.94	-2.95	82	6.45	86	6.38	85	6.40
6537.92	1.00	-3.87	16	6.60	25	6.37	22	6.47
6612.19	4.16	-0.78	19	5.98	11	6.36	14	6.21
MnI								
5377.59	3.84	-0.14	98	6.16	112	5.89	109	5.82
5399.50	3.85	-0.31	80	6.31	78	6.34	93	6.05
5432.59	0.00	-3.72	161	6.00	148	6.24	155	6.13
5457.50	2.16	-2.88	40	6.23	47	6.26	52	6.16
FeI								
5321.10	4.42	-1.34	76	4.38	84	4.24	76	4.38
5322.04	2.27	-2.88	—	—	122	4.47	127	4.37
5326.81	4.40	-2.04	28	4.60	34	4.46	40	4.36
5365.40	3.56	-1.30	125	4.47	131	4.36	137	4.24
5367.47	4.40	0.28	181	4.25	169	4.40	194	4.13
5373.71	4.47	-0.81	95	4.51	91	4.59	102	4.36
5374.75	3.57	-3.82	13	4.21	—	—	15	4.09
5379.57	3.68	-1.53	90	4.78	93	4.72	93	4.72
5383.37	4.29	0.50	204	4.37	—	—	216	4.29
5386.33	4.14	-1.82	45	4.77	56	4.58	56	4.58
5395.21	4.43	-1.79	36	4.66	37	4.64	—	—
5398.28	4.43	-0.68	112	4.37	107	4.50	112	4.37
5401.26	4.32	-1.83	57	4.36	41	4.64	60	4.48
5406.77	4.35	-1.52	49	4.81	56	4.61	60	4.58
5417.03	4.40	-1.52	45	4.77	—	—	56	4.56
5421.83	4.53	-1.93	29	4.52	25	4.64	—	—
5441.34	4.29	-1.64	49	4.68	52	4.66	45	4.79
5443.41	4.10	-2.97	16	4.31	21	4.16	21	4.16
5461.55	4.43	-1.69	35	4.79	47	4.53	41	4.66
5464.28	4.14	-1.66	66	4.58	57	4.74	76	4.41
5467.77	3.53	-3.39	19	4.42	12	4.65	20	4.39
5522.44	4.19	-1.56	72	4.51	77	4.40	62	4.68
5525.54	4.21	-1.31	100	4.19	92	4.37	69	4.78
5536.59	2.82	-3.86	27	4.55	22	4.72	18	4.83
5539.28	3.63	-2.66	50	4.43	48	4.45	42	4.56
5560.21	4.42	-1.15	75	4.61	80	4.51	69	4.70
5568.86	3.63	-2.93	33	4.47	27	4.60	27	4.60
5569.62	3.40	-0.32	211	4.49	—	—	219	4.44
5577.02	5.01	-1.63	27	4.34	23	4.45	29	4.30
5579.34	4.21	-2.47	42	4.09	37	4.20	—	—
5608.97	4.19	-2.38	37	4.43	33	4.39	33	4.37
5618.64	4.19	-1.40	89	4.35	83	4.47	78	4.55
5619.59	4.37	-1.53	78	4.23	78	4.23	86	4.09
5638.26	4.20	-1.65	132	4.18	144	3.96	117	4.43
5646.69	4.24	-2.51	27	4.29	25	4.38	33	4.21
5651.46	4.45	-1.88	43	4.40	49	4.30	42	4.39
5652.31	4.20	-1.88	51	4.50	59	4.37	68	4.20
5653.88	4.37	-1.51	78	4.24	78	4.25	84	4.15
5661.35	4.27	-1.95	61	4.23	49	4.43	68	4.10

Элемент, λ	χ	$\lg gf$	γ Tau		δ Tau		ϵ Tau	
			W_λ	$-\lg \epsilon_\gamma$	W_λ	$-\lg \epsilon_\delta$	W_λ	$-\lg \epsilon_\epsilon$
5677.67	4.09	-2.71	20	4.45	21	4.43	25	4.35
5680.25	4.17	-2.40	36	4.32	49	4.09	49	4.09
5701.54	2.55	-2.13	169	4.18	169	4.18	169	4.18
5705.47	4.28	-1.50	77	4.37	84	4.23	74	4.43
5717.84	4.28	-1.10	104	4.29	99	4.39	114	4.10
5731.76	4.26	-1.16	91	4.52	99	4.37	97	4.40
5741.85	4.24	-1.73	56	4.54	52	4.66	69	4.35
5752.03	4.53	-1.00	85	4.45	100	4.16	99	4.17
5753.12	4.24	-0.65	120	4.47	141	4.12	123	4.42
5760.34	3.63	-2.53	56	4.45	64	4.33	64	4.32
5793.92	4.20	-1.73	55	4.63	59	4.56	80	4.18
5805.76	5.03	-1.48	42	4.21	37	4.30	40	4.24
5806.72	4.61	-0.92	85	4.47	110	4.18	80	4.54
5807.78	3.28	-3.41	38	4.27	37	4.32	31	4.43
5809.25	3.87	-1.74	81	4.55	100	4.20	92	4.34
5811.92	4.12	-2.48	28	4.46	24	4.55	31	4.41
5815.21	4.15	-2.00	40	4.69	59	4.36	40	4.70
5826.63	4.23	-2.99	20	3.98	21	3.97	14	4.20
5827.88	3.27	-3.30	41	4.38	40	4.39	44	4.32
5834.02	2.61	-3.95	46	4.40	53	4.29	44	4.43
5845.26	5.01	-1.90	18	4.31	26	4.12	14	4.44
5849.66	3.68	-3.06	18	4.67	17	4.69	15	4.77
5852.22	3.26	-1.28	65	4.52	73	4.40	61	4.60
5855.12	4.59	-1.66	35	4.64	31	4.72	37	4.60
5856.07	4.28	-1.66	49	4.72	48	4.73	65	4.45
5858.76	4.20	-2.30	26	4.60	34	4.44	37	4.36
5859.60	4.53	-0.63	102	4.52	111	4.34	106	4.44
5861.10	4.28	-2.48	24	4.39	27	4.34	23	4.40
5862.35	4.53	-0.36	122	4.41	122	4.41	116	4.50
5881.27	4.59	-1.87	42	4.25	42	4.25	41	4.30
5902.51	4.57	-1.91	24	4.62	26	4.60	34	4.41
5905.56	4.63	-0.87	74	4.67	98	4.21	82	4.53
5916.25	2.44	-2.97	123	4.26	135	4.06	123	4.26
5927.79	4.63	-1.16	62	4.60	64	4.56	62	4.60
5929.69	4.53	-1.34	54	4.67	58	4.60	60	4.55
5930.16	4.63	-0.63	107	4.28	123	4.01	115	4.17
5934.65	3.91	-1.17	113	4.50	124	4.29	110	4.55
5956.56	0.86	-4.54	130	4.50	119	4.70	136	4.40
5987.05	4.77	-0.38	120	4.16	99	4.55	99	4.54
6005.50	2.59	-3.58	63	4.53	72	4.39	83	4.19
6015.25	2.21	-4.70	32	4.33	35	4.30	20	4.57
6019.35	3.56	-3.43	32	4.07	27	4.21	22	4.33
6034.03	4.35	-2.47	32	4.20	24	4.39	22	4.45
6035.33	4.28	-2.60	24	4.27	22	4.32	12	4.63
6054.09	4.35	-2.39	18	4.55	—	—	27	4.32
6055.98	4.71	-0.55	105	4.33	126	3.96	115	4.17
6082.71	2.21	-3.67	105	4.15	115	4.00	110	4.09
6093.65	4.59	-1.44	64	4.34	53	4.52	50	4.56
6094.41	4.63	-1.72	37	4.47	42	4.40	28	4.66
6096.68	3.97	-1.90	66	4.55	73	4.44	70	4.47
6102.17	4.81	-0.29	122	4.44	127	4.36	133	4.24
6151.61	2.17	-3.40	111	4.39	122	4.22	128	4.09
6159.40	4.59	-2.01	27	4.42	30	4.39	39	4.21
6165.36	4.12	-1.62	92	4.22	80	4.41	97	4.08
6187.40	2.82	-4.32	27	4.11	23	4.25	26	4.18
6187.98	3.93	-1.74	107	4.03	94	4.28	98	4.21
6226.73	3.87	-2.20	65	4.39	65	4.39	65	4.39
6229.20	2.84	-3.04	92	4.31	89	4.36	108	4.03
6270.23	2.85	-2.59	114	4.36	125	4.18	114	4.27
6271.28	3.32	-2.83	54	4.58	65	4.39	47	4.69
6293.91	4.82	-1.80	30	4.36	28	4.39	20	4.61
6314.50	2.82	-3.22	88	4.22	87	4.21	93	4.11
6380.75	4.19	-1.45	95	4.29	83	4.50	88	4.39
6385.72	4.71	-1.97	27	4.37	26	4.39	27	4.37
6392.53	2.27	-4.07	67	4.37	63	4.43	63	4.43
6436.40	4.19	-2.58	21	4.49	25	4.42	22	4.47
6509.60	4.07	-3.11	13	4.34	19	4.18	12	4.36

Элемент, λ	χ	$\lg gf$	γ Tau		δ Tau		ϵ Tau	
			W_λ	$-\lg \epsilon_i$	W_λ	$-\lg \epsilon_i$	W_λ	$-\lg \epsilon_i$
6551.69	0.99	-5.62	47	4.63	40	4.79	49	4.63
6556.79	4.79	-1.98	38	4.06	24	4.36	39	4.03
6574.25	0.99	-5.05	109	4.29	85	4.66	109	4.29
6591.32	4.51	-2.15	22	4.45	22	4.46	19	4.53
6608.03	2.28	-4.06	65	4.43	46	4.73	55	4.57
6627.50	4.55	-1.66	46	4.51	50	4.45	48	4.47
6646.96	2.61	-4.06	46	4.35	39	4.45	50	4.28
6648.11	3.24	-5.74	68	4.21	60	4.33	50	4.47
FeII								
5414.06	3.22	-3.73	41	4.50	—	—	58	4.14
5425.25	3.20	-3.28	60	4.60	65	4.49	55	4.70
5991.32	3.15	-3.68	45	4.52	52	4.43	54	4.33
6084.10	3.20	-3.92	48	4.18	48	4.18	39	4.37
6149.23	3.89	-2.87	53	4.38	56	4.33	62	4.21
6247.75	3.89	-2.44	75	4.37	66	4.54	65	4.55
6416.92	3.89	-2.87	41	4.63	41	4.63	26	4.99
6456.38	3.90	-2.23	75	4.57	72	4.64	75	4.57
CoI								
5342.69	4.02	0.71	44	7.57	52	7.42	—	—
5352.09	3.58	0.01	58	7.12	60	7.06	64	7.15
5359.19	4.15	0.21	20	7.42	28	7.70	33	7.15
5381.76	4.24	-0.03	11	7.39	14	7.33	20	7.05
5454.59	4.07	-0.04	20	7.30	29	7.12	30	7.10
5523.29	2.33	-2.03	35	6.90	32	7.05	29	7.11
5530.79	1.71	-1.81	77	7.14	66	7.30	91	6.87
5647.19	2.28	-1.93	57	6.88	63	6.73	59	6.70
6455.00	3.63	-0.10	29	7.51	31	7.47	39	7.30
6632.39	2.28	-1.62	44	7.27	32	7.54	27	7.70
NiI								
5435.89	1.99	-2.46	86	6.11	108	5.70	108	5.70
5462.50	3.85	-1.04	66	5.74	57	6.10	71	5.82
5578.75	1.68	-2.70	122	5.41	106	5.88	116	5.70
5589.39	3.90	-1.21	73	5.40	59	5.64	62	5.58
5593.69	3.90	-0.84	57	6.10	67	5.92	58	6.08
5749.29	3.94	-2.00	18	5.64	—	—	29	5.49
5805.19	4.17	-0.65	61	5.88	61	5.88	63	5.84
5847.00	1.68	-3.45	73	5.74	76	5.69	61	5.93
6108.11	1.68	-2.47	143	5.54	139	5.64	146	5.55
6128.97	1.68	-3.38	74	5.82	88	5.58	88	5.58
6175.37	4.09	-0.60	80	5.69	69	5.89	80	5.70
6177.29	1.83	-3.58	74	5.43	72	5.37	86	5.08
6186.71	4.10	-0.98	69	5.63	56	5.85	69	5.63
6204.59	4.09	-1.15	52	5.65	43	5.83	51	5.66
6322.16	4.15	-1.28	30	5.85	52	5.47	40	5.63
6327.59	1.68	-3.09	120	5.36	100	5.62	105	5.62
6370.39	3.54	-1.98	37	5.68	53	5.43	39	5.70
6378.29	4.15	-0.89	44	5.97	55	5.77	67	5.57
6482.79	1.93	-2.79	112	5.49	117	5.41	109	5.24
6532.89	1.93	-3.39	57	5.80	59	5.77	54	5.84
6586.29	1.95	-2.79	109	5.54	98	5.75	114	5.49
6598.59	4.23	-1.01	34	5.95	38	5.87	38	5.87
6635.09	4.42	-0.83	48	5.67	41	5.82	32	5.97
YI								
5630.13	1.36	0.30	25	9.33	—	—	23	9.40
6222.58	0.00	-1.73	10	9.37	8	9.51	9	9.46
6435.01	0.07	-0.99	—	—	10	10.09	11	10.05
YII								
5402.77	1.84	-1.41	26	9.19	23	9.27	24	9.21
5728.90	1.84	-1.14	16	9.72	12	9.94	22	9.54
ZrI								
5885.60	0.07	-1.76	17	9.03	27	8.85	21	8.98
6134.57	0.00	-1.88	19	8.98	15	9.09	25	8.86
6140.50	0.52	-1.19	15	9.20	14	9.25	12	9.33
MoI								
5570.46	1.33	-0.56	30	9.47	17	9.75	28	9.50

ТАБЛИЦА 2 (окончание)

Элемент, λ	χ	$\lg gf$	γ Tau		δ Tau		ϵ Tau	
			W_λ	$-\lg \epsilon_i$	W_λ	$-\lg \epsilon_i$	W_λ	$-\lg \epsilon_i$
5750.41	1.42	-1.10	13	9.33	18	9.25	14	9.30
6030.66	1.53	-0.71	14	9.55	11	9.68	18	9.43
BaII								
5853.67	0.60	-1.16	122	9.62	116	9.71	122	9.62
LaII								
5808.30	0.00	-2.18	16	10.44	13	10.55	—	—
6390.47	0.32	-2.43	18	9.79	19	9.80	17	9.87
CeII								
5518.48	1.16	-0.75	17	9.77	10	10.09	11	10.00
5768.89	1.32	-0.65	12	9.88	9	10.02	—	—
PrII								
6165.94	0.91	-1.08	10	10.32	—	—	14	10.18
NdII								
5431.52	1.12	-0.22	15	0.64	14	10.76	18	10.60
5442.26	0.68	-1.60	20	9.69	20	9.68	21	9.65
5474.73	0.99	-1.60	13	9.51	14	9.47	13	9.52
EuII								
6645.10	1.38	0.08	25	11.13	20	11.32	21	11.30

б) по спектральным индексам [15] $\lg g = 2.9 \pm 0.09$; из работы [16] $-\lg g = 2.6 \pm 0.03$;

в) по фотометрическим индексам [17] $\lg g = 2.6 \pm 0.04$;

г) из условия ионизационного равновесия для линий нейтрального железа [18] $\lg g = 2.7 \pm 0.1$ (обратная дисперсия $15 \text{ \AA}/\text{мм}$) и для линий нейтрального железа и титана в данной работе $\lg g = 2.83 \pm 0.4$ и $\lg g = 2.80 \pm 0.10$ соответственно.

С учетом вышеизложенного расчет содержаний элементов проведен для моделей с $T_{\text{эф}} = 5000 \text{ K}$, $\lg g = 2.25$ и 3.0 , с солнечным химическим составом, для двух значений микротурбулентной скорости $v_t = 1.6$ и 1.8 км/с . Более подробно о выборе параметров моделей и микротурбулентной скорости изложено в [18].

Силы осцилляторов $\lg gf$ взяты в основном из [19—21], а в отдельных случаях — из [14, 22]. В табл. 2 приведены значения $\lg gf$, используемые в настоящей работе.

ТАБЛИЦА 3

Результаты анализа отклонений от ЛТР

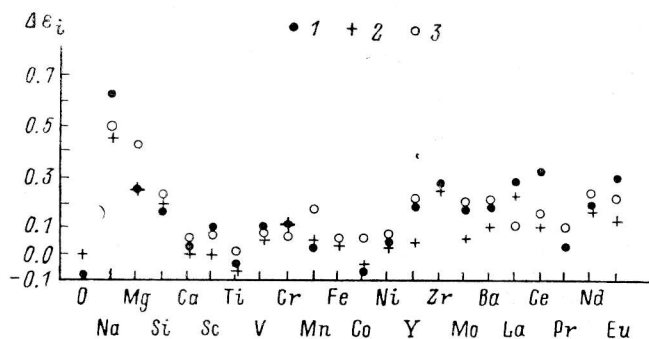
χ	γ Tau		δ Tau		ϵ Tau	
	$\lg \epsilon_{\text{Fe}} (2.25)$	$\lg \epsilon_{\text{Fe}} (3.0)$	$\lg \epsilon_{\text{Fe}} (2.25)$	$\lg \epsilon_{\text{Fe}} (3.0)$	$\lg \epsilon_{\text{Fe}} (2.25)$	$\lg \epsilon_{\text{Fe}} (3.0)$
$\chi \leq 3.5$	4.41	4.37	4.44	4.39	4.41	4.36
$\chi > 3.5$	4.47	4.44	4.45	4.41	4.44	4.40

Для сравнения содержаний химических элементов в атмосферах исследуемых звезд с содержанием в атмосфере Солнца был рассчитан химический состав атмосферы Солнца с теми же атомными параметрами линий, что и для исследуемых звезд. Использовалась HSRA-модель атмосферы Солнца [23], эквивалентные ширины линий $W_{\lambda\odot}$ брались из работы [10]. Расчеты содержаний химических элементов в атмосферах звезд и Солнца выполнены по программе WIDTH-6 [24]. Основные результаты приведены в табл. 2, где представлены: название химического элемента; λ — длина волны, \AA ; χ — потенциал возбуждения нижнего уровня, эВ; $\lg gf$ — значения сил осцилляторов; W_λ — эквивалентная ширина линий поглощения, m\AA ; $\lg \epsilon_i$ — логарифм содержания i -го химического элемента, определенного по данной линии для $\lg g = 3.0$ и $v_t = 1.8 \text{ км/с}$ в шкале $\lg \epsilon_{\text{H}} = 0.0$.

В целях более детального исследования физических условий в атмосферах холодных звезд представляется интересным провести исследование отклонения от локального термодинамического равновесия.

Для одной из исследуемых звезд нами ранее был проведен эмпирический анализ по линиям нейтрального железа [25]. В работе использовались 15 линий с $\chi \leq 3.5$ эВ и 90 линий с $\chi > 3.5$ эВ. Содержания железа $\lg \epsilon_{\text{Fe}}$, определенные по линиям с высоким и низким потенциалом, практически совпали. В настоящей работе расширен список линий нейтрального железа в атмосферах звезд γ , δ и ϵ Тау. Результаты приведены в табл. 3, где $\lg \epsilon_{\text{Fe}}$ ($\lg g$) — содержание железа, определенное для различных значений $\lg g = 2.25$ и 3.0 для линий с высоким и низким потенциалом возбуждения нижнего уровня.

С увеличением количества линий с $\chi \leq 3.5$ отмечено некоторое отличие в содержаниях для линий с низким и высоким потенциалом возбуждения



Распределение содержания химических элементов в атмосферах исследуемых звезд по отношению к Солнцу.

1 — γ Тау; 2 — δ Тау; 3 — ϵ Тау.

в случае звезды γ Тау, которое лежит в пределах ошибки определения; что же касается звезд δ Тау и ϵ Тау, то здесь отличия минимальные. При анализе атмосфер K-гигантов на данном наблюдательном материале с применением моделей Белла [9] и работе с эквивалентными ширинами линий использование приближения ЛТР вполне оправдано. Для обнаружения более тонких эффектов отклонения от ЛТР требуются спектральное разрешение выше 0.10 \AA и анализ профилей линий.

На рисунке приведено распределение содержания химических элементов, интерполированное на $\lg g = 2.8$, в атмосфере исследуемых звезд по отношению к Солнцу. При сравнении с результатами Номото и других видно, что химический состав звезд-гигантов Гиад вполне объясняется их происхождением из межзвездной среды, обогащенной одинаковыми вкладами тяжелых элементов от взрывов сверхновых первого и второго типов.

Точность определения химического состава составляет 0.20 dex по линиям железа и других элементов, представленных многочисленными линиями, и не выше 0.5 dex для элементов, представленных одной-двумя линиями. Чтобы увеличить количество линий и надежность определения содержания элементов за железным пиком, нами было проведено исследование всех линий этих элементов, обнаруженных различными авторами в спектрах поздних звезд. Несмотря на то что в спектрах K-гигантов отождествляется около 160 линий элементов начиная с иттрия, после тщательного анализа осталась всего 21 линия. При этом различие в определении солнечного содержания в случае неодима по отдельным линиям достигает 10 раз, что может быть связано с неточностями определений сил осцилляторов или эквивалентных ширин этих линий в спектре Солнца ($\lambda_1 = 5431.52$, $\lg \epsilon_{\lambda_1} = -10.51$, $\lambda_2 = 5442.26$, $\lg \epsilon_{\lambda_2} = -9.57$).

Содержание элементов в атмосферах K-гигантов Гиад отличается от солнечного. При этом установлен дефицит кислорода, избыток натрия на $\sim 0.5 \text{ dex}$ и элементов начиная с иттрия — на $\sim 0.2 \text{ dex}$.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам САО АН СССР В. Г. Ключковой, В. Е. Панчуку, И. Ф. Бикмаеву и С. Н. Ключкову, а также сотрудникам АО ОГУ С. В. Куденко, М. П. Ясинской, Э. М. Ивакиной за помощь, оказанную в работе.

Литература

1. Холопов П. Н. Звездные скопления. М.: Наука, 1981. 480 с.
2. Фотометрический и спектральный каталог ярких звезд / Н. С. Комаров, А. В. Драгунова, В. Ф. Карамыш и др. Киев: Наук. думка, 1979. 535 с.
3. Griffin R. F., Gunn J. E. Hyades giants δ and θ' Tauri as spectroscopic binaries // *Astron. J.* 1977. 82, nr. 2. P. 176-178.
4. Paszunski B. Evolution of Single Stars. 1: Stellar Evolution From Main Sequence To White Dwarf Or Carbon Ignition // *Acta Astron.* 1970. 20, nr 2. P. 47-58.
5. Масевич А. Г., Тутуков А. В. Эволюция звезд: теория и наблюдения. М.: Наука, 1988. 280 с.
6. Branch D., Lambert D. L., Tomkin J. The iron abundance in the Hyades cluster // *Astrophys. J. Letters.* 1980. 241. L83.
7. Улучшение характеристик Основного звездного спектрографа БТА. Повышение эффективности камеры № 1/Э. Б. Гажур, И. Д. Найденов, В. Е. Панчук и др. // *Астрофиз. исслед. (Изв. САО).* 1986. 23. С. 105-110.
8. Цымбал В. В. Синтетические спектры М-звезд: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. Одесса, 1980.
9. A Grid of Model Atmospheres For Metal-Deficient Giant Stars / R. A. Bell, R. Eriksson, B. Gustafsson, A. Nordlund // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1978. 34. P. 229-240.
10. Moore S. E., Minnaert M. G., Houtgast J. The Solar Spectrum 2935-8770A — NBS Monogr. 61. Wash.: US Govern. Print. Off, 1966.
11. Kurucz R. L., Reutemann O. P. A Table of Semiempirical Values // *SAO, Special Report.* 1975. Nr 362. P. 730-840.
12. Мишенина Т. В. Эквивалентные ширины линий в спектрах 10 звезд-гигантов. Деп. в УкрНИИНТИ 10.12.85, № 2705-Ук-85. 14 с.
13. Мишенина Т. В., Комаров Н. С., Панчук В. Е. Анализ атмосфер К-гигантов. Деп. в УкрНИИНТИ 14.04.87. № 1230-Ук87. С. 17-22.
14. Effective Temperatures of Late-Type Stars: The Field Giant From K0 to M6 / S. T. Ridgway, R. R. Joyce, N. M. White, R. F. Wing // *Astrophys. J.* 1980. 235. P. 126-137.
15. Бурнашов В. Н. Определение эффективных температур, ускорений силы тяжести и параметра металличности поздних звезд — на основе данных о распределении энергии в их спектрах // *Изв. КрАО.* 1983. 67. С. 13-33.
16. Мотрич В. Д. Каталог фундаментальных характеристик звезд поздних спектральных классов. Деп. в УкрНИИНТИ 11.08.88, № 1926-Ук88. 33 с.
17. Коротина Л. В., Драгунова А. В., Комаров Н. С. Каталог фундаментальных характеристик 980 звезд-гигантов поздних спектральных классов. Деп. в УкрНИИНТИ 18.08.88, № 2037-Ук88, 34 с.
18. Мишенина Т. В., Панчук В. Е., Комаров Н. С. Химический состав К-гигантов Гиад // *Астрофиз. исслед. (Изв. САО).* 1986. 22. С. 13-16.
19. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Построение фундаментальных систем сил осцилляторов и содержание химических элементов в фотосфере Солнца. Препринт ИТФ АН УССР. 1980. 36 с.
20. Костык Р. И. Силы осцилляторов линий титана, хрома, железа и никеля. Препринт ИТФ-82-33Р. 1982. 36 с.
21. Переход А. В. Значения сил осцилляторов избранных спектральных линий некоторых химических элементов. — В печати.
22. Боярчук А. А., Боярчук М. Е. Спектроскопическое исследование трех сверхгигантов класса F // *Изв. КрАО.* 1981. 63. С. 66-85.
23. Gingerich O., Noyes R. W., Kalkofen W. The Harvard-Smithsonian Reference Atmosphere // *Solar Phys.* 1971. 18. P. 317-375.
24. Kurucz R. L. ATLAS: A Computer Program For Calculating Model Stellar Atmospheres. SAO. Special Report. 1970. Nr 309. 291 p.
25. Мишенина Т. В. Эмпирический анализ отклонений от ЛТР в атмосферах К-гигантов по линиям нейтрального железа. Деп. в УкрНИИНТИ № 430-Ук87. С. 11-14.

Поступила в редакцию
14 февраля 1989 г.