

## КРИВАЯ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРАХ F-КАРЛИКОВ

*В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук*

По спектрограммам, полученным на 6-м телескопе в области  $\lambda 3900-6600 \text{ \AA}$  (спектральное разрешение  $0.25 \text{ \AA}$ ), определено содержание 15 химических элементов в атмосферах пяти F-карликов из скопления Гиады, трех F-карликов из скопления Волосы Вероники и спектроскопического стандарта  $\alpha \text{ CMi}$ . Кроме того, исследован химический состав пяти F-карликов поля.

Показано, что химический состав F-карликов скоплений и F-карликов поля совпадает и равен солнечному. Выполнено сравнение химического состава A- и F-звезд скоплений, подтвержден сделанный авторами ранее вывод о химической однородности исследованной выборки звезд 1-го типа населения. В результате сравнения спектров звезд поля и скоплений подтвержден вывод об аномальном усилении линий в спектрах F-карликов Гиад.

From the spectrogram, obtained with the 6-meter telescope within the range  $\lambda 3900-6600 \text{ \AA}$  (spectral resolution  $0.25 \text{ \AA}$ ) abundance of 15 chemical elements has been determined in the atmospheres of 5 F-dwarfs from the Hyades cluster, 3 F-dwarfs from the Coma Berenices cluster, and for the spectroscopic standard  $\alpha \text{ CMi}$ . Besides, chemical composition of 5 field F-dwarfs has been studied.

It is shown that chemical composition of F-dwarfs in the clusters and that of field F-dwarfs is the same and equals solar. A comparison has been made of chemical composition of A- and F-stars in the clusters. The inference on the chemical homogeneity of the studied sample of population 1 stars made previously by the authors has been confirmed. A comparison of the spectra of field stars and members of the clusters confirms a conclusion on the anomalous enhancement of lines in the spectra of the Hyades F-dwarfs.

Информация о распространенности химических элементов в атмосферах звезд — представителей разных типов населения Галактики — необходима для анализа ряда важнейших астрофизических проблем: нуклеосинтеза на различных стадиях звездной эволюции, свойств начальной функции масс для разных типов звездных населений, эволюции химического состава Галактики. Кроме этого, детальные исследования химического состава звездных атмосфер стимулируют развитие теории звездных атмосфер, в частности анализ феноменов химической пекулярности, металличности, изучение движений в звездных атмосферах, исследование механизмов уширения спектральных линий, совершенствование теории переноса излучения.

В течение нескольких лет на 6-м телескопе выполняется обширная программа спектроскопического изучения химического состава звезд, находящихся на различных эволюционных стадиях. К настоящему времени получены результаты для 21 A-звезды из рассеянных скоплений и динамических групп [1], для 10 A-звезд горизонтальной ветви шаровых скоплений в галактическом поле [2, 3], начато исследование химического состава F-карликов разных типов населений [4, 5, 6, 7]. Отметим наиболее существенные особенности нашего подхода.

1. Исследуются звезды наиболее низкой светимости, еще доступные нашим наблюдательным средствам. Поэтому трудности, характерные для анализа атмосфер звезд высокой светимости, не влияют на результаты определения химического состава.

2. По возможности исследуются звезды, являющиеся членами скоплений или других группировок, относительно которых можно предполагать общность происхождения. Это позволяет точнее судить об эволюционной стадии объектов.

3. Для каждого спектрального класса исследуется выборка звезд, что повышает статистическую достоверность выводов.

4. Звезды каждой части программы незначительно различаются по эффективной температуре, что позволяет применять для анализа одну сетку теоретических моделей атмосфер, стандартный набор спектральных линий, единообразный подход к определению основных параметров атмосфер. Таким образом, можно ожидать, что наши результаты не отягощены серьезными систематическими ошибками.

В данной работе для атмосфер F-карликов из скоплений Гиады и Волосы Вероники получена кривая распространенности химических элементов, т. е. зависимость содержания химического элемента от его номера. В качестве стандартной звезды мы выбрали Процион ( $\alpha$ CMi, F5 IV—V), параметры атмосфер и химический состав которого исследованы достаточно детально (см., например, [8, 9]).

Список звезд, параметры атмосфер, результаты обработки. В табл. 1 приведены номера исследованных звезд по каталогу HD, эффективные температуры

ТАБЛИЦА 1  
Параметры атмосфер исследованных звезд

Звезда	$T_e$	$\lg g$	$\xi_t$
Гиады			
26462	7000	4.2	2.3
27561	6500	4.1	2.6
27991	6240	3.9	2.3
28406	6440	3.9	2.0
28736	6540	3.8	2.0
Волосы Вероники			
106103	6700	4.3	1.8
107168	8200	4.1	3.0
107213	6100	3.8	2.6
F-карлики поля			
15798	6400	4.0	0.6
23754	6550	3.9	0.9
30652	6400	4.3	0.5
43042	6510	4.3	0.8
43386	6520	4.3	0.5
$\alpha$ CMi	6500	4.0	1.7

$T_e$ , логарифм ускорения силы тяжести в атмосфере  $\lg g$  и значения микротурбулентной скорости  $\xi_t$ . Для звезд — членов скоплений основные параметры атмосфер определены ранее [5], параметры атмосфер F-карликов поля определялись в процессе выполнения данной работы. В основе метода определения  $T_e$  и  $g$  лежит сравнение наблюдаемых и теоретических характеристик звездных атмосфер: показателей цвета  $b-y$ ,  $c_1$ , эквивалентных ширин  $W$  и полуширин  $\Delta\lambda$  на заданном уровне остаточной интенсивности  $r$  линий бальмеровской серии водорода  $H_\delta$ ,  $H_\gamma$  и  $H_\alpha$ . О деталях используемой нами методики определения  $T_e$  и  $g$  подробнее можно прочесть в [1, 4, 5, 7, 10], здесь же в качестве примера на рис. 1 приводим типичную диаграмму  $T_e$ — $\lg g$ , которая построена с целью определения параметров атмосферы F-карлика HD 28736 из скопления Гиады. Помимо вышеперечисленных параметров на рис. 1 нанесены линии ионизационного равновесия для атомов железа (Fe, Fe<sup>+</sup>), титана (Ti, Ti<sup>+</sup>) и хрома (Cr, Cr<sup>+</sup>), т. е. линии, для каждой точки которых выполняется условие равенства полного содержания данного элемента, определенного отдельно по спектрам нейтральной и ионизованной компонент.

Анализ химического состава F-карликов выполнен методом моделей атмосфер с применением сетки моделей [11]. Вычисления по программе WIDTH6 выполнены на ЭВМ ЕС 1035.

Спектрограммы с разрешением  $\delta\lambda = 0.2 \div 0.3$  в области длин  $\lambda$  волн  $\lambda 3900 - 6600 \text{ \AA}$  получены на камере № 2 Основного звездного спектрографа 6-м телескопа. Детальное отождествление линий в спектрах проводилось с привлечением атласа спектра Проциона [12], а также списков линий из работ [8, 13, 14]. Ранее [4] при анализе спектра нейтрального железа у F-карликов Гиад было обнаружено anomальное (по сравнению со спектром Проциона) усиление интенсивностей линий с эквивалентными ширинами  $W > 150 \text{ m\AA}$ . Поэтому для исследования кривой распространенности химических элементов в данной работе привлечены только линии с  $W < 150 \text{ m\AA}$ , список этих линий дан в табл. 2.

Для проверки обнаруженного нами эффекта anomального усиления линий в спектрах F-карликов Гиад проведено дополнительное сравнение их с линиями в спектрах F-карликов поля. С этой целью из списка [15] были выбраны пять

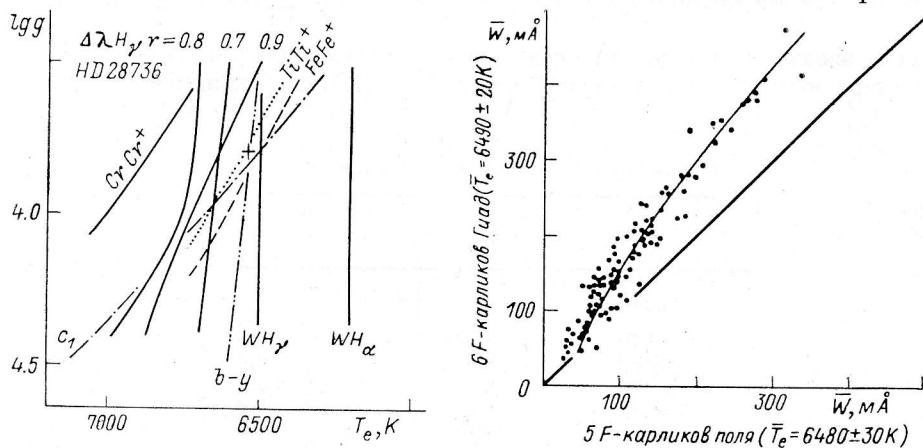


Рис. 1. К процедуре определения эффективной температуры  $T_e$  и ускорения силы тяжести  $g$  в атмосфере F-карлика.

Рис. 2. Сравнение средних эквивалентных ширин линий в спектрах двух групп F-карликов одинаковой эффективной температуры.

По оси абсцисс — F-карликов поля, по оси ординат — F-карликов Гиад.

звезд спектрального класса F5 V. Полученный для них на ОЗСП БТА спектральный материал по всем параметрам (спектральный диапазон, обратная дисперсия, высота спектрограммы, количество спектрограмм и спектральное разрешение) идентичен материалу для F-карликов Гиад из [4]. Параметры атмосфер F-карликов поля определены по той же методике, что и для F-карликов Гиад и Волос Вероники, и приведены в табл. 1. Среднее значение эффективной температуры для пяти F-карликов поля равно  $(6482 \pm 30) \text{ K}$ , а для шести F-карликов Гиад из [4, 5]  $T_e = (6487 \pm 20) \text{ K}$ . Ввиду этого, а также вследствие того, что подавляющее число линий в спектрах F-карликов принадлежит к нейтральным атомам, возможно сравнение средних эквивалентных ширин каждой линии, измеренной в спектрах обеих групп звезд. Такое сравнение, выполненное на рис. 2, подтверждает наш прежний вывод об усилении в спектрах F-карликов Гиад линий с  $W > 150 \text{ m\AA}$ .

Значения микротурбулентной скорости  $\xi_t$ , приведенные в табл. 1, для F-карликов — членов скоплений и для Проциона взяты из [5], а для пяти F-карликов поля определены в данной работе с сохранением прежней методики, т. е. из условия независимости содержания железа  $\lg \epsilon(\text{Fe})$  от эквивалентной ширины используемой линии [10]. Ссылки на использованные источники сил осцилляторов даны в [1, 10], для нейтрального железа значения  $gf$  взяты из [16]. В табл. 3 приведены результаты измерений спектрограмм пяти F-карликов поля.

**Обсуждение результатов.** Результаты определения содержания химических элементов  $\lg \epsilon(X)$  приведены в табл. 4. Под обозначением элемента указано типичное число использованных линий  $n$ . Точность определения  $\Delta \lg \epsilon(X)$

Т А Б Л И Ц А 2

Эквивалентные ширины  $W$  линий в спектрах Проциона и звезд — членов скопления, мÅ

Элемент, $\lambda$ , Å	$\alpha$ CMi	26462	27561	27991	28406	28736	106103	107168	107213
NaI									
5682.63	101	65	—	—	88	95	75	60	—
5688.20	104	92	—	—	—	—	85	88	98
6154.22	20	20	33	40	—	—	24	—	28
6160.75	32	—	67	75	49	79	49	14	40
MgI									
5711.07	65	55	—	95	89	79	81	33	98
SiI									
5645.66	14	28	37	35	30	—	24	—	42
5665.60	26	20	33	35	60	38	—	—	36
5684.52	65	50	104	—	54	68	32	38	65
5690.47	32	14	48	60	38	48	35	40	37
5708.44	79	54	98	—	67	95	68	36	76
5772.26	40	32	60	50	—	38	—	—	66
5793.13	38	24	67	49	54	—	53	11	68
6125.02	16	14	38	43	—	—	11	20	16
6145.08	24	—	45	48	43	24	57	20	49
6237.34	67	40	71	65	28	60	35	27	62
6244.13	45	—	—	—	—	—	31	—	73
SiII									
6347.09	87	—	—	88	—	101	97	—	—
6371.36	66	88	79	86	48	61	—	—	62
CaI									
5261.71	—	—	—	—	—	—	—	80	—
5349.47	82	85	—	—	—	—	97	67	—
5581.97	60	43	91	95	95	45	54	36	75
5588.76	—	—	—	—	—	—	—	94	—
5590.12	75	—	90	—	60	73	85	34	90
6122.22	—	—	—	—	—	—	—	90	—
6162.17	120	—	—	—	—	—	—	—	—
6166.44	28	40	28	50	49	54	40	68	61
6169.06	71	66	92	—	—	—	38	81	—
6169.56	85	95	—	—	—	—	85	52	—
6439.07	85	—	—	—	—	88	—	—	—
6449.81	68	82	—	—	76	—	81	62	—
6471.66	77	81	65	100	45	—	67	17	75
6493.78	82	104	82	—	—	50	95	69	—
6499.65	32	45	67	78	74	—	47	16	65
ScII									
4246.83	—	82	—	—	—	—	—	—	—
4279.93	—	24	65	—	85	—	82	22	—
5239.82	54	24	61	56	23	61	45	48	80
5318.34	34	24	48	44	—	28	5	—	16
5526.81	79	71	—	76	88	48	68	48	70
5640.97	61	61	71	—	75	79	57	38	—
5657.87	102	73	—	—	—	—	104	—	—
5667.16	40	40	57	93	68	54	38	38	62
5669.03	28	32	54	61	55	—	35	—	70
6245.63	40	81	—	—	24	55	16	20	53
6320.87	13	38	—	4	11	—	—	—	11
TiI									
5648.57	10	8	—	25	—	23	19	33	—
5866.45	16	—	17	35	11	20	8	11	27
6258.11	32	—	33	24	—	—	6	—	65
6261.10	17	—	—	32	11	—	13	—	28
TiII									
4174.09	—	93	—	—	—	—	—	80	—
4184.33	81	—	—	98	101	46	100	88	—
4316.81	77	60	—	—	—	—	—	—	—
4386.86	90	90	95	—	—	97	86	—	—
4394.06	—	97	—	—	—	92	105	—	—

ТАБЛИЦА 2 (продолжение)

Элемент, $\lambda$ , Å	$\alpha$ СМi	26462	27561	27991	28406	28736	106103	107168	107213
4395.85	99	—	95	109	100	86	86	—	—
4411.08	82	65	96	74	98	64	73	104	—
4411.94	61	36	53	59	50	59	49	49	—
4418.34	102	86	104	92	73	49	82	101	—
4421.95	76	84	—	104	90	—	64	104	—
4444.56	94	79	77	77	—	—	62	—	—
4470.86	90	—	—	108	—	—	—	—	—
4488.32	93	—	—	—	—	—	91	—	—
4544.01	—	36	43	60	50	54	54	47	—
4568.31	—	29	58	52	—	39	—	36	—
5211.54	55	44	66	28	54	—	44	48	33
5336.81	73	40	82	67	75	—	45	102	71
5418.80	51	49	33	67	68	49	—	50	65
VII									
4023.39	90	70	88	—	69	54	—	—	—
CrI									
5296.69	67	38	48	95	82	45	20	28	85
5304.18	27	—	13	19	8	17	—	10	14
5348.32	61	38	65	60	68	45	35	11	66
5409.79	91	71	—	—	—	—	90	—	90
5719.83	—	—	—	20	14	—	—	—	—
5783.07	—	28	40	54	65	—	—	28	—
5787.99	17	19	44	28	54	32	32	23	23
CrII									
4038.03	12	17	—	—	—	—	—	—	—
4086.14	—	43	101	94	81	82	—	53	—
4207.35	27	80	77	102	—	—	—	58	—
4252.62	60	63	54	86	60	42	42	—	—
4261.92	108	101	87	—	98	92	81	—	—
4275.57	104	93	100	—	102	—	88	—	—
4555.02	—	69	87	87	—	—	98	—	—
4588.22	—	—	—	105	95	98	—	—	—
4592.09	—	66	61	99	70	69	49	26	—
4616.64	—	80	—	—	—	—	70	—	—
4634.11	—	103	101	98	75	73	73	—	—
5210.87	67	49	55	55	60	—	34	28	57
5237.34	80	68	90	45	109	56	67	95	75
5246.75	74	24	70	84	—	67	57	22	87
5305.85	52	48	35	—	60	28	16	82	43
5308.44	45	43	49	48	16	24	14	28	23
5310.70	32	14	—	17	28	24	9	43	—
5313.59	52	61	82	48	33	40	41	82	44
5334.88	43	27	24	30	55	40	49	—	33
5502.05	29	55	—	28	—	31	27	36	38
5508.63	32	28	49	38	—	—	17	51	40
MnI									
4034.49	—	—	—	—	—	—	—	99	—
5377.63	16	19	50	13	34	11	—	19	27
5420.36	38	43	30	49	75	55	34	—	60
6013.50	41	44	60	82	82	61	35	24	82
6021.80	32	45	67	73	65	37	45	17	65
MnII									
6126.21*	10	14	20	28	14	—	27	—	—
FeI									
5109.65	75	—	—	—	—	—	—	57	—
5127.96	65	36	91	—	68	68	82	57	—
5131.48	53	—	124	—	105	44	55	32	—
5159.07	61	24	57	—	—	—	24	—	75
5178.80	17	6	17	—	30	—	—	—	24
5180.07	42	—	—	—	—	—	—	—	—
5232.96	189	—	211	—	149	146	109	—	219

\* Бленда.

Т А Б Л И Ц А 2 (продолжение)

Элемент, λ, Å	σСМi	26462	27561	27991	28406	28736	106103	107168	107213
5269.54	218	—	—	—	—	—	—	—	—
5295.32	22	14	23	28	11	—	28	—	23
5322.05	32	19	—	—	40	43	—	22	48
5367.47	76	98	122	136	73	—	98	136	134
5373.70	27	16	36	61	—	—	—	33	38
5379.58	17	38	48	—	—	—	—	—	—
5383.37	104	—	—	129	152	87	95	—	130
5397.13	134	—	163	192	—	—	136	133	178
5398.28	—	28	60	54	48	—	32	28	79
5405.78	104	—	—	—	134	—	122	142	—
5406.78	23	—	—	—	—	—	—	—	—
5415.20	97	—	110	149	122	—	88	142	135
5417.04	10	6	6	16	11	—	—	11	20
5434.53	104	—	—	129	130	—	—	85	128
5445.04	79	76	91	—	88	73	97	79	87
5501.47	95	61	—	114	—	67	77	65	85
5506.78	85	82	105	119	98	73	74	68	122
5560.23	33	17	40	49	40	—	24	—	65
5576.10	73	55	112	—	85	57	55	60	91
5577.04	23	—	—	17	—	44	—	—	11
5586.76	114	—	—	—	—	—	122	—	152
5608.98	8	—	37	28	20	—	—	—	—
5618.65	17	32	79	68	40	45	20	—	40
5633.97	45	32	73	—	—	—	35	42	65
5638.27	45	38	80	89	90	—	56	30	57
5652.32	10	10	—	38	28	11	—	—	23
5662.94	91	—	—	—	—	—	—	—	—
5679.02	24	36	48	60	24	—	16	37	52
5731.77	37	—	—	—	—	—	—	—	—
5738.24	35	—	—	—	—	—	—	—	—
5752.04	44	38	28	43	—	—	38	28	66
5793.92	11	—	—	—	—	—	—	—	—
5806.73	32	32	28	38	38	45	57	28	52
5811.94	12	—	—	—	—	—	—	—	—
5814.82	16	—	—	—	—	—	—	—	—
5856.08	9	—	—	—	—	—	—	—	—
5859.61	44	28	53	67	36	40	35	28	57
5862.36	61	54	—	98	—	32	57	40	61
5905.67	45	28	—	43	38	—	11	18	40
5987.06	27	37	—	76	54	24	17	28	62
6027.06	37	24	68	82	33	35	24	—	71
6055.99	51	27	—	61	45	17	49	27	65
6065.49	60	61	87	102	—	60	88	48	92
6137.70	87	95	134	—	—	—	123	76	156
6151.62	28	24	—	28	—	14	—	14	23
6159.38	17	4	—	8	28	9	—	24	8
6163.56	36	—	—	—	—	—	—	—	—
6165.37	24	8	23	51	—	24	—	12	—
6188.04	36	—	—	38	28	28	31	27	48
6200.32	63	57	55	43	54	—	28	—	52
6213.44	45	52	70	65	54	45	43	17	60
6219.29	84	40	73	76	—	28	44	17	108
6226.74	19	—	—	—	—	—	—	—	—
6246.33	85	89	95	—	71	—	74	54	90
6252.56	70	97	95	82	—	—	73	—	—
6265.14	61	24	53	62	45	49	38	14	79
6297.80	51	—	—	—	—	—	—	—	—
6303.46	4	—	—	—	—	—	—	—	—
6315.81	32	—	—	—	—	—	—	—	—
6330.86	7	—	—	—	24	—	—	—	22
6335.34	55	35	62	65	75	38	61	35	85
6393.60	73	61	98	122	75	48	58	65	128
6421.36	—	—	101	92	—	—	74	—	—
6430.85	83	67	92	—	73	—	66	48	85
6494.58	98	—	129	—	—	85	88	65	—
FeII									
4384.32	87	—	—	—	—	—	—	—	—
4413.60	47	30	40	49	53	36	59	—	—

Т А Б Л И Ц А 2 (продолжение)

Элемент, $\lambda, \text{Å}$	$\alpha \text{CMI}$	26462	27561	27991	28406	28736	106103	107168	107213
4491.40	—	—	—	—	—	104	—	—	—
4508.23	—	—	—	—	—	95	—	—	—
4541.52	—	93	—	107	—	74	96	—	—
4576.33	—	106	97	74	98	62	105	—	—
4582.84	88	94	—	93	105	85	90	—	—
4620.51	—	73	75	—	50	—	58	—	—
5234.62	88	—	—	54	—	—	92	—	104
5325.56	81	54	85	61	82	61	40	94	44
5425.27	60	50	50	60	80	54	50	79	68
5534.86	65	88	—	88	—	—	61	—	98
5891.38	11	17	—	44	—	—	20	—	28
6084.10	28	16	40	28	32	—	37	62	27
6149.24	56	61	42	74	55	44	44	76	48
6238.38	81	71	76	48	79	28	35	105	60
6432.65	46	40	—	54	55	55	34	85	70
6446.40	10	—	—	40	—	—	—	38	—
6456.38	82	—	—	—	—	—	—	—	—
NiI									
5115.40	33	36	61	—	50	43	45	56	—
5155.14	52	—	81	67	89	—	—	57	52
5176.56	46	—	—	—	53	24	38	—	—
5578.73	26	20	—	32	24	—	—	—	33
5754.68	—	27	38	82	75	45	32	8	76
5760.84	20	—	—	—	—	—	—	—	—
5805.23	45	14	36	45	49	43	38	20	42
6108.12	11	11	20	20	38	—	—	3	—
6176.81	46	—	45	67	—	24	33	28	49
6186.72	20	14	43	38	24	38	34	24	—
6191.19	—	—	104	—	—	—	—	77	—
6204.61	20	—	38	24	22	—	—	14	3
6378.26	—	—	—	37	—	—	—	12	38
6482.81	30	—	27	24	—	—	8	—	20
6643.64	28	24	—	—	—	27	—	—	63
YII									
5200.42	75	24	36	35	23	54	—	70	54
ZrII									
4496.96*	106	67	—	106	—	80	—	—	—
BaII									
5421.05	—	—	48	80	75	44	40	49	82
5853.68	41	61	79	71	75	50	62	—	80
6496.90	85	—	—	—	63	73	—	—	—
EuII									
6437.64	10	4	14	28	27	—	—	20	11

\* Бленда.

для случая  $n > 5$  составляет примерно 0.1 dex, для случая  $n=2-3$  она не хуже 0.2 dex. Здесь же даны величины  $\lg \varepsilon(X)$ , определенные по данным табл. 3 для F-карликов поля. Следует иметь в виду, что химический состав для них определен пока только по синей ( $\lambda 3900-4900 \text{ Å}$ ) области спектра. Результаты более подробного исследования атмосфер этих звезд будут опубликованы нами отдельно.

На рис. 3 приведены кривая распространенности химических элементов в атмосферах всей совокупности исследованных нами звезд из группировок диска Галактики; здесь представлены A-звезды из [1] и F-звезды из табл. 4 данной работы. Как видно из табл. 4, химический состав F-карликов в скоплениях совпадает с химическим составом Проциона, следовательно, можно утверждать, что F-карлики в Гиадах имеют солнечное содержание тяжелых элементов. В работе [5] аналогичный вывод сделан нами относительно содержания

Т А Б Л И Ц А 3  
Эквивалентные ширины  $W$  линий в спектрах F-карликов поля, мÅ

Элемент, $\lambda$ , Å	15798	23754	30652	43042	43386	Элемент, $\lambda$ , Å	15798	23754	30652	43042	43386
MgI						4261.92	98	79	68	86	60
4167.27	172	209	169	177	169	4275.57	79	69	82	79	55
4702.99	185	250	173	200	218	4465.77	78	146	—	—	—
CaI						4555.02	44	66	53	43	33
4226.73	380	390	384	415	384	4558.66	102	111	77	79	83
4302.53	208	215	219	205	183	4588.22	77	80	64	65	66
4318.65	110	98	—	—	—	4592.09	38	64	49	47	41
ScII						4616.64	62	70	42	47	41
4246.83	148	161	100	118	104	4618.83	73	94	54	72	70
4314.08	153	172	127	152	115	4634.11	70	74	45	45	53
4400.36	94	119	70	86	80	4697.61	66	86	—	—	—
TiII						VI					
4028.83	88	—	70	109	70	4034.49	149	—	105	146	136
4163.64	107	113	69	97	94	FeI					
4174.09	98	109	—	78	73	4071.74	262	—	300	305	248
4184.33	73	88	53	64	46	4139.93	51	40	34	35	26
4287.89	139	138	107	126	105	4147.68	150	164	66	90	76
4290.22	171	168	132	138	183	4152.17	168	192	103	143	130
4300.05	216	227	198	180	199	4174.92	91	76	57	64	66
4301.93	182	182	125	150	125	4187.04	126	172	130	131	100
4386.86	82	70	45	58	59	4187.80	157	221	146	260	141
4394.06	102	84	50	68	71	4198.31	241	290	236	273	256
4395.03	188	185	132	167	132	4202.03	182	250	170	200	145
4395.85	63	69	60	48	45	4222.22	81	117	85	93	65
4411.08	47	66	41	38	32	4235.94	165	213	170	220	155
4411.94	41	55	18	35	25	4237.09	62	54	49	51	57
4417.72	94	99	75	93	75	4250.13	129	138	107	118	110
4418.34	45	73	40	48	53	4271.16	128	168	155	177	150
4421.95	66	69	41	58	59	4271.76	222	226	266	264	248
4443.80	146	148	100	139	110	4375.93	105	99	82	93	88
4444.56	54	90	46	51	64	4383.55	305	309	300	370	364
4450.49	139	150	100	108	100	4389.24	40	27	24	40	26
4464.46	123	155	86	140	82	4404.75	204	255	260	238	205
4468.49	136	147	94	126	91	4415.13	228	235	197	218	232
4470.86	66	110	65	61	49	4427.31	131	110	87	136	90
4488.32	63	105	60	73	59	4430.62	85	127	93	86	90
4501.27	150	173	105	122	120	4447.72	84	106	76	101	93
4529.47	91	145	104	110	86	4489.74	50	114	50	54	59
4544.01	27	40	—	41	44	4602.01	30	29	24	27	35
4563.76	122	145	96	119	114	4602.94	91	86	65	69	70
4568.31	33	29	—	—	—	FeII					
4571.97	173	173	125	136	147	4122.67	104	126	—	—	—
MnII						4178.86	101	101	80	88	86
4023.39	62	—	40	70	59	4303.18	127	131	134	111	118
4038.03	47	—	—	—	—	4413.60	31	28	18	45	20
4082.30	41	—	—	—	—	4491.40	60	94	59	79	59
CrI						4508.29	98	106	68	93	68
4254.35	135	168	130	118	118	4541.52	66	90	59	73	60
4274.80	169	138	135	122	93	4555.89	143	148	141	123	135
4289.72	161	186	224	168	212	4576.33	63	82	59	65	59
CrII						4582.84	60	82	53	54	54
4086.14	62	—	—	—	—	4620.51	54	62	—	—	—
4145.77	70	90	54	68	59	SrII					
4207.35	60	76	50	57	—	4077.71	295	—	270	310	294
4224.85	124	120	110	83	109	4215.52	233	279	187	226	190
4242.38	102	132	85	86	68	BaII					
4252.62	84	53	33	47	30	4554.03	44	66	53	43	33



ТАБЛИЦА 4

Распространенность химических элементов  $-\lg \varepsilon (X)$  в атмосферах F-карликов

HD	Na	Mg	SiI	SiII	Ca	Sc	TiI	TiII	V
	2	1	10	2	7	6	2	11	1
26462	5.71	4.77	4.64	4.44	5.66	9.01	6.59	7.22	8.01
27561	5.49	—	4.41	4.39	5.82	8.58	7.12	7.32	7.97
27991	5.48	4.60	4.59	4.30	5.70	8.91	7.01	7.27	—
28406	5.76	4.50	4.43	4.85	5.83	8.92	7.47	7.12	8.20
28736	5.32	4.60	4.52	4.53	6.09	8.75	6.73	7.50	8.48
106103	5.74	4.59	4.41	4.30	5.79	8.89	7.17	7.09	—
107168	5.39	5.43	4.36	—	5.36	8.70	5.68	6.77	—
107213	5.94	4.69	4.60	4.44	5.99	8.54	7.20	7.37	—
$\alpha$ CMi	5.67	4.79	4.61	4.45	5.94	8.83	7.06	6.89	7.59
15798	—	4.18	—	—	6.55	8.45	—	6.84	7.77
23754	—	3.93	—	—	6.59	8.33	—	6.45	—
30652	—	4.18	—	—	6.21	8.90	—	7.06	8.48
43042	—	4.08	—	—	6.18	8.63	—	6.75	7.60
43386	—	3.99	—	—	6.19	8.90	—	6.98	7.80

ТАБЛИЦА 4 (продолжение)

HD	CrI	CrII	Mn	FeI	FeII	Ni	Sr	Y	Ba	Eu
	4	16	4	43	12	7	2	1	2	1
26462	6.61	6.16	6.50	4.62	4.59	5.62	—	10.11	9.95	10.96
27561	6.55	6.06	6.60	4.56	4.54	5.34	—	10.09	10.05	10.57
27991	6.35	6.22	6.76	4.63	4.62	5.39	—	10.23	10.24	10.30
28406	6.21	5.92	6.35	4.31	4.44	5.40	—	10.41	10.44	10.29
28736	6.62	6.42	6.75	4.59	4.84	5.60	—	9.86	10.57	—
106103	6.72	6.20	6.74	4.68	4.47	5.45	—	—	10.03	—
107168	5.93	5.88	6.34	4.00	3.97	4.89	—	8.97	—	9.63
107213	6.94	6.60	6.81	4.76	4.66	5.62	—	10.07	10.24	10.84
$\alpha$ CMi	6.48	6.04	6.87	4.66	4.46	5.56	—	9.32	10.42	10.72
15798	6.41	5.55	6.34	4.50	4.51	—	9.36	—	9.42	—
23754	6.19	5.69	—	4.26	4.16	—	9.13	—	9.48	—
30652	6.31	6.24	6.73	4.63	4.58	—	9.44	—	9.86	—
43042	6.54	6.09	6.25	4.47	4.39	—	9.24	—	9.51	—
43386	6.49	6.29	6.22	4.53	4.51	—	9.40	—	9.73	—

железа, дальнейшее обсуждение результатов в значительной степени опирается на эти выводы.

Следующим основным моментом является утверждение об общности происхождения рассматриваемых A- и F-звезд. Действительно, эти звезды принадлежат к группировкам, находящимся в окрестностях Солнца, причем возрастные различия между группировками намного меньше временной шкалы, на которой ожидают обнаружить эффект химической эволюции диска Галактики ( $\sim 10^9$  лет). Сопоставление результатов исследования атмосфер A- и F-звезд показало, что систематические ошибки, связанные с переходом от эффективных температур 10 000—9000 К к температурам около 6500 К, отсутствуют. Например, средние значения  $\lg \varepsilon (\text{Fe})$ , определенные по A- и F-звездам, равны соответственно  $-4.40 \pm 0.14$  и  $-4.52 \pm 0.08$ , аналогичная картина наблюдается и для хрома:  $\lg \varepsilon (\text{Cr})_{\text{A}} = -6.21 \pm 0.06$ ,  $\lg \varepsilon (\text{Cr})_{\text{F}} = -6.32 \pm 0.08$ . Корреляционный анализ не обнаружил зависимости  $\lg \varepsilon (\text{Fe})$  от основных параметров звездных атмосфер:  $T_e$ ,  $\lg g$ ,  $\xi_t$ , проекции скорости осевого вращения  $v \sin i$ , следовательно, систематические ошибки определения металличности исключены и не определяют величину дисперсии металличности  $\sigma (\text{Fe})$ . В то же время надо отметить существенное различие разброса индивидуальных определений металличности, выполняемых для A- и F-звезд. Характер этого различия не изменяется, если изменять способы определения эффективной температуры, на-

пример, использовать только данные  $UBV$  или  $wby$ ,  $\beta$ -фотометрии, или только профили линий водорода в сочетании с условием ионизационного равновесия для атомов железа.

Следующим этапом анализа кривой распространенности может являться построение диаграмм элемент—элемент. На рис. 4 и 5 такие диаграммы по-

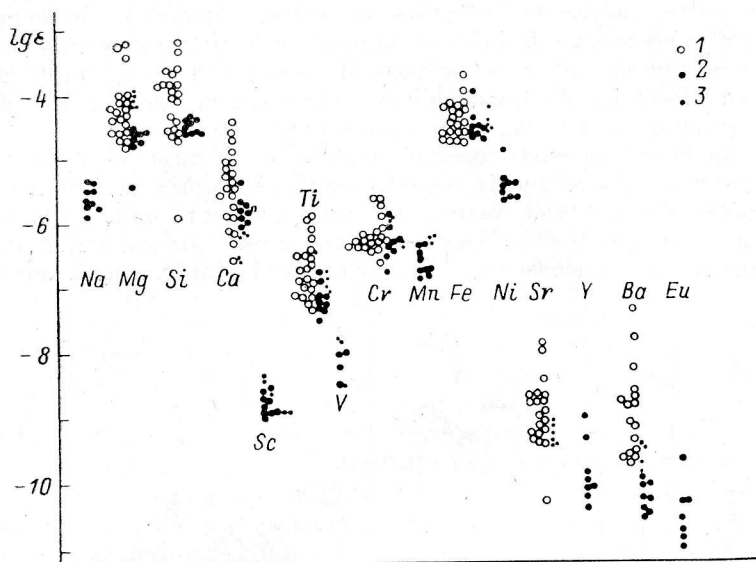


Рис. 3. Кривая распространенности химических элементов в атмосферах звезд 1-го типа населения.

1 — А-звезды, члены рассеянных скоплений и групп из [1]; 2 — F-карлики, члены рассеянных скоплений из табл. 4; 3 — F-карлики поля из табл. 4.

строены для Si, Ca, Fe, Sr и Ba. Треугольниками отмечены результаты анализа А-звезд гало из [2, 3]. Наличие корреляций элемент—элемент свидетельствует об универсальности формы кривой распространенности, т. е. о едином механизме обогащения вещества Галактики тяжелыми элементами. Сейчас же обратим внимание только на структуру рис. 4 и 5. Во-первых, для элементов

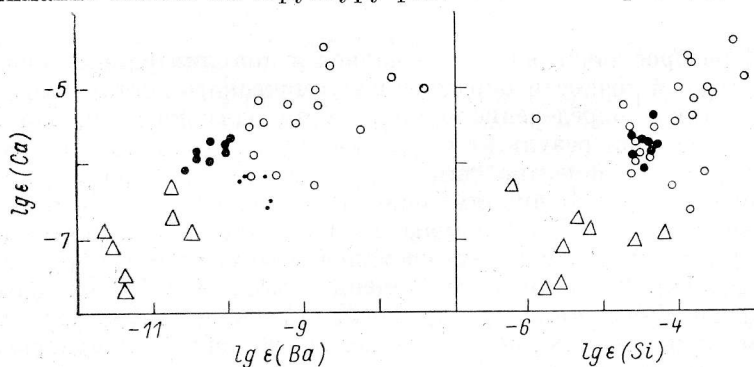


Рис. 4. Корреляция содержания кальция  $lg \epsilon (Ca)$  с содержанием: бария  $lg \epsilon (Ba)$ , кремния  $lg \epsilon (Si)$ .

△ — А-звезды гало, остальные обозначения те же, что и на рис. 3.

Si, Ca, Sr, Ba существенно различаются средние  $\overline{lg \epsilon (X)}$  и их дисперсии, определяемые отдельно по А- и F-звездам. Учитывая, что точности определения химического состава для А- и F-звезд близки, мы считаем, что повышенная дисперсия содержания химических элементов для А-звезд реальна и является отражением эффектов усиления линий перечисленных элементов в атмосферах этих звезд. Действительно, значительные вариации величины  $lg \epsilon (Ba)$ , определяемой по линиям с  $W \approx 50 \text{ mÅ}$ , не могут быть объяснены методическими

ошибками, так как используются малочувствительные к ошибкам эффективной температуры линии однократно ионизованного бария, а близость изучаемых звезд по светимости видна на диаграммах показатель цвета—звездная величина. Не могут быть объяснены такие вариации и неоднородностью дозвездного вещества, из которого образовались звезды скопления, так как по другому химическому элементу, например по Fe, это дозвездное вещество однородно. Возможную связь этого эффекта с феноменом химически пекулярных звезд мы надеемся рассмотреть в дальнейшем, сейчас только заметим, что ситуация, напоминающая феномен SR-звезд, обнаружена нами для A-звезд гало [3], т. е. мы имеем дело с достаточно универсальным физическим эффектом.

На рис. 5 сопоставлены содержания Sr и Ba для A- и F-звезд диска и A-звезд гало, т. е. для объектов, металличность которых меняется в значительных пределах. Из рисунка видно, что имеется достаточно строгая ( $\rho=0.85$ ) корреляция содержаний этих элементов, что может указывать на единый процесс их синтеза на существенно различающихся этапах эволюции Галактики.

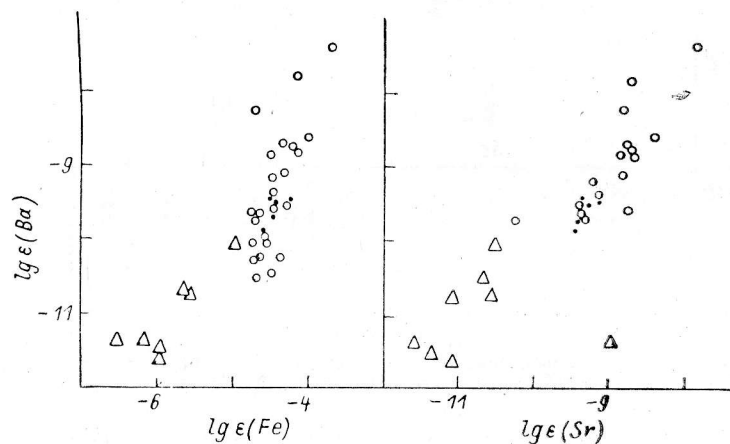


Рис. 5. Корреляция содержания бария  $\lg \epsilon$  (Ba) с содержанием: железа  $\lg \epsilon$  (Fe), стронция  $\lg \epsilon$  (Sr).

Обозначения те же, что и на рис. 3 и 4.

Невысокий разброс точек на рис. 5 является дополнительным свидетельством в пользу хорошей точности определений химического состава даже в тех случаях, когда такое определение опирается на одну-две спектральные линии.

Отметим еще один результат исследования химического состава в атмосферах F-карликов. У элементов, для которых есть возможность определения их содержания отдельно по линиям ионов и нейтральных атомов, наблюдаются различия величин  $\lg \epsilon$  (X). В случае хрома различие статистически значимо. Это явление, получившее название сверхионизации, в случае Fe уже отмечалось [8, 9, 17, 18, 19]. К настоящему времени эффект не получил окончательного теоретического объяснения, хотя предложено несколько гипотез: отклонение от локального термодинамического равновесия, наличие температурных неоднородностей в атмосферах и др. (см., например, работу [8] и ссылки в ней). Мы подчеркиваем особо, что в нашей работе эффект сохранился, несмотря на то что в отличие от [19] в анализе использованы только слабые линии металлов. Напомним, что  $T_e$  и  $\lg g$  для F-звезд определены у нас с помощью параметров  $b-y$ ,  $c_1$  и характеристик водородных линий  $H_\delta$ ,  $H_\gamma$ ,  $H_\alpha$ . Если к определению  $T_e$  и  $g$  привлекать еще условие ионизационного равновесия для атомов железа, то эта процедура не устранил расхождения в содержаниях других элементов, определяемых по линиям ионизованной и нейтральной компонент (рис. 1).

Мы выполнили также статистический анализ распределений величин  $\lg \epsilon$  (X) отдельно для A- и F-карликов, вычислив четыре первых центральных момента, асимметрию и эксцесс. Анализ показал, что распределение величины  $\lg \epsilon$  (X) для каждого элемента можно считать нормальным, но для ряда химических

элементов обнаружено значимое различие средних  $\overline{\lg \varepsilon(X)_A}$ ,  $\overline{\lg \varepsilon(X)_F}$  и их дисперсий  $\sigma(X)_A$ ,  $\sigma(X)_F$ .

**Выводы.** Особенности нашего подхода, перечисленные во введении, позволяют сделать два принципиально важных вывода относительно характеристик звезд 1-го типа населения в околосолнечных окрестностях.

1. Химический состав этих звезд одинаков и совпадает с солнечным. Заметим, что этот вывод получен в результате анализа слабых линий металлов, поэтому разнообразные эффекты в звездных атмосферах, определяющие характер поведения линий умеренной интенсивности и сильных линий, не влияют на результат.

Вывод о химической однородности исследованных рассеянных скоплений является достаточно конструктивным для дальнейшей разработки проблемы определения модулей расстояний и возрастов рассеянных скоплений.

2. Сравнение кривых распространенности химических элементов, полученных для А- и F-звезд с помощью единой методики анализа спектров, позволяет рассмотреть новый аспект проблемы химически пекулярных звезд. Действительно, исследованная нами выборка А-звезд в скоплениях при спектральной классификации выглядела как совокупность нормальных звезд, без проявлений феномена Ар и Am. Однако при анализе их спектров методом моделей атмосфер обнаружена реальная дисперсия химического состава их атмосфер, существенно превышающая ошибки метода, причем для каждого химического элемента (кроме элементов железного пика) происходит завышение средних величин  $\overline{\lg \varepsilon(X)_A}$  по сравнению с таковыми для F-карликов. Результаты исследования атмосфер F-карликов заставляют отказаться от гипотезы неоднородности химического состава протозвездного вещества, из которого сформированы звезды того или иного скопления. Остаются две возможности объяснения данного феномена — либо мы наблюдаем реальную стратификацию химических элементов в звездных атмосферах, либо использованный теоретический аппарат интерпретации спектров А-звезд не отражает существенные свойства их атмосфер. Аналогичная ситуация сложилась в результате многочисленных попыток объяснения феномена химически пекулярных звезд, поэтому не исключена возможность, что изучение перехода от нормальных А-звезд к звездам с отчетливо выраженными проявлениями химической пекулярности приведет к изменениям в понимании природы этих объектов.

#### Литература

1. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е. Спектроскопическое определение металличности звезд молодых рассеянных скоплений // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1985. 20. С. 16—21.
2. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е. Химический состав звезд горизонтальной ветви шаровых скоплений в галактическом поле // *Астрон. журн.* 1985. 62, вып. 3. С. 552—557.
3. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е. Химический состав звезд горизонтальной ветви шаровых скоплений в галактическом поле. II // *Астрон. журн.* 1987. 64. С. 74—78.
4. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е. К вопросу о металличности Гиад // *Письма в Астрон. журн.* 1985. 11, № 9. С. 692—695.
5. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е. Спектроскопическое определение металличности F-карликов в рассеянных скоплениях // *Письма в Астрон. журн.* 1986. 12, № 6. С. 446—451.
6. Б и к м а е в И. Ф., П а н ч у к В. Е. Спектрофотометрия звезд — членов группы Upsilon 1. — *Сообщ. САО.* 1986, вып. 49. С. 40—53.
7. Б и к м а е в И. Ф. Спектроскопическое исследование F- и G-карликов с пониженным содержанием металлов. 1: Анализ спектра железа // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1987. 25. С. 3—12.
8. S t e f f e n M. A model atmosphere analysis of the F5IV—V subgiant Procyon // *Astron. & Astrophys. Suppl. Ser.* 1985. 59. P. 403—427.
9. K a t o K., S a d a k a n e K. A model atmosphere analysis of Procyon ( $\alpha$  CMi, F5IV—V) // *Astron. and Astrophys.* 1982. 113. P. 135—141.
10. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е., Ц ы м б а л В. В. Параметры атмосферы и металличность  $\theta$  Leo (A2 V) // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1985. 19. С. 22—27.
11. K u r u c z R. L. Model atmospheres for G, F, A, B and O stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1979. 40. P. 1—340.

12. Griffin R. A photometric atlas of the spectrum of Procyon  $\lambda 3140-7470 \text{ \AA}$  // Cambridge Philos. Soc., 1979.
13. Wright K. O., Lee E. K., Jacobson T. V., Greenstein J. L. Line intensities in the spectra of representative stars of spectral types B to G // Publ. of the Dominion Astrophys. Observ. 1964. 12, nr 7. P. 173-291.
14. Swenson J. W. The spectrum of Procyon: a typical star of class F // Astrophys. J. 1946. 103. P. 207-248.
15. Nissen P. E., Gustafsson B. An investigation of microturbulence and metal abundance in F dwarfs // Astron. papers dedicated to B. Strömberg / Ed. A. Reiz, T. Andersen. Copenhagen Univ. Obs. 1978. P. 43-93.
16. Боярчук А. А., Саванов И. С. Силы осцилляторов для нейтрального железа и его содержание в атмосфере Солнца // Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1985. 70. С. 57-129.
17. Edvardsson B., Gustafsson B., Nissen P. E. Light element abundances in F stars and the chemical evolution of the galactic disk // ESO Messenger. 1984. Nr 38. P. 33-38.
18. Tomkin J., Lambert D. L., Balachandran S. Light element abundances in 20 F and G dwarfs // Astrophys. J. 1985. 290. P. 289-295.
19. Takeda Y. Overionization of Fe in the atmosphere of 15 Vulpeculae // Ann. Tokyo Astron. Observ. Second Ser. 1984. 19. P. 553-567.

Поступила в редакцию 6 июня 1986 г.

---