

УДК 524.338.3-36

**ХИМСОСТАВ He-w-ЗВЕЗД HD 37058, 212454, 224926**

© 2007 Ю. В. Глаголевский, В. В. Леушин, Г. А. Чунтонов

*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 4 июля 2007 г.; принята в печать 2007 г.

Проведенный спектрофотометрический анализ атмосфер HD 37058, HD 212454 и HD 224926 показывает, что это типичные He-w-звезды, имеющие микротурбулентную скорость, близкую к нулю, довольно сильно различающиеся магнитные поля и большой разброс величин химических аномалий. Одно из главных проявлений сепарации заключается в уходе гелия из верхних слоев атмосферы вглубь звезды.

Анализ звезд HD 212454, 224926 с полем  $B_e < 100$  гауссов показал, что у них, несмотря на слабость магнитного поля, величина химических аномалий такая же, как у сильно намагниченных звезд. Наблюдается большой разброс значений химсостава при одной и той же величине магнитного поля. Наиболее благоприятные условия для формирования звезд типа He-w оказываются в интервале температур 13000–16000 К, самый большой дефицит гелия возникает вблизи максимума распределения, причем он бывает не только у звезд с сильным полем, но и со слабым. Вследствие указанного разброса степень химических аномалий не строго соответствует величине магнитного поля, хотя поле оказывает заметное влияние на формирование химических неоднородностей на поверхности. У звезд с очень слабым полем его влияние минимально, а наличие сильных химических аномалий свидетельствует о том, что микротурбулентия у них достаточно слаба и без влияния поля. Можно предположить, что она возникает вследствие медленного вращения.

Что касается скоростей вращения звезд со слабым магнитным полем, то на зависимости скорости вращения  $v \sin i$  от температуры не заметно никаких тенденций, связанных с величиной магнитного поля. Практически все звезды имеют  $v \sin i$  меньше, чем у нормальных звезд, за исключением HD 131120, 142096, 142990, 143669, которые вращаются с такой же скоростью или быстрее нормальных звезд. Эти объекты не соответствуют общему правилу, и их пример показывает, что стабильные атмосферы могут встречаться и у быстрых ротаторов, а магнитное поле не участвует в торможении CP-звезд. Мы предполагаем, что медленное вращение “досталось” CP-звездам от протозвездных облаков.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Данная работа преследует задачу детального изучения свойств звезд с аномально слабыми линиями гелия (He-w), имеющих слабые и сильные магнитные поля. К настоящему времени по этой теме мы исследовали звезды HD 21699, 217833 и 220825 [1–3]. Среди химически пекулярных звезд разного типа объекты с аномально ослабленными линиями гелия составляют особую группу. У некоторых из них линии гелия практически не видны в спектре, хотя у нормальных звезд такой же температуры они по интенсивности уступают только водородным линиям. Поэтому необходимо выяснить, при каких условиях возникает столь значительный дефицит гелия, второго по обилию элемента.

Звезды со слабыми магнитными полями пока изучены плохо, потому что целью предыдущих исследований были объекты с сильными магнитными полями. Поэтому свойства CP-звезд с магнитными полями в диапазоне 0–500 Гс практически совсем

неизвестны. Слабые поля теоретически в меньшей степени должны стабилизировать атмосферы звезд, поэтому следует ожидать слабого влияния силы поля на степень химических аномалий и концентрацию химических элементов в разных частях поверхности звезд. Неизвестно также, как происходит переход к нормальному химсоставу — плавно с уменьшением магнитного поля до нуля, или аномальность химсостава исчезает быстро при каком-то граничном поле. Не совсем ясно, какова роль слабого магнитного поля в процессе потери момента вращения.

Исходя из перечисленных задач, для исследования выбраны три звезды типа He-w, причем две из них слабо намагниченные (HD 224926 и 212454,  $B_e < 100$  Гс) и одна с сильным магнитным полем HD 37058 ( $B_e \approx -900 \div +2500$  Гс). Звезда HD 35497, классифицированная как нормальная, используется в нашей работе в качестве звезды сравнения.

Таблица 1. Наблюдательный материал

Звезда	ID
HD 37058	2451952.25
HD 35497	2451865.31
HD 212454	2451865.10
HD 224926	2451865.23

## 2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Существует несколько измерений магнитного поля изучаемых звезд. Для HD 37058 проведено всего  $n = 10$  измерений [4–7]. Среднеквадратическое значение поля оказалось равным

$$\langle Be \rangle = [\sum (Be_i^2 - \sigma_i^2)/n]^{1/2} = 1080 \pm 140 \text{ Гс},$$

где  $\sigma$  — ошибка определения поля. Экстремальные величины  $Be$  равны  $-900$  и  $+2500$  Гс, период изменения неизвестен. Для HD 212454  $\langle Be \rangle = 0 \pm 340$  Гс [8], определенное по 3 измерениям по линиям водорода (это значение мы примем в нашей работе), и одно измерение  $Be = -395 \pm 400$  Гс с ПЗС-матрицей [9]. Среди этих измерений нет ни одного, превышающего ошибки. Очевидно, что эффективное поле у звезды меньше 100 Гс. Для HD 224926  $\langle Be \rangle = 0 \pm 85$  Гс получено по 4-м измерениям в работе [10]. Эта звезда, вероятно, тоже имеет эффективное поле менее 100 Гс.

## 3. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для изучения химсостава спектры получены на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа с CCD-камерой  $1\text{к} \times 1\text{к}$  пикселей с пластинчатым слайсером [11]. Разрешение в спектре 15000 и отношение сигнал/шум около 200. Спектральный диапазон, определяемый дисперсией и размерами матрицы, — 4000–4170 Å. Моменты наблюдений приведены в табл. 1. Обработка спектров проводилась по программе Кудрявцева [12] и по стандартной методике с использованием программы Dech20 [13].

В отличие от ранее изученных нами He-w-звезд HD 21699 и HD 217833, в спектрах изучаемых в данной работе звезд наблюдаются относительно сильные линии HeI  $\lambda$  400.27, 4023.97, 4120.82, 4143.76 Å. Оценки эквивалентных ширин линий, входящих в бленды (например ОI 4069.62, ОI 4069.88, СИ 4074.48, СИ 4074.54, СИ 4074.84), делались по измеренной общей эквивалентной ширине бленды путем деления ее на части в соответствии с теоретически рассчитанными интенсивностями каждой из компонент.

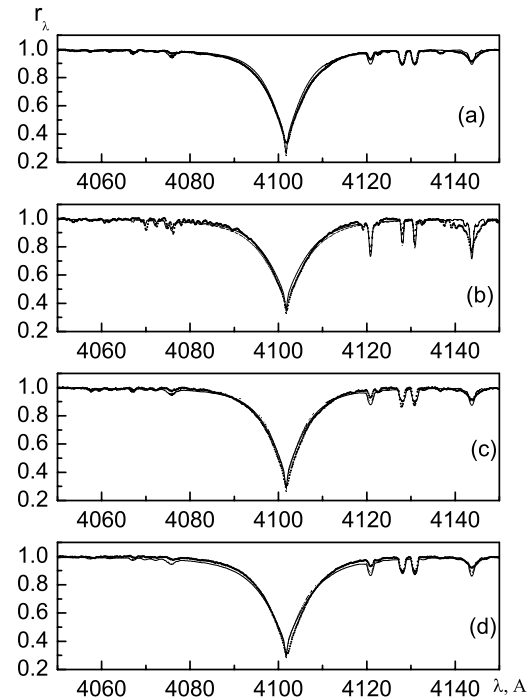


Рис. 1. Сопоставление наблюдаемых профилей линии  $H_\delta$  (точки) в спектрах HD 35497 (а), HD 37058 (б), HD 212454 (с), HD 224926 (д) с расчетными спектрами (сплошная линия).

## 4. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР

Основные физические параметры и ссылки на их источники приведены в табл. 2. Предварительно температура  $T_e$  оценивалась по фотометрическим параметрам, а затем уточнялась по водородной линии  $H_\delta$ . Обычно фотометрические температуры немного отличаются от температур, которые получаются сравнением профилей линий водорода с синтетическими спектрами. Синтетические спектры в районе линии  $H_\delta$  были рассчитаны с использованием программы SyntVa, разработанной В.В.Цымбалом и учитывающей весь список линий VALD. Теоретический спектр рассчитывался для различных величин  $T_e$  и  $\log g$  с варьированием содержания некоторых элементов. Сравнение наблюдаемых контуров с рассчитанными для выбранных моделей атмосфер дает возможность определить ускорение силы тяжести на поверхности и температуру, величины которых приведены в табл. 2. На рис. 1 приведены такие сравнения. Сплошные линии вычислены по выбранным нами параметрам, они хорошо соответствуют наблюдаемым профилям и поэтому практически незаметны. Величины  $v \sin i$  взяты из литературы.

**Таблица 2.** Характеристики атмосфер исследуемых звезд, использованные при расчетах моделей атмосфер и определении содержания элементов

Звезда	Зв.вел.	$T_e$ , К	$\log g$	$V \sin i$ , км/с	[Fe/H]		$v_t$ , км/с	<Be> или Be, G
					SIMBAD	Наши		
HD 35497	1.6	13000	3.70	75[15], 60[16]	-0.10[17]	+0.17	2.00	—
HD 37058(He-w)	7.3	17000	3.80	25[15]	+0.84[18]	+1.46	0.05	1080±140
HD 212454(He-w)	6.1	14400	3.83	40[16]	+1.15[17]	+0.91	2.00	0 ± 340
HD 224926(He-w)	5.1	14000	3.85	75[15], 60[16]	+1.00[19]	+0.43	0.50	0 ± 85

Модели атмосфер рассчитывались по программе LLmodels [14], в которой используется прямой метод учета непрозрачности в линиях, что делает возможным расчет моделей звездных атмосфер с индивидуальным или стратифицированным химическим составом.

### 5. ЛИНИИ МЕТАЛЛОВ И ИХ СОДЕРЖАНИЕ В АТМОСФЕРАХ ИССЛЕДУЕМЫХ ЗВЕЗД

В связи с тем, что температуры атмосфер исследуемых звезд сравнительно высоки, линии металлов в их спектрах слабы и немногочисленны. Тем не менее нам удалось измерить некоторое количество линий железа и других элементов для всех

исследуемых звезд в спектральной области от 4000 до 4170 Å. В табл. 3 приведены эквивалентные ширины линий для каждой из звезд вместе с некоторыми параметрами из работы [20]. Здесь же даны величины  $\log N$ , найденные по каждой линии. Малочисленность измеренных линий металлов в спектрах исследуемых звезд позволила сделать только грубую оценку микротурбулентной скорости  $v_t$  в их атмосферах. Величины  $v_t$  для каждой из звезд оценивались по методике, описанной в работе [2], они приведены в табл. 2. Ошибки их определения не превышают ± 0.5 км/с.

**Таблица 3.** Эквивалентные линии ( $W_\lambda$ ) и оценки содержания элементов ( $\log N$ ) в атмосферах исследуемых звезд

Линия	$\log gf$	$\varepsilon_i$ , eV	HD 35497		HD 37058		HD 212454		HD 224926	
			$W_\lambda$ , mÅ	$\log N$	$W_\lambda$ , mÅ	$\log N$	$W_\lambda$ , mÅ	$\log N$	$W_\lambda$ , mÅ	$\log N$
3995.00 NII	0.28	18.50		71.4	8.49					
3997.93 SiII	0.67	16.33		16.5	7.53					
3998.76 SII	0.17	16.25		11.6	6.55					
4000.77 FeIII	0.50	24.59		4.3	8.12					
4000.80 FeII	-3.31	10.29		0.5	9.63					
4002.08 FeII	-3.47	2.78	9.7	7.26	9.7	8.36	15.7	7.78	7.65	
4002.54 FeII	-1.71	5.96	16.4	7.21	12.2	7.88	25.4	7.71	7.64	
4005.04 FeIII	-1.76	11.58		30.0	8.26	6.0	7.68	7.0	7.75	
4009.26 HeI	-1.47	21.22	175.8	11.4	567.0	10.7	206.1	10.8	10.8	
4026.19 HeI	-0.37	20.96	578.9	11.3	1200.0	10.7	623.7	10.8	10.7	
4032.94 FeII	-2.70	4.50	22.2	7.84	14.8	8.51	23.7	7.97	7.75	
4035.08 NII	0.62	23.12		20.3	8.11					
4035.27 SiII	-1.30	10.42		25.3	7.76					

**Таблица 3.** Эквивалентные линии ( $W_\lambda$ ) и оценки содержания элементов ( $\log N$ ) в атмосферах исследуемых звезд (Продолжение)

Линия	$\log gf$	$\varepsilon_i$ , eV	HD 35497		HD 37058		HD 212454		HD 224926	
			$W_{\lambda, m \text{ \AA}}$	$\log N$	$W_{\lambda, m \text{ \AA}}$	$\log N$	$W_{\lambda, m \text{ \AA}}$	$\log N$	$W_{\lambda, m \text{ \AA}}$	$\log N$
4037.97 CrII	-0.56	6.49		3.8	6.28					
4039.16 FeIII	-2.35	11.58		30.9	8.91					
4041.31 NII	0.85	23.14		46.2	8.78					
4042.89 ArII	0.11	18.43		10.2	6.57					
4043.53 NII	0.74	23.13		36.2	8.57					
4044.01 FeII	-2.41	5.57	20.0	7.92	20.0	8.83	39.4	8.60	8.15	
4044.87 FeII	-2.27	9.83	1.3	8.13	10.1	9.74	10.4	9.16	7.76	
4045.37 FeII	-3.62	7.84		3.5	9.78					
4048.24 OII	-0.37	28.69		4.1	9.08					
4048.83 FeII	-2.14	5.60	13.1	7.39	10.8	8.05	15.2	7.67	7.65	
4051.95 CrII	-2.36	3.10		1.4	6.52					
4053.11 FeIII	0.26	20.61		25.5	8.97					
4053.83 TiII	-1.06	1.89	14.1	5.70	10.7	6.52	4.8	5.02	5.23	
4056.26 FeII	-3.05	7.49		7.0	9.54					
4056.99 SiII	-1.22	12.84		6.3	7.66					
4057.46 FeII	-1.54	7.27	15.2	7.69	16.4	8.36	27.4	8.08	7.87	
4058.22 FeII	-1.57	11.05		8.7	9.28					
4059.72 FeII	-1.13	11.05				18.5	8.88			
4060.74 FeII	-1.62	9.84				11.0	8.69			
4061.78 FeII	-2.02	5.96		29.5	8.91					
4062.83 FeII	-1.80	9.74		9.4	9.09	14.4	8.89			
4067.03 NiII	-1.84	4.03	19.2	6.82	2.4	6.54	15.9	5.71	5.84	
4069.62 OII	0.15	25.63		21.0	9.08					
4069.88 OII	0.34	25.64		25.8	9.11	6.2	9.44	6.7	9.51	
4072.15 OII	0.55	25.65		36.3	9.31	8.8	9.51	8.0	9.43	
4072.71 SiII	-2.37	9.84		10.1	7.97	19.3	8.15	4.3	7.50	
4074.48 CII	0.19	24.37		13.2	8.51					
4074.54 CII	0.39	24.37		17.2	8.48					
4074.84 CII	0.58	24.37		23.0	8.53					
4075.45 SiII	-1.40	9.84	24.5	7.37	31.4	7.84	27.9	7.54	7.47	
4075.85 CII	0.74	24.37		28.3	8.55					
4075.95 FeII	-3.38	2.54				20.0	7.76			

**Таблица 3.** Эквивалентные линии ( $W_\lambda$ ) и оценки содержания элементов ( $\log N$ ) в атмосферах исследуемых звезд (Продолжение)

Линия	$\log gf$	$\varepsilon_i$ , eV	HD 35497		HD 37058		HD 212454		HD 224926	
			$W_{\lambda, m \text{ \AA}}$	$\log N$	$W_{\lambda, m \text{ \AA}}$	$\log N$	$W_{\lambda, m \text{ \AA}}$	$\log N$	$W_{\lambda, m \text{ \AA}}$	$\log N$
4076.78 SiII	-1.67	9.84	11.1	7.05	20.8	7.78	14.7	7.34	7.53	
4077.71 SrII	0.17	0.00		28.4	4.92	3.2	5.5	3.09	2.93	
4078.86 OII	-0.28	25.64		10.9	8.96					
4079.57 ArII	-0.50	18.45		10.2	7.09	3.4	7.66			
4081.00 FeIII	0.37	20.63		22.2	8.74	15.2	9.55	3.2	8.31	
4081.77 FeII	-1.74	11.22	1.2	8.21		4.2	8.77	1.2	8.16	
4081.95 FeII	-3.01	9.05		5.1	9.79	9.9		0.5	8.19	
4082.27 NII	0.15	23.13		18.9	8.50					
4082.28 CrII	-1.23	5.32		2.9	6.52					
4083.93 OII	0.15	28.68		9.6	9.20					
4084.64 OII	-0.84	25.85		6.2	9.10					
4085.12 OII	-0.19	25.65		11.0	8.90	3.2	9.57	4.0	9.78	
4086.13 CrII	-2.42	3.71		3.2	6.99					
4087.28 FeII	-4.71	2.58		8.0	9.47					
4088.76 FeII	-4.81	2.84		5.6	9.51					
4089.29 OII	0.89	28.71		25.6	9.45					
4117.91 FeIII	-2.64	7.73		1.5	8.45					
4119.21 OII	0.45	25.85		25.6	9.09					
4120.81 HeI	-1.46	20.96	59.6	11.4	205.0	10.9	64.2	10.8	60.0	10.7
4122.67 FeII	-3.38	2.58	16.8	7.47	25.5	8.90	24.8	7.90	19.0	7.68
4128.05 SiII	0.32	9.84	123.5	8.09	81.8	7.44	135.5	8.32	114.0	7.75
4130.89 SiII	0.48	9.84	115.8	7.75	85.6	7.38	117.3	7.75	112.1	7.55
4131.72 ArII	-0.16	18.43		17.0	7.18					
4132.42 CrII	-2.34	3.76		1.5	6.70					
4132.98 SII	-1.13	13.09		9.5	6.71					
4135.77 CrII	-2.32	5.32	0.5	5.77	1.5	7.14	1.4	6.33	1.5	6.27
4136.90 MnII	-1.29	6.14		1.0	6.58	1.0	5.44	5.0	6.13	
4137.76 FeIII	0.63	20.61		31.3	8.93					
4139.35 FeIII	0.52	20.61		30.0	8.97					
4140.46 MnII	-2.45	5.57		0.3	6.97					
4140.48 FeIII	0.10	20.61		20.2	8.90					
4143.76 HeI	-1.20	21.22	263.0	11.4	728.4	10.7	250.8	10.8	256.2	10.8

**Таблица 3.** Эквивалентные линии ( $W_\lambda$ ) и оценки содержания элементов ( $\log N$ ) в атмосферах исследуемых звезд (Продолжение)

Линия	$\log gf$	$\varepsilon_i$ , eV	HD 35497		HD 37058		HD 212454		HD 224926	
			$W_{\lambda,m}$ Å	$\log N$	$W_{\lambda,m}$ Å	$\log N$	$W_{\lambda,m}$ Å	$\log N$	$W_{\lambda,m}$ Å	$\log N$
4149.87 FeII	-1.36	11.17		7.1	8.97					
4150.57 FeII	-2.90	6.09		3.5	8.59					

Содержание элементов в атмосферах определялось по эквивалентным ширинам линий с использованием программы КОНТУР [21]. Необходимо отметить, что для анализа содержания некоторых элементов в атмосфере HD 37058 мы проводили разделение бленд на соответствующие компоненты с использованием теоретически рассчитанных эквивалентных ширин. В первом приближении теоретическое отношение компонент в блендах оценивалось по модели с параметрами HD 37058 и солнечным химическим составом. Понятно, что эти отношения могут варьироваться при изменении содержания соответствующих элементов. Тем не менее такое разделение позволило оценить, насколько интенсивности этих линий соответствуют определенному по другим линиям содержанию элемента и, в какой-то мере, повысить достоверность результатов. Для некоторых элементов, в частности для углерода, это единственный способ оценки содержания по спектрам в данной области. Совпадение величин содержания, полученных по разным компонентам, дает надежду на реальность полученных значений. В табл. 4 приведены полученные оценки содержания элементов и средние ошибки, возникающие при возможных ошибках определения температур  $\pm 500$  К и микротурбулентных скоростей  $\pm 0.5$  км/с. Неопределенности, связанные с ошибками определения эквивалентных ширин и параметров линий, существенно снижаются при усреднении и становятся меньше указанных в табл. 4. В то же время величина содержания, оцененная по 1–2 линиям (например для титана), может иметь ошибку, значительно превышающую указанные в табл. 4, что связано с неправильным отождествлением, ошибкой определения эквивалентной ширины и параметров линий.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ГЕЛИЯ В АТМОСФЕРАХ ИССЛЕДОВАННЫХ ЗВЕЗД

Интенсивности линий гелия в спектрах исследуемых здесь звезд больше, чем в спектрах звезд He-w из работы [2]. По линиям HeI  $\lambda\lambda$  4009, 4026, 4121 и 4143 Å, находящимся в исследуемой нами области спектра, мы определили количество гелия

в атмосферах изучаемых звезд. Для этого рассчитывались синтетические спектры линий с использованием параметров из работ [20–23]. Фактор Ланде  $z$  вычислялся по данным работы [24]. При расчетах учитывались электронные ( $\Delta\lambda_e$ ) и ионные ( $\Delta\lambda_i$ ) уширения, а также сдвиг компонент линии [25–29]. Наблюдаемые участки спектра каждой из звезд в области этих линий гелия сравнивались с рассчитанными синтетическими спектрами. Последние получались для моделей с параметрами, указанными в табл. 2. При расчете синтетических спектров учитывались наиболее сильные линии в этой области, параметры их приведены в табл. 5.

Пример сравнения рассчитанных и наблюдаемых спектров для звезд HD 35497, 37058, 212454 и 224926 представлен на рис. 2 На этом рисунке для каждой звезды приведено по три расчетных профиля, которые соответствуют содержанию, измененному на  $-0.3$ ,  $0$ ,  $+0.3$  dex. При одинаковых входных параметрах невозможно достичь полного совпадения наблюдаемых и расчетных профилей линий.

В табл. 6 приведено полученное содержание гелия в атмосферах исследуемых звезд. Средние оценки содержания других элементов приведены в табл. 4, где величины для Солнца взяты из работы [30]. Надо иметь в виду, что для всех элементов, кроме гелия, кремния и железа, содержание оценено по 1–3 линиям и может иметь ошибки больше 0.3 dex.

Результаты измерений содержания элементов представлены на рис. 3, где для каждого элемента приведено отличие от солнечного значения  $\Delta \log \varepsilon = \log N_* - \log N_\odot$ .

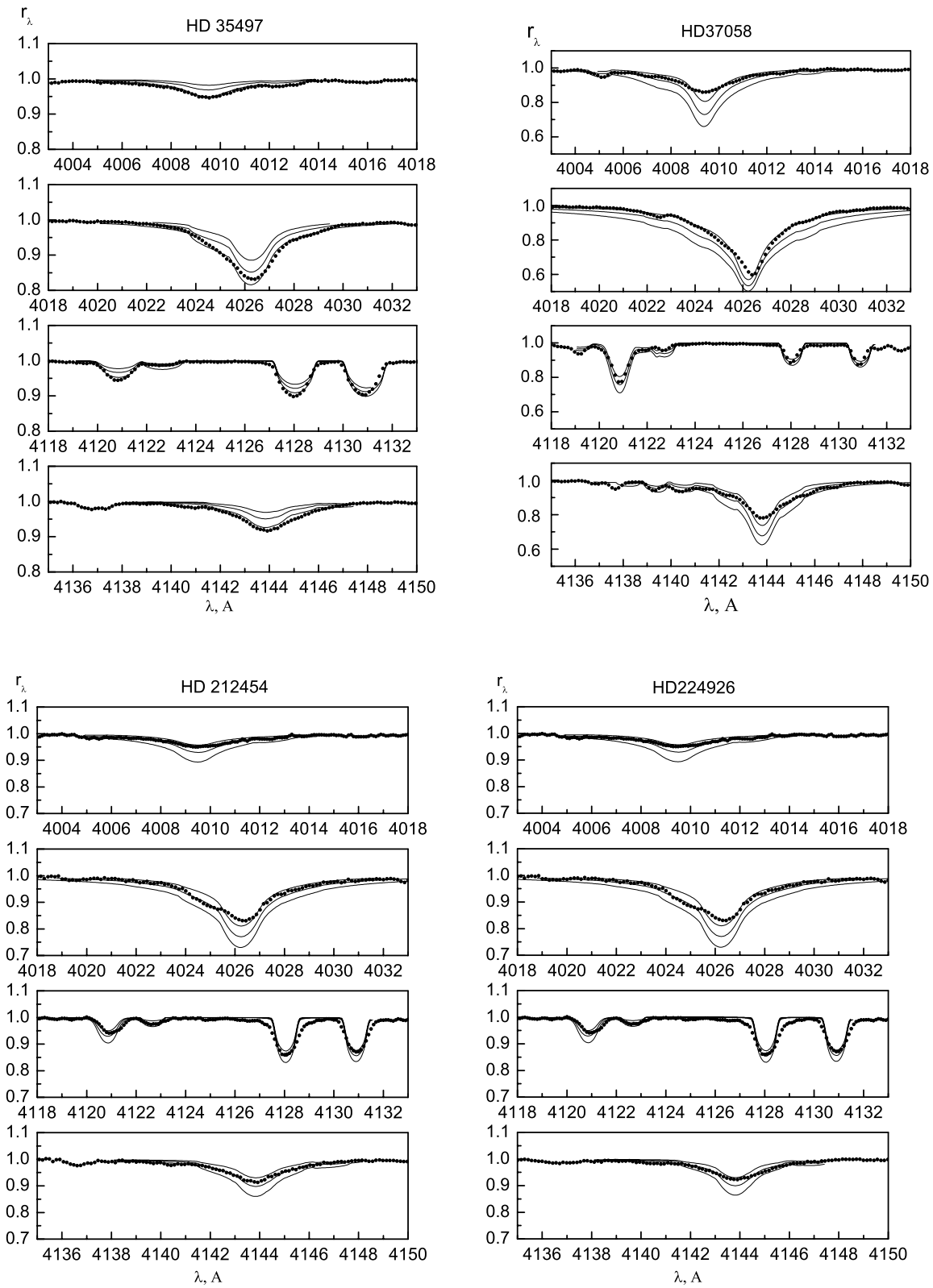
Из анализа табл. 6 и рис. 3 можно сделать вывод, что большинство химических элементов в той или иной степени находятся в избытке, в том числе у звезд со слабым полем. Звезда с сильным полем HD 37058 (на рис. 3 квадраты, соединенные линией) имеет избыток тяжелых элементов в среднем больший, чем у других звезд, как и ожидается в соответствии с найденной в [31] средней зависимостью степени химических аномалий от величины магнитного поля. Однако величина магнитного поля у HD 37058 ( $B_e = -900 \div +2500$  гауссов) по крайней мере на порядок больше, чем у остальных,

**Таблица 4.** Оценки содержания химических элементов в атмосферах исследуемых звезд

Элемент	HD 35497	HD 37058	HD 212454	HD 224926	Солнце [30]
He	11.38±0.05	10.75±0.05	10.80±0.05	10.75±0.05	10.93±0.01
C		8.52±0.15			8.39±0.05
N		8.49±0.14			7.78±0.06
O		9.13±0.16	9.51±0.20	9.57±0.20	8.66±0.05
Si	7.52±0.08	7.67±0.10	7.82±0.15	7.56±0.16	7.51±0.04
S		6.69±0.20			7.14±0.05
Ar		6.95±0.20	7.66±0.20		6.18±0.08
Ti	5.70±0.15	6.52±0.20	5.02±0.15	5.23±0.15	4.90±0.06
Cr	5.77±0.12	6.69±0.15	6.33±0.15	6.27±0.13	5.64±0.10
Mn		6.78±0.15	5.44±0.15	6.13±0.15	5.39±0.03
Fe	7.62±0.15	8.91±0.20	8.36±0.18	7.88±0.16	7.45±0.05
Ni	6.68±0.12	6.54±0.14	5.71±0.15	5.84±0.13	6.23±0.04
Sr		4.92±0.15	3.09±0.12	2.93±0.13	2.92±0.05

**Таблица 5.** Линии металлов в области линий гелия

HeI 4009					HeI 4026				
Ion	$\lambda, \text{\AA}$	$\varepsilon_i, \text{eV}$	$\log gf$	$z$	Ion	$\lambda, \text{\AA}$	$\varepsilon_i, \text{eV}$	$\log gf$	$z$
FeIII	4005.04	11.56	-1.76	1.25	FeII	4024.55	4.50	-2.48	1.09
VII	4005.70	1.82	-0.52	1.18	CrII	4024.85	11.23	-1.80	1.65
SII	4007.77	14.29	-1.36	-	CrI	4025.00	2.54	-0.58	1.06
SII	4009.37	16.26	-0.70	-	FeIII	4025.02	11.59	-2.45	1.13
CrII	4012.50	5.66	-0.89	0.91	FeII	4025.50	9.41	-1.86	0.85
FeII	4012.74	10.99	-0.56	1.19	FeII	4025.67	11.00	-1.03	1.51
ArII	4013.86	16.41	-0.88	-	TiII	4028.34	1.89	-0.99	1.04
HeI 4121					HeI 4143				
OII	4119.22	25.85	0.45	-	FeII	4138.21	4.73	-3.18	0.69
OII	4120.55	25.85	-0.52	-	FeIII	4139.35	20.61	0.52	1.83
OII	4121.48	25.83	-0.54	-	SII	4142.26	15.85	0.24	
FeII	4122.07	2.58	-3.38	1.33	CrII	4143.80	11.44	-2.29	2.87
FeII	4124.68	10.40	-2.30	1.12	FeI	4143.87	1.56	-0.51	1.49
SiII	4128.05	9.84	0.32	0.90	SII	4145.06	15.87	0.23	
SiII	4130.89	9.84	0.48	1.05	CrII	4145.78	5.3	-1.16	1.17
					SII	4146.91	17.37	0.66	
					FeII	4147.27	4.62	-3.51	1.66



**Рис. 2.** Сопоставление наблюдаемых спектров (точки) и синтетических спектров (сплошные линии) в области линий гелия  $\lambda$  4009, 4026, 4121 и 4143 Å (последовательно сверху вниз). Синтетические спектры рассчитаны для моделей с параметрами из табл. 2 и химическим составом, менявшимся на  $-0.3$ ,  $0$ ,  $+0.3$  по отношению к данным, приведенным в табл. 4.



Таблица 6. Содержание гелия  $\Delta \log \varepsilon$  в He-wk-звездах

Звезда, HD	Te, K	Источник	$\Delta \log \varepsilon$	Источник	$\langle \text{Be} \rangle^{**}$ , kG	$v \sin i$	Источник
5737	13900	[38]	-1.36	[39]	0.2	20	[5]
21699	16000	[2]	-1.50	[2]	1.4	35	[5]
37058	17000	*	-0.18	*	1.1	25	[4]
79158	13300	[38]	—	—	1.9	60	[5]
120709	16860	[32]	-1.33	[32]	0.1	20	[4]
125823	19470	[32]	-1.60	[32]	0.3	10	[31]
131120	18940	[32]	-1.70	[32]	0.0	130	[4]
142096	18060	[32]	-1.15	[32]	0.2	155	[5]
142301	17670	[32]	-2.30	[32]	2.1	50	[4]
142990	18720	[32]	-1.52	[32]	1.4	125	[5]
143669	16120	[32]	-1.65	[32]	0.0	170	[31]
144334	16440	[32]	-2.30	[32]	0.7	45	[4]
146001	14210	[32]	-1.22	[32]	0.5	90	[5]
212454	14400	*	-0.13	*	0.0	40	[5]
217833	15450	[2]	-1.81	[2]	Bs=4.5	35	[2]
224926	14000	*	-0.18	*	0.0	67	[4, 5]

\* Эта работа.

\*\* [8].

но четкой зависимости химсостава от поля не заметно.

Примечательно, что звезда HD 35497, классифицируемая как нормальная, имеет заметные аномалии химического состава. И если избыток титана может быть связан с некорректностью определения содержания, поскольку оно оценивалось по одной линии, то избыток гелия, вероятно, реален. Звезда HD 35497 может быть отнесена к типу He-rich.

В работе [32] для нескольких He-w-звезд даны содержания He, определенные по линии  $\lambda 5876 \text{ \AA}$ . Величины  $\Delta \log \varepsilon$  для них и другие характеристики приведены в табл.6. Среднеквадратические величины магнитного поля взяты из работ [8] и [33],  $v \sin i$  — из источников, указанных в последнем столбце.

## 7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный спектрофотометрический анализ атмосфер звезд HD 21699, HD 217833 и HD 220825 в наших предыдущих работах [1–3], а также HD 37058, HD 212454 и HD 224926 в данной работе, показывает, что это типичные

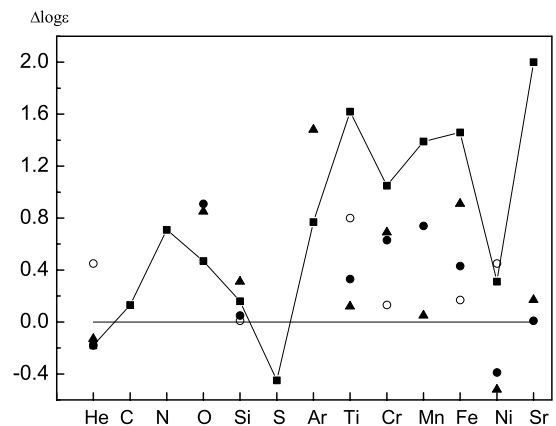
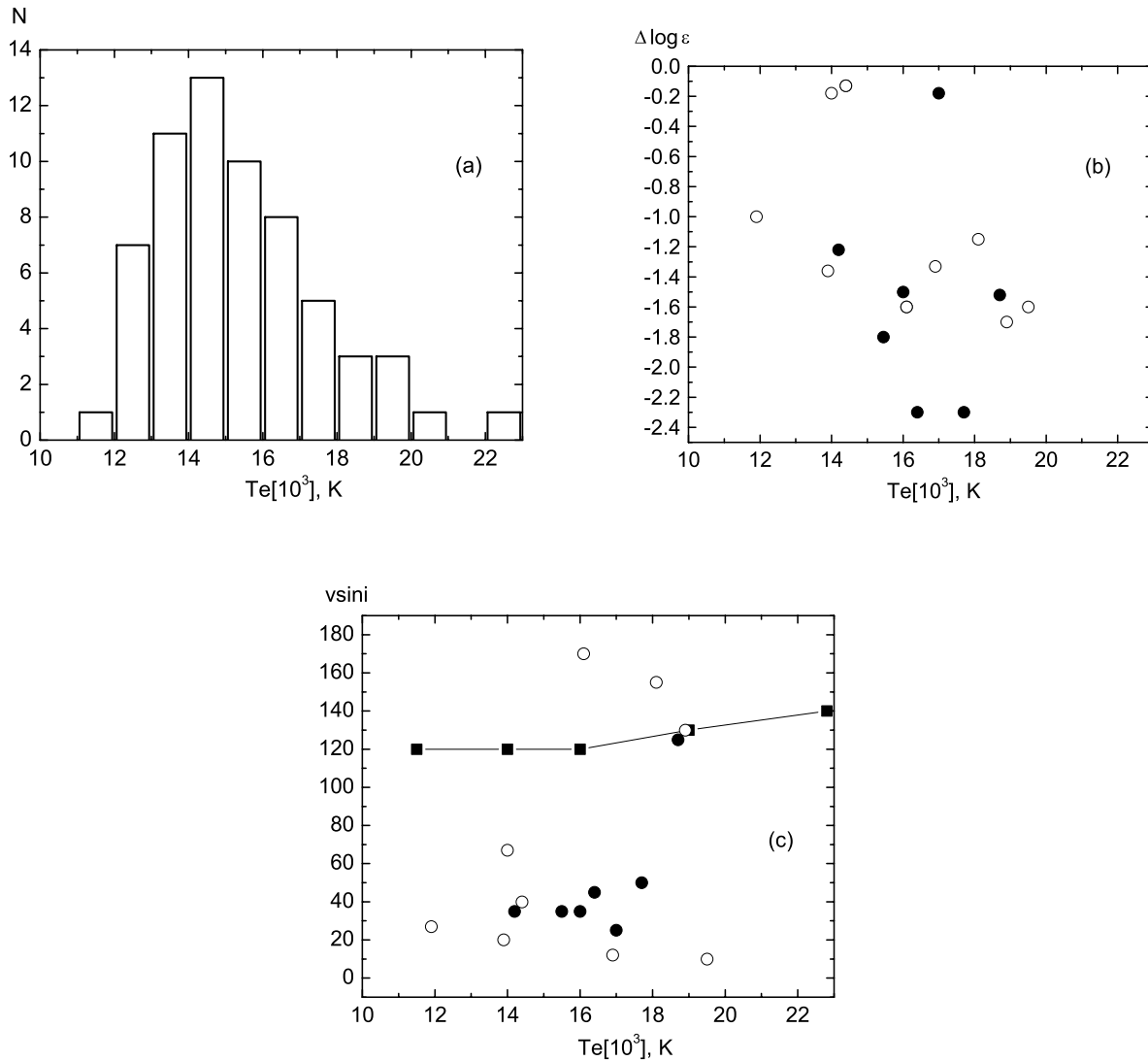


Рис. 3. Отличие содержания элементов относительно солнечного  $\Delta \log \varepsilon = \Delta \log N(EI)_* - \log N(EI)_*$  для HD 35497 (светлые кружки), HD 37058 (заполненные квадраты), HD 212454 (заполненные треугольники), HD 224926 (заполненные кружки).



**Рис. 4.** Распределение звезд He-w: (a) — по эффективной температуре, (b) — по аномальности содержания гелия, (c) — по скоростям вращения. Квадратами показано среднее распределение нормальных звезд главной последовательности. Заполненными кружками обозначены звезды с сильным магнитным полем, светлыми кружками — со слабым.

He-w-звезды, имеющие микротурбулентную скорость, близкую к нулю, и сильно различающееся магнитное поле. К настоящему времени установилось мнение, что магнитное поле стабилизирует атмосферу звезды, способствуя процессам диффузии химических элементов, что, как следствие, приводит к усилению химических аномалий. Одно из главных проявлений сепарации заключается в уходе гелия из верхних слоев атмосферы вглубь. Звезды HD 21699 и HD 217833 имеют содержание гелия в 49 и 98 раз меньше солнечного, поэтому мы относим их к экстремальным He-w-звездам. Известно, что звезды этого типа довольно разные по химическому составу: различия в содержа-

нии отдельных элементов достигают двух–трех порядков. По особенностям химсостава можно разделить звезды He-w на три группы: 1) P, Ga, 2) Si, 3) Ti, Sr. Соответственно это высоко-, средне- и низкотемпературные звезды. Наши звезды, очевидно, относятся к последней группе вследствие избытка стронция (превышение в 50–220 и более раз).

Анализ слабо намагниченных звезд с  $B_e < 100$  гауссов показал, что, несмотря на слабость магнитного поля, химические аномалии в них по величине такие же как в сильно намагниченных звездах. Ранее нами был сделан предварительный вывод [3], что степень химических аномалий не стро-

го соответствует величине магнитного поля, хотя очевидно, что оно влияет на распределение элементов по поверхности. Зависимость аномальности химсостава от магнитного поля характеризуется большим разбросом значений. Разброс зависит от ориентации звезды по отношению к наблюдателю, от величины микротурбуленции, от силы ветра и от реального содержания, которое различно у разных звезд, а также является следствием эффекта наблюдательной селекции: избыток звезд с сильными аномалиями и недостаток со слабыми химическими аномалиями. Содержание гелия и других химических элементов меняется по мере эволюционного увеличения радиуса [34]. Самые сильные аномалии образуются в области магнитных полюсов, где наиболее благоприятные условия для диффузии вследствие вертикального направления магнитных силовых линий, однако некоторые химические элементы скапливаются на магнитном экваторе. Гелий тонет наиболее эффективно при понижении температуры, так как ветер, выдувающий гелий наружу, ослабляется. Силой ветра определяется, к какому типу — He-r или He-w — принадлежит звезда. Переход между этими типами звезд по температурной шкале постепенный. Наиболее благоприятные условия для формирования звезд типа He-w оказываются в интервале температур 13000–16000 К, как это видно из распределения на рис. 4(a) (распределение построено по данным из [35]). На рис. 4(b) представлено изменение  $\Delta \log \epsilon$  для гелия с изменением температуры по данным табл.6. Белыми кружками обозначены звезды со слабым полем, черными — с сильным полем. Из рисунка видно, что максимальный дефицит гелия возникает вблизи максимума распределения по  $T_e$ . В то же время хорошо видно, что максимальный дефицит наблюдается не только у звезд с максимальным полем, но и со слабым полем, причем они часто не отличаются друг от друга по степени аномальности химсостава. С другой стороны, хорошо известно (см., например, [36]), что химические аномалии концентрируются вокруг магнитных полюсов, демонстрируя зависимость от магнитного поля. Магнитное поле *дополнительно* подавляет микротурбуленцию, облегчая возможность диффузии химических элементов, и приводит к дополнительному увеличению светового давления. У звезд с очень слабым полем влияние поля минимально, а наличие сильных химических аномалий свидетельствует о том, что микротурбуленция у них достаточно слаба и без влияния поля. Можно предположить, что она возникает вследствие медленного вращения. Однако из рис. 4(c) видно, что некоторые CP-звезды вращаются довольно быстро. Вопрос о связи аномалий со скоростями вращения остается открытым.

Еще одна проблема касается скоростей вращения звезд со слабым магнитным полем. На рис. 4(c) квадратами отмечены средние значения  $v \sin i$  нормальных звезд главной последовательности. Как и на рис. 4(b), белыми кружками обозначены значения для звезды со слабым магнитным полем, а черными — с сильным полем. Из рисунка видно, что значения  $v \sin i$  всех звезд распределяются случайным образом, т. е. не заметно никаких тенденций, связанных с магнитным полем. Практически все звезды имеют уменьшенные по сравнению с нормальными звездами  $v \sin i$ , за исключением четырех звезд: HD 131120, 142096, 142990, 143669, которые вращаются так же, как нормальные звезды, или быстрее. Это противоречит принятому мнению, а их пример показывает, что стабильные атмосферы, в которых происходит диффузия химических элементов, могут встречаться и у быстрых ротаторов. Необходимо детальное исследование таких объектов. Пример основной части звезд на рассматриваемом рисунке подтверждает наше предположение [37], что магнитное поле не участвует в торможении CP-звезд. Мы предполагаем, что медленное вращение “досталось” CP-звездам от протозвездных облаков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. В. Глаголевский, В. В. Леушин, Г. А. Чунтонов и др. в *Магнитные звезды*, ред. Глаголевский Ю. В., Кудрявцев Д. О., Романюк И. И. (Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 2004), с.198.
2. Ю.В.Глаголевский, В.В.Леушин, Г.А.Чунтонов, Д.Шуляк, Письма в Астрон. журн. **31**, 54 (2005).
3. Ю. В. Глаголевский, И. Х. Илиев, И. К. Статева, Г. А. Чунтонов, *Астрофизика* **49**, 585 (2006).
4. E. F. Borra, J. D. Landstreet and I. Thompson, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **53**, 151 (1983).
5. W. L. W. Sargent, A. I. Sargent and P. A. Strittmatter, *Astrophys. J.* **147**, 1185 (1967).
6. P. S. Conti, *Astrophys. J.* **160**, 1077 (1970).
7. G. Mathys and S. Hubrig, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 475 (1997).
8. Ю. В. Глаголевский, И. И. Романюк, Н. М. Чунакова, *Астрофиз. Исслед.* **23**, 37 (1986).
9. Ю. В. Глаголевский, Г. А. Чунтонов, *Астрофизика* **45**, 499 (2002).
10. K. Preston and K. Stepien, *Astrophys. J.* **154**, 971 (1968).
11. G. A. Chountonov and E. I. Perepelitsin, in *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk (Special astrophysical observatory RAS, 2000), p.255.
12. D. O. Kudryavtsev, in *Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars*, Ed. by Yu.V.Glagolevskij, I.I.Romanyuk (Special astrophysical observatory RAS, 2000), p.84
13. Г. А. Галазутдинов, ftp.sao.ru, (2002).

14. D. Shulyak, V. Tsymbal, T. A. Ryabchikova et al. *Astron. and Astrophys.* **428**, 993 (2004).
15. A. Uesugi and I. Fukuda, Revised Catalogue of Stellar Rotational Velocities (Kyoto Univ. Press, 1982).
16. H. A. Abt, H. Levato and M. Grosso, *Astrophys.J.* **573**, 359 (2002).
17. W. D. Heacox, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **41**, 675 (1979).
18. H. C. Sievers, *PASP* **81**, 33, (1969).
19. D. A. KlingleSmith, *Astrophys.J.* **171**, 79 (1972).
20. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
21. В. В. Леушин, Г. П. Топильская, *Астрофизика* **22**, 121 (1985).
22. Ch. Moore, *Multipllet Table of Astrophysical Interest* (Princeton, 1945).
23. А. А. Радциг, Б. М. Смирнов, *Параметры атомов и атомных ионов* (Энергоатомиздат, 1986).
24. J. M. Beckers, *A Table of Zeeman Multiplets*, (Phiaical Sciences Research Papers, No.371, 1969).
25. Г. Грим, *Спектроскопия плазмы* (Мир, М.1969).
26. Г. Грим, *Уширение спектральных линий в плазме* (Мир, М. 1978).
27. V. S. Dimitrievic, *Phys. Rev.* **31**, 316 (1985).
28. V. S. Dimitrievic, *Astron. and Astrophys.* **163**, 297 (1986).
29. V. S. Dimitrievic, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **82**, 519 (1990).
30. M. Asplund, N. Grevesse, A.J. and Sauval, *Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, ASP Conference Series, Ed. by F. N. Bash and T. G. Barnes. **30**, p.1 (2005).
31. Ю. В. Глаголевский, *Астрон. журн.* **71**, 858 (1994).
32. F. Leone and A. C. Lanzafame, *Astron. and Astrophys.* **320**, 893 (1997).
33. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova and J. Madej, *Astron. Astrophys.* **407**, 631 (2003).
34. Yu. V. Glagolevskij and F. G. Kopylova, in *Hot CP and magnetic stars*, Ed. G.Scholz (Academy of Sciences of GDR, 1990), p.82.
35. Yu. V. Glagolevskij, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 33, (2002).
36. I. K. Stateva, *Astrophys. Sp. Sci.* **226**, 329 (1995).
37. Ю. В. Глаголевский, *Астрофизика* **46**, 339, (2003).
38. Т. А. Рябчикова, *Письма в астрон.журн.* **31**, 437 (2005).
39. Z. Lopes-Garsiya, S. J. Adelman and O. I.'Pintado, *Astron. and Astrphys.* **367**, 859 (2001).

## CHEMICAL COMPOSITION OF THE He-w STARS HD 37058, 212454, AND 224926

Yu. V. Glagolevskij, V. V. Leushin, G. A. Chuntanov

Our spectrophotometric analysis of the atmospheres of HD 37058, HD 212454, and HD 224926 shows these objects to be typical He-w stars with close-to-zero microturbulence velocities, very different magnetic fields, and wide scatter of chemical anomalies. However, one of the main manifestations of separation is that helium moves from the outer layers of the atmosphere into the star's interior.

Our analysis of the stars HD 212454 and 224926 with  $B_{ej}100$  G shows that despite their weak magnetic fields they have the same degree of chemical anomaly as highly magnetized stars. Chemical composition varies over a wide range for stars with the same magnitude of magnetic field. We find the conditions in the temperature interval 13000–16000 K to be the most favorable for the formation of He-w type stars. Helium underabundance is the strongest near the maximum of the distribution and it is observed in stars with weak as well as strong fields. Because of the scatter mentioned above the degree of chemical anomalies is not strictly related to the magnitude of the magnetic field, although the field has an appreciable effect on the formation of chemical inhomogeneities at the star's surface. Its influence is minimal in stars with very weak magnetic fields and the presence of strong chemical anomalies indicates that microturbulence in these stars is sufficiently weak even without the effect of the magnetic field. It is plausible to assume that the anomalies arise due to slow rotation.

The temperature dependences of rotation velocity  $v_{sini}$  for stars with weak magnetic fields show no apparent trends associated with the magnitude of magnetic field. The rotation velocities  $v_{sini}$  of almost all stars are lower than those of normal stars, except for HD 131120, 142096, 142990, and 143669, which rotate with the same velocity or even faster than normal stars. These objects do not obey the general rule and their example shows that stable atmospheres can also be found among fast rotators and that magnetic field takes no part in the spin-down of CP stars. We believe that CP-stars inherited their slow rotation from protostellar clouds.