

УДК: 524.35

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХРОМА В АТМОСФЕРАХ ХИМИЧЕСКИ-ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД. I. ДИАГНОСТИКА

И.С.САВАНОВ¹, О.П.КОЧУХОВ^{1,2}, В.В.ЦЫМБАЛ²

Поступила 30 августа 2000

Принята к печати 15 ноября 2000

На основе ПЗС-спектрограмм, полученных с высоким разрешением в фокусе Куде 2.6-метрового телескопа КрАО, исследованы линии Cr II, лежащие в крыльях водородной линии H_{β} . С использованием метода спектрального синтеза проведена диагностика вертикальной стратификации хрома в атмосферах двух нормальных и восьми химически - пекулярных звезд. Для холодных Ar-звезд β CrB, HR 7575, γ Equ и 10 Aq1 выявлено увеличение содержания Cr с глубиной. Для всех Am-звезд и для обеих Hg-Mn компонент 46 Dra предположено некоторое увеличение содержания Cr в верхних слоях атмосфер. В атмосферах горячих пятнистых Ar-звезд 17 Com и α^2 CVn вертикальное распределение хрома, по-видимому, однородно.

1. *Введение.* Экспериментальное обнаружение и исследование вертикальной стратификации химических элементов в атмосферах CP-звезд является необходимым этапом построения последовательной теории, объясняющей наблюдаемые у этих объектов аномалии химических составов. Наиболее разработанная на сегодняшний день теория диффузии [1,2] трактует аномалии химического состава как чисто поверхностный эффект, возникающий в стабильной звездной атмосфере в результате вертикальной стратификации химических элементов под действием гравитации и радиационного давления. Согласно теории диффузии, многие элементы могут иметь значительные вертикальные градиенты содержания в областях формирования линейчатого спектра. Это предсказание теории диффузии может быть проверено путем прямой количественной оценки величины стратификации химических элементов. Несомненно, что наблюдательный материал такого рода позволит наложить на область изменения свободных параметров в теории диффузии гораздо большие ограничения, чем простое сравнение с теорией *поверхностных* (т.е. усредненных по всей области формирования спектральных линий) содержаний.

В настоящее время применяются два основных способа изучения вертикальной стратификации: анализ формы профилей сильных спектральных линий и дифференциальное исследование линий, формирующихся в звездной атмосфере на разной глубине.

Первый способ был применен Смитом [3] при анализе резонансной линии Ga III λ 1495Å в спектрах Hg-Mn звезд и Бабелем [4,5], который исследовал

линию K Ca II в спектрах звезд типа Sr-Cr-Eu. В обеих работах было доказано наличие вертикальной стратификации рассмотренных химических элементов. В ряде работ делались попытки объяснить вертикальной стратификацией аномальные профили линий He, наблюдаемые в спектрах He-g и He-w звезд. Хангер [6] показал, что для He-w звезды HD 49333 профиль линий He I λ 4471 и 4388 Å возможно удовлетворительно описать только при помощи модели со стратификацией He. В то же время Болендер [7] обнаружил, что две альтернативные модели могут объяснить аномальные профили линий He I λ 4471 и 4437 Å у звезды δ Oп C: поверхностная неоднородность распределения He и вертикальная стратификация этого химического элемента.

Хохлова [8] и Романюк и др. [9] применили второй способ при исследовании спектральных линий, расположенных до и после бальмеровского скачка и образующихся в звездной атмосфере на существенно различных глубинах. В первой работе для Ar-звезды HD 168733 не было выявлено заметного различия содержаний, определенных по разным линиям. В то же время в [9] было получено свидетельство в пользу некоторого увеличения содержания Fe в верхних слоях атмосферы магнитной Ar-звезды α^2 CVn. Различие содержаний, определенных по видимым и ультрафиолетовым линиям, было отмечено также для Ga [10] и для элементов группы железа (Cr и Fe) [11]. Хохлова и Топильская [12] предложили использовать для обнаружения вертикальной стратификации дифференциальный анализ спектральных линий, находящихся на разном расстоянии от ядер бальмеровских линий водорода. В этом случае стратификация должна проявляться в виде зависимости содержания элемента от расстояния $\Delta\lambda$ до центра водородной линии. Наиболее удобными для такого анализа являются линии 30-го мультиплета Cr II, расположенные в крыльях H_β . В работе [12] линии этого мультиплета были изучены в фотографических спектрах α^2 CVn и Сириуса. Зверко и Жюжновский [13,14] провели аналогичное исследование ретиконных спектров α^2 CVn, ϵ UMa, Сириуса и Веги. Результаты этих исследований подробно обсуждались нами в предыдущей работе [15], которая была посвящена анализу линий 30-го мультиплета Cr II в спектрах нескольких Ar и Am-звезд. Основным результатом этого исследования стало обнаружение заметного увеличения содержания Cr с глубиной в атмосферах холодных Ar-звезд. Для металлических звезд в [15] было предположено некоторое увеличение содержания Cr в верхних атмосферных слоях.

В данной работе мы продолжаем изучение вертикальной стратификации химических элементов в атмосферах CP-звезд. Кроме уточнения вывода об отсутствии вертикальной стратификации Cr в атмосферах нормальных звезд, сделанного на основе изучения линий 30-го мультиплета в спектрах Проциона и ι Peg, мы попытались ответить на вопрос о возможности исследования стратификации других химических элементов, спектральные линии которых лежат в крыльях H_β . На основании новых наблюдений была проведена диагностика вертикального распределения Cr в атмосферах четырех Am,

двух Hg-Mn и двух магнитных Ar-звезд.

2. *Наблюдательный материал и методика его анализа.* Новые наблюдения звезд по программе исследования вертикальной стратификации Cг были проведены в октябре 1997г. и январе 1998г. Для шести CP и одной нормальной звезды ι Peg в первой камере спектрографа фокуса Куде 2.6-метрового телескопа КрАО были получены по две спектрограммы размером 67 Å, центрированные на красное и синее крыло H_{β} . В целом наблюдения охватывают интервал длин волн λ 4800–4920 Å. В качестве приемного устройства использовалась ПЗС-камера фирмы Фотометрикс. При спектральном разрешении $\lambda/\Delta\lambda = 32000$ было достигнуто отношение сигнала к шуму $S/N \approx 150 - 200$. Исключение составили наблюдения Сириуса, для которого удалось получить спектры с меньшим уровнем шумов: $S/N \approx 400$.

В данной работе исследовались также линии Cг II в спектре двойной ртутно-марганцевой звезды 46 Dra. Использованный нами наблюдательный материал описан в работе Цымбала и др. [16] и представляет собой две эшелле-спектрограммы, полученные для фаз 0.067 и 0.169 орбитального движения компонент 46 Dra. Из каждого эшелле-спектра были извлечены по два порядка, охватывающих интервал длин волн $\lambda\lambda$ 4769–4913 Å. Спектры 46 Dra были получены с помощью эшелле-спектрографа 2.7-метрового телескопа обсерватории МакДональд (США). Разрешение спектрограмм составляет $\lambda/\Delta\lambda \approx 10^5$, а уровень шумов - $S/N \approx 200$.

В табл.1 дано полное описание нашего наблюдательного материала. Кроме названий звезд, их HD и HR номеров, времени наблюдений, юлианских дат и границ спектральных интервалов, указаны также фазы

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О НАБЛЮДЕНИЯХ

HD	HR	Звезда	Дата	HJD 2400000+	Фаза	Длины волн
27962	1389	68 Tau	18.01.1998	50832.435	-	4797-4864
			18.01.1998	50832.448	-	4849-4917
33524	1672	16 Ori	18.01.1998	50832.480	-	4797-4864
			18.01.1998	50832.491	-	4850-4917
47105	2421	γ Gem	19.01.1998	50832.523	-	4850-4918
			19.01.1998	50832.527	-	4798-4865
48915	2491	α CMa	18.01.1998	50832.462	-	4850-4918
			18.01.1998	50832.465	-	4798-4865
60179	2891	α Gem	19.01.1998	50832.562	-	4798-4865
			19.01.1998	50832.565	-	4851-4918
108662	4752	17 Com	19.01.1998	50832.609	0.114	4851-4918
			19.01.1998	50832.628	0.117	4798-4865
112413	4915	α^2 CVn	19.01.1998	50832.639	0.128	4798-4865
			19.01.1998	50832.649	0.130	4851-4918
173524	7049	46 Dra	03.05.1996	50206.947	0.067	4769-4913
			04.05.1996	50207.943	0.169	4769-4913
210027	8430	ι Peg	16.10.1997	50738.323	0.516	4802-4869
			16.10.1997	50738.340	0.518	4855-4922

вращения α^2 CVn и 17 Com, вычисленные для значений периода и эфемериды, полученных, соответственно, в [17] и [18]. Для спектрально-двойных звезд 46 Dra и ι Peg приведена фаза орбитального движения согласно спектроскопическим орбитам, найденным, соответственно, в работах [19] и [20].

Отметим, что магнитная Ar-звезда α^2 CVn и Am-звезда γ Gem уже были рассмотрены нами ранее [15]. Дополнительное исследование α^2 CVn необходимо, так как эта звезда имеет заметную переменность спектральных линий Sr. Возможно, что изменение поверхностного содержания Sr тесно связано с изменением вертикального распределения этого химического элемента. Что же касается γ Gem, то в [15] анализировались спектрограммы, полученные в 1995г. с недостаточным разрешением и отношением сигнала к шуму. Новые наблюдения проводились для уточнения результатов диагностики вертикального распределения Sr и способствовали большей однородности нашего наблюдательного материала.

Кроме собственных наблюдений мы также использовали эшелле-спектр Проциона, полученный с помощью 1-метрового телескопа CAO. Этот наблюдательный материал был обработан и любезно предоставлен сотрудниками CAO.

Обработка наших наблюдений включала стандартные процедуры учета темнового тока ПЗС-матрицы, деления на плоское поле, вычитания фона неба и построения с помощью спектра сравнения дисперсионной кривой. При этом использовалась программа SPE, разработанная в КрАО С.Г.Сергеевым. Так же, как и в работе [15], уровень непрерывного спектра определялся на основании расчетов синтетических спектров H_β . После проведения континуума отдельные участки спектров исследовавшихся звезд были объединены в полные профили линий H_β .

Параметры моделей звездных атмосфер, принятые при расчетах общих профилей водородных линий и профилей отдельных линий Sr II, приведены

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДОВАННЫХ ЗВЕЗД

Звезда	$T_{\text{эфф}}$	logg	ξ	[M/H]	Литература
46 Dra A	11700	4.00	0.0	+0.2	[19]
α^2 CVn	11500	4.00	2.0	+0.5	[12]
46 Dra B	11100	4.10	0.0	+0.2	[19]
17 Com	10300	4.30	1.5	+0.5	[21]
α Gem	10200	4.00	3.0	0.0	[22]
α CMa	10150	4.30	2.0	0.0	[23]
68 Tau	9300	3.75	4.0	0.0	[24]
γ Gem	9300	3.40	2.0	0.0	[25]
16 Ori	7900	4.35	6.0	0.0	[26]
ι Peg A	6750	4.35	1.5	0.0	[27]
α CMi	6650	4.00	1.8	0.0	[28]
ι Peg B	5350	4.57	1.0	0.0	[27]

в табл.2. После названия звезды указаны ее эффективная температура, ускорение силы тяжести на поверхности, микротурбулентная скорость и металличность по отношению к солнечному химическому составу. В последней колонке даются ссылки на работы, в которых были определены использованные нами параметры атмосфер. Из этих же исследований были взяты данные о химических составах атмосфер, необходимые при расчетах синтетических спектров. Все модели атмосфер рассчитывались с помощью системы STARSP [29], в которой используется модифицированная программа ATLAS9 и таблицы ODF Куруца [30].

Анализ линий Cr II 30-го мультиплета проводился методом спектрального синтеза путем расчета профилей линий Cr по программе STARSP. Методика расчета синтетических спектров и их уширения для учета инструментального профиля и вращения звезд подробно описана в [15]. Там же можно найти обсуждение выбора системы сил осцилляторов спектральных линий Cr II и списка блендирующих линий.

При расчете синтетических спектров мы выяснили, что спектр α^2 CVn лучше всего описывается синтетическим, уширенным с $V \sin i = 15$ км/с. Для Проциона мы использовали значение $V \sin i = 6$ км/с, найденное ранее [15] по атласу Гриффин и Гриффин [31]; для 16 Ori, 68 Tau, α Gem и γ Gem мы нашли, соответственно, $V \sin i = 7, 10, 18$ и 8 км/с. С учетом точности определения $V \sin i$, которая в нашем исследовании не превышает 2-3 км/с, проекция скорости вращения на луч зрения, найденная для γ Gem, не противоречит значению $V \sin i = 10.2 \pm 0.2$ км/с, полученному в [32]. При изучении линий Cr II в спектрах 17 Com и Сириуса были приняты значение $V \sin i = 19$ и 16 км/с согласно работам [21] и [33]. Спектральные линии ι Peg и 46 Dra оказались настолько узкими, что они удовлетворительно аппроксимируются уже после учета инструментального профиля спектрографа.

Таблицы 3а,б суммируют результаты, полученные при расчетах профилей линий Cr. В первой колонке таблиц приведены длины волн линий Cr II,

Таблица 3а

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНИЙ Cr II В СПЕКТРАХ НОРМАЛЬНЫХ ЗВЕЗД И Hg-Mn-ЗВЕЗД

λ (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)	$\log gf$ VALD	α CMi атлас [31]	α CMi CAO	ι Peg A	ι Peg AB	46 Dra A	46 Dra B
4812.34	48.98	-1.96	-6.38	-6.27	-6.35	-6.44	-6.46	-5.96
4824.13	37.19	-0.97	-6.38	-6.10	-6.26	-6.40	-6.38	-5.71
4836.23	25.09	-1.96	-6.33	-6.31	-6.38	-6.43	-6.33	-5.85
4848.24	13.08	-1.15	-6.48	-6.44	-6.39	-6.58	-6.30	-5.70
4856.19	5.13	-2.14	-6.30	-6.27	-6.27	-6.37	-6.27	-5.60
4864.33	2.98	-1.36	-6.35	-6.25	-6.40	-6.48	-6.12	-5.58
4876.40	15.08	-1.46	-6.53	-6.24	-6.39	-6.50	-6.35	-5.85
4884.61	23.29	-2.10	-6.45	-6.30	-6.40	-6.32	-6.33	-5.90

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНИЙ Cr II В СПЕКТРАХ
Ar И Am-ЗВЕЗД

λ (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)	$\alpha^2 CV_{\Pi}$ $\varphi = 0.13$	17 Com $\varphi = 0.12$	αGem	αCMa	68 Tau	γGem	16 Ori
4812.34	48.98	-5.24	-3.79	-6.11	-5.82	-6.02	-6.37	-6.05
4824.13	37.19	-5.69	-3.51	-6.20	-5.80	-6.20	-6.49	-6.20
4836.23	25.09	-5.18	-3.72	-6.02	-5.70	-5.85	-6.24	-5.90
4848.24	13.08	-5.65	-3.50	-6.20	-5.71	-6.07	-6.35	-6.15
4856.19	5.13	-4.80	-3.41	-5.90	-5.65	-5.78	-6.20	-5.72
4864.33	2.98	-5.05	-3.64	-5.90	-5.60	-5.88	-6.18	-5.80
4876.40	15.08	-5.28	-3.56	-6.10	-5.72	-5.99	-6.33	-5.96
4884.61	23.29	-4.99	-3.60	-6.05	-5.78	-5.90	-6.32	-5.86

во втором - расстояние до центра линии H_{β} , являющееся характеристикой глубины формирования линии, в третьей колонке таблицы 3а указаны уточненные силы осцилляторов линий 30-го мультиплета [34,35], взятые из базы данных VALD [36]. Далее в таблицах 3 а,б приводятся содержания Cr, полученные нами для восьми CP-звезд, ι Peg и Проциона.

3. *Диагностика вертикальной стратификации Cr.* На рис.1 (а-с) представлены зависимости содержания Cr от расстояния $\Delta\lambda$ до центра линии H_{β} , полученные для десяти исследованных звезд. Для Сириуса показаны также содержания Cr, найденные по линиям 30-го мультиплета Зверко и Жижновским [13].

Результаты данной работы и предыдущего исследования [15] суммированы в табл.4, во втором столбце которой приведен коэффициент линейной регрессии a и его ошибка σ_a , найденные при аппроксимации формулой $\log(Cr/N) = a \cdot \Delta\lambda + b$ зависимостей содержания Cr от $\Delta\lambda$. В третьем столбце табл.4 дано среднее содержание хрома $\langle \log(Cr/N) \rangle$, полученное по линиям 30-го мультиплета. Коэффициент a равен тангенсу угла наклона зависимости $\log(Cr/N)$ от $\Delta\lambda$ и является количественной характеристикой величины вертикального градиента содержания Cr. Отрицательные значения a соответствуют увеличению содержания хрома в верхних слоях атмосферы звезды, тогда как значения $a > 0$ свидетельствуют об обратном эффекте. Численное представление результатов анализа линий Cr II дополняет графическое представление, использованное в [15], позволяет точнее оценить значимость полученных результатов и выявить общие закономерности вертикальной стратификации Cr в атмосферах CP-звезды.

Строго говоря, зависимость $\log(Cr/N)$ от $\Delta\lambda$ может быть интерпретирована различным образом. В разделе 3 данной работы для удобства изложения результатов нашего исследования мы будем говорить об a именно как о параметре вертикальной стратификации Cr, хотя более правильно было бы

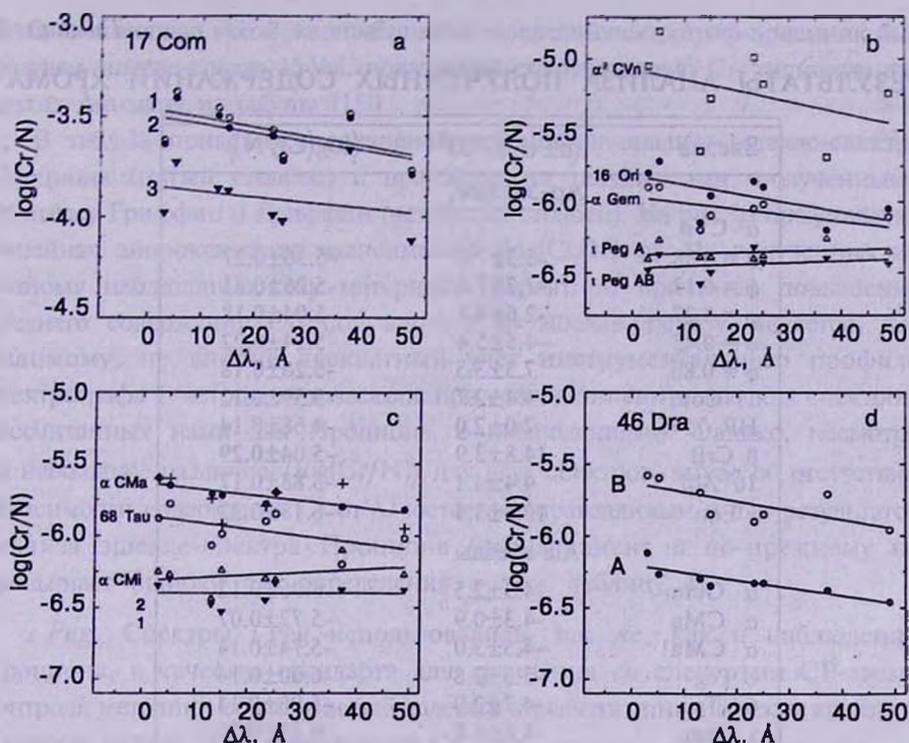


Рис. 1. а) Линейная аппроксимация зависимости содержания Cr от расстояния до центра линии H_β , найденной для 17 Com с использованием моделей атмосфер с $T_{\text{эф}}=10300\text{K}$, $\log g = 4.3$, $[M/H]=+0.0$ (прямая 1, светлые кружки), $T_{\text{эф}}=10300\text{K}$, $\log g = 4.3$, $[M/H]=+0.5$ (прямая 2, темные кружки). Темными треугольниками и прямой 3 обозначены результаты, найденные по модели атмосферы с параметрами $T_{\text{эф}}=11000\text{K}$, $\log g = 4.0$, $[M/H]=+0.0$, использованными в работе [40]. б) То же, что и на рис. 1а, но для 16 Ori (темные кружки), α Gem (светлые кружки) α^2 CVn (квадраты) и 1 Peg (треугольники). Результаты анализа, проведенного с учетом двойственности 1 Peg показаны светлыми треугольниками и обозначены 1 Peg A, а без учета - темными треугольниками и обозначены 1 Peg AB. в) То же, что и на рис. 1а, но для Сириуса (темные кружки), 68 Tau (светлые кружки) и Проциона (треугольники). Крестами указаны данные, приведенные для Сириуса в [13]. Темные треугольники и прямая 1 соответствуют результатам анализа атмосферы Проциона [31], а светлые треугольники и прямая 2 - анализу спектра этой звезды, полученного в САО. д) То же, что и на рис. 1а, но для 46 Dra A (темные кружки) и 46 Dra B (светлые кружки).

называть эту величину "характеристикой зависимости $\log(\text{Cr}/\text{N})$ от $\Delta\lambda$, полученной в приближении постоянства с глубиной $\log(\text{Cr}/\text{N})$, ξ_r и отсутствия магнитного поля". В нашей следующей статье мы проверим, насколько гипотеза о вертикальной неоднородности распределения Cr согласуется с наблюдаемыми интенсивностями линий 30-го мультиплета, а также исследуем возможность альтернативного объяснения наблюдений в рамках предположения о зависимости с глубиной ξ_r .

3.1. *Нормальные звезды. α CMi (Процион).* В предыдущей работе [15] мы использовали Процион в качестве стандартной звезды с нормальным химическим составом, стратификация Cr в атмосфере которой заведомо отсутствует. Действительно, для Проциона мы не нашли по линиям 30-го мультиплета какой-либо зависимости содержания Cr от $\Delta\lambda$. Однако этот

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПОЛУЧЕННЫХ СОДЕРЖАНИЙ ХРОМА

Звезда	$(a \pm \sigma_a) \times 10^3$	$\langle \log(\text{Cr}/\text{N}) \rangle$
Ap-звезды		
α^2 CVn		
$\varphi = 0.08$	-3.3 ± 7.0	-5.36 ± 0.27
$\varphi = 0.13$	-7.7 ± 7.4	-5.26 ± 0.31
$\varphi = 0.27$	-2.6 ± 4.7	-5.04 ± 0.18
$\varphi = 0.45$	-4.5 ± 5.4	-5.24 ± 0.22
$\varphi = 0.80^1$	7.3 ± 3.5	-5.26 ± 0.18
17 Com	-4.4 ± 2.7	-3.59 ± 0.12
HR 7575	7.0 ± 2.0	-4.68 ± 0.14
β CrB	14.8 ± 3.9	-5.04 ± 0.29
10 Aql	4.4 ± 4.1	-5.83 ± 0.17
γ Equ	10.6 ± 3.5	-6.18 ± 0.22
Am-звезды		
α Gem	-4.3 ± 2.5	-6.06 ± 0.12
α CMa	-4.3 ± 0.9	-5.72 ± 0.07
α CMa ¹	-4.5 ± 3.0	-5.74 ± 0.14
σ Peg	-5.3 ± 2.8	-6.00 ± 0.14
68 Tau	-4.7 ± 2.9	-5.96 ± 0.14
γ Gem	-4.6 ± 1.8	-6.31 ± 0.10
15 Vul	-6.2 ± 2.4	-6.38 ± 0.13
16 Ori	-6.4 ± 3.5	-5.96 ± 0.17
32 Aqr	-3.6 ± 2.6	-6.19 ± 0.11
Hg-Mn-звезды		
46 Dra A	-5.4 ± 1.3	-6.32 ± 0.10
46 Dra B	-6.4 ± 2.5	-5.76 ± 0.14
Нормальные звезды		
α CMi ²	0.0 ± 2.0	-6.40 ± 0.08
α CMi ³	1.9 ± 2.3	-6.27 ± 0.09
ι Peg A ⁴	0.8 ± 1.5	-6.36 ± 0.06
ι Peg AB ⁵	1.2 ± 2.0	-6.44 ± 0.08

¹ По данным Зверко и Жижновского [13]; ² результаты анализа атласа Проциона [31]; ³ результаты анализа спектра Проциона, полученного в САО; ⁴ анализ линий Cr II проведен с учетом двойственности звезды; ⁵ анализ линий Cr II проведен без учета двойственности звезды.

вывод основывался не на собственных наблюдениях, а на использовании атласа Проциона из работы Гриффин и Гриффин [31]. В связи с этим было высказано опасение, что такая неоднородность наблюдательного материала не позволяет надежно исключить наличие слабой зависимости от $\log(\text{Cr}/\text{N})$ от $\Delta\lambda$, обусловленной не стратификацией, а неправильным расчетом профиля H_β или ошибками в шкале относительных сил осцилляторов линий 30-го мультиплета Cr II. Поэтому, в данной работе мы исследовали спектр еще одной стандартной звезды - ι Peg (см. ниже) и, кроме того, провели анализ линий Cr II в эшелле-спектре Проциона, полученном на 1-метровом телескопе

САО (с помощью такой же комбинации телескоп-спектрограф-приемник был получен эшелле-спектр 15 Vul, показавшей стратификацию Cr, типичную для других Am-звезд из работы [15]).

В табл.3а приводится сравнение результатов анализа эшелле-спектра Проциона (пятый столбец) с предыдущими результатами, полученными по атласу Гриффин и Гриффин (четвертый столбец). На рис.1d представлена линейная аппроксимация зависимостей $\log(Cr/N)$ от $\Delta\lambda$, полученных по разному наблюдательному материалу. Вероятной причиной повышения среднего содержания Cr, полученного по эшелле-спектру, является, по-видимому, не вполне адекватный учет инструментального профиля спектрографа 1-метрового телескопа при сравнении синтетических спектров, рассчитанных нами для Проциона, с наблюдениями. Однако, несмотря на небольшое различие $\langle \log(Cr/N) \rangle$ для двух спектров, вывод об отсутствии зависимости содержания Cr от $\Delta\lambda$ остается справедливым и для результатов анализа эшелле-спектра Проциона (коэффициент α по-прежнему не превышает ошибки его определения σ_α , см. таблицу 4).

1 Peg. Спектры *1 Peg* использовались, так же, как и наблюдения Проциона, в качестве стандарта для сравнения со спектрами CP-звезд, контроля методики обработки наблюдений и расчета синтетических спектров в районе линий 30-го мультиплета Cr.

Особенность *1 Peg* состоит в том, что эта звезда является спектрально-двойной, компоненты которой имеют сравнительно небольшое различие в массах и эффективных температурах. Элементы спектроскопической орбиты *1 Peg* получены Фекелом и Томкин [20]. Параметры моделей атмосфер компонент были определены Любимковым и др. [27] (см. также работы [37] и [38]) и указаны в табл.2. Эффективные температуры первичного и вторичного компонентов *1 Peg* составляют $T_{\text{эфф}}(A) = 6750 \pm 150\text{K}$ и $T_{\text{эфф}}(B) = 5350 \pm 350\text{K}$. При столь небольшой разнице эффективных температур пренебречь вкладом вторичного компонента в общий спектр было бы некорректно. Как показал Любимков [39], это может привести к существенным ошибкам в определении химического состава первичного компонента, вплоть до получения ложных аномалий содержания некоторых элементов. Единственно правильным подходом в этом случае является построение суммарного синтетического спектра двойной звезды.

При исследовании линий Cr II в спектре *1 Peg* мы, как и в предыдущей работе, рассчитывали синтетические спектры по программе STARSP [29]. Сложение спектров *1 Peg* A и B осуществлялось с помощью подпрограммы BINARY, которая является частью комплекса STARSP. При этом для получения суммарного спектра использовалась следующая формула:

$$\left(\frac{I}{I_C} \right)_{SB} = \frac{I^A + I^B \cdot (R_B/R_A)^2}{I_C^A + I_C^B \cdot (R_B/R_A)^2}, \quad (1)$$

где $(I/I_C)_{SB}$ -суммарный нормированный спектр, потоки в линии и в

континууме $-I$ и I_c - вычисляются для компонентов спектрально-двойной звезды по заданным моделям атмосфер; отношение радиусов R_A/R_B можно найти из параметров моделей атмосфер и элементов спектроскопической орбиты, используя простое соотношение:

$$\frac{R_A}{R_B} = \sqrt{\frac{g(B)}{g(A)} \cdot \frac{M_A}{M_B}} \quad (2)$$

Для ι Peg мы определили R_A/R_B , используя отношение масс компонентов, найденное Фекелом и Томкин [20], и ускорения сил тяжести из работы Любимкова и др. [27]: $R_A/R_B = 1.64 \pm 0.25$ (ошибка обусловлена в основном неопределенностью $\log g$, которая составляет по оценкам [27] 0.05 dex для первичного компонента и вдвое больше для ι Peg B). Кроме этого, при сложении спектров мы учли, что для фазы орбитального движения 0.517, в которую был получен наш наблюдательный материал, разница лучевых скоростей компонентов, согласно элементам орбиты [20], должна составлять $\Delta V_r = 36.5$ км/с.

Содержания Cr II, полученные по линиям 30-го мультиплета, приведены в шестом столбце табл.3а. Соответствующая зависимость содержания Cr от расстояния до центра H_p показана на рис.1б. Как и ожидалось, стратификация Cr в атмосфере ι Peg A отсутствует.

Для сравнения в седьмом столбце табл.3а и на рис.1б приведены также результаты (обозначены как ι Peg AB), полученные при исследовании спектра ι Peg без учета вклада вторичного компонента. Интересно отметить, что хотя среднее содержание Cr при таком упрощенном подходе получилось ниже, чем при учете двойственности звезды, общий характер зависимости содержания Cr от $\Delta\lambda$ заметно не изменился. Этот факт позволяет сделать предположение о том, что возможные ошибки, связанные с пренебрежением двойственностью некоторых звезд, исследованных в [15], (например, γ Gem и β CrB), способны исказить только абсолютное содержание Cr, но, по-видимому, не могут быть причиной появления характерных зависимостей $\log(\text{Cr}/N)$ от $\Delta\lambda$.

3.2. Ар звезды. Результаты анализа спектра α^2 CVn, полученного для фазы вращения 0.13, не противоречат предыдущим результатам [15] для других фаз. Все значения параметра стратификации a и $\langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$, найденные нами для α^2 CVn, собраны в табл.4. Для всех спектров разброс содержаний Cr, определенных по линиям 30-го мультиплета достаточно большой. По этой причине систематически отрицательные значения a не могут рассматриваться как строгое доказательство увеличения содержания Cr в верхних слоях атмосферы α^2 CVn. Действительно, так как $|a| = \sigma_a$, то наши результаты не противоречат и данным Хохловой и Топильской [12], которые обнаружили, что наблюдаемые (для фазы 0.25) эквивалентные ширины линий Cr II хорошо согласуются с гипотезой об однородном распределении Cr. Что же касается работы Зверко и Жижновского [14], в

которой спектры α^2 CVn были исследованы в нескольких фазах (в том числе и фазах, близких к нашим наблюдениям) и для всех фаз было получено увеличение $\log(\text{Cr}/N)$ с глубиной, то, по нашему мнению, к этим результатам следует относиться с осторожностью по следующим причинам. Во-первых, в [14] линии Cr II были исследованы методом эквивалентных ширин. Эта методика вряд ли подходит для α^2 CVn, спектр которой чрезвычайно богат сильными и переменными линиями редкоземельных элементов, блендирующих линии Cr II. Во-вторых, значимое отличие a от нуля было получено только после коррекции относительных сил осцилляторов линий 30-го мультиплета. При этом изначальная зависимость $\log(\text{Cr}/N)$ от $\Delta\lambda$, полученная в [14], не является статистически значимой.

Большого внимания, по-видимому, заслуживают результаты более ранней работы Зверко и Жижновского [13], в которой авторы использовали метод спектрального синтеза и без какой-либо коррекции $\log gf$ получили заметное увеличение $\log(\text{Cr}/N)$ в нижних слоях атмосферы α^2 CVn. (Результаты [13] представлены совместно с нашими данными в табл.4. Параметр a не превышает $3\sigma_a$, однако заметно отличается от отрицательных a , полученных нами.) К сожалению, нам пока не удалось получить наблюдения α^2 CVn для фазы 0.80, исследованной авторами [13]. Вместе с тем, в пользу сопоставимости их результатов с нашими данными для других фаз вращения α^2 CVn говорит хорошее согласие содержаний Cr, полученных в [13] и нами для Сириуса (см. ниже).

В данной работе был проведен анализ спектра еще одной горячей пятнистой Sr-Cr-Eu звезды -17 Com. Результаты исследования линий Cr II в ее спектре представлены на рис. 1а и в четвертом столбце табл.3б. Наблюдения 17 Com были получены для фазы вращения 0.12, которая, согласно картам поверхностного распределения Cr [40], не соответствует каким-либо характерным деталям (пятнам с избытком или дефицитом Cr). В отличие от α^2 CVn, 17 Com обладает значительно большим содержанием хрома и меньшим содержанием редких земель. Линии Cr II доминируют в ее спектре и практически свободны от блендирования, несмотря на большую, чем у α^2 CVn скорость вращения. В целом зависимость $\log(\text{Cr}/N)$ от $\Delta\lambda$ имеет тот же вид, что и для α^2 CVn, но с несколько меньшим разбросом относительно аппроксимирующей прямой ($|a| = 1.7\sigma_a$). Несомненно, что, так же, как и для α^2 CVn, полную картину характера стратификации Cr можно получить только при исследовании спектров 17 Com в течение всего периода ее вращения.

На рис.1а представлены также результаты исследования чувствительности содержаний Cr, определенных по линиям 30-го мультиплета, от выбора параметров модели атмосферы 17 Com. Уменьшение металличности на 0.5 dex приводит к одинаковому увеличению содержаний Cr на 0.02-0.05 dex и не изменяет наклона зависимости $\log(\text{Cr}/N)$ от $\Delta\lambda$. (При этом остальные

параметры атмосферы звезды, принятые согласно [21] - $T_{\text{эфф}} = 10300\text{K}$, $\log g = 4.3$, $\xi_t = 1.5 \text{ км/с}$ - при изменении $[M/H]$ не варьировались). Гораздо более заметное уменьшение всех содержаний происходит при использовании в расчетах синтетических спектров модели атмосферы, примененной для 17 Com в [40] ($T_{\text{эфф}} = 11000\text{K}$, $\log g = 4.0$, $\xi_t = 2.3 \text{ км/с}$). Однако даже изменение $T_{\text{эфф}}$ на 700K и $\log g$ на 0.3dex (величины, соответствующие самым консервативным оценкам точности определения параметров атмосферы A-звезды) не может привести к изменению знака a . Таким образом, общий характер стратификации Cr, определяемый по линиям Cr II, малочувствителен к выбору основных параметров 17 Com. Напомним, что аналогичный результат был получен нами в предыдущей работе [15] для холодной Sr-Cr-Eu звезды β CrB.

В табл.4 представлен количественный анализ содержаний Cr, полученных нами в [15] для β CrB, HR 7575, γ Equ и 10 Aql. Такое численное представление результатов исследования линий Cr II несколько отличается от качественного графического представления, использованного ранее в [15] и на рис.1a-c данной работы. Это, однако, не изменяет интерпретации полученных данных: для β CrB, HR 7575 и γ Equ коэффициент a положителен и отличается от нуля больше, чем на $3\sigma_a$. По этой причине для этих трех звезд можно с достаточной уверенностью говорить об уменьшении содержания Cr в поверхностных слоях звездной атмосферы по сравнению с нижележащими слоями. Отметим, что при вычислении величин a и $\langle \log(Cr/N) \rangle$ для β CrB, HR 7575 и γ Equ не использовались содержания Cr, найденные по линии Cr II $\lambda 4884.61 \text{ \AA}$, которая в спектрах этих звезд блендирована неизвестной спектральной линией и по этой причине дает сильно завышенное содержание Cr. Для 10 Aql $a > 0$, как и для других холодных Sr-Cr-Eu звезд, однако $a \approx \sigma_a$, что не позволяет сделать однозначных выводов о стратификации Cr. Как уже отмечалось выше, последнее справедливо и для пятнистых Ar-звезд α^2 CVn и 17 Com. Для них $a < 0$ и $|a| < 2\sigma_a$, причем картина значительно усложнена неоднородным поверхностным распределением Cr.

Остановимся на некоторых общих закономерностях вертикального распределения Cr в атмосферах Ar-звезд. По данным, собранным в табл.4, были построены зависимости параметра вертикальной стратификации a от $T_{\text{эфф}}$ (рис.2a) и от $\langle \log(Cr/N) \rangle$ (рис.2b). На рис.2a наблюдается заметное уменьшение величины вертикального градиента содержания Cr при увеличении $T_{\text{эфф}}$. У исследованных звезд происходит видимое изменение a от значительной вертикальной стратификации в атмосферах холодных Ar-звезд с узкими спектральными линиями до практического отсутствия стратификации в атмосферах горячих Sr-Cr-Eu звезд. Возможно, величина a меняет знак при $T_{\text{эфф}} \approx 9000\text{K}$. Предложенной зависимости a от $T_{\text{эфф}}$ не

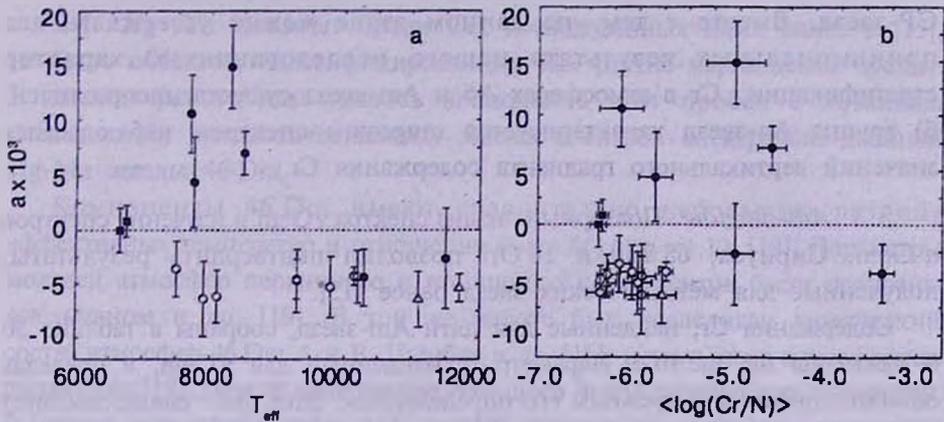


Рис.2. а) Зависимость параметра стратификации a от эффективной температуры звезд. Темными кружками обозначены Ар-звезды, светлыми - Ап-звезды, светлыми треугольниками - Hg-Mn компоненты 46 Дга. Нормальным звездам соответствуют квадраты. Для α^2 CVn показаны данные, полученные для фазы вращения 0.27, близкой к фазе максимума интенсивности линий Cr II. б) Зависимость параметра стратификации a от содержания Cr. Обозначения те же, что и на рис.2а.

противоречат результаты исследований [14] и [4,11]. В первой работе для пятнистой Ар-звезды ϵ UMa ($T_{\text{эфф}} = 9500\text{K}$) была получена такая же зависимость $\log(\text{Cr}/\text{N})$ от $\Delta\lambda$, как и для Сириуса. Таким образом, ϵ UMa оказывается близкой по характеру стратификации Cr к 17 Com. В [4,11] было показано, что содержание многих элементов, в том числе и Cr, резко увеличивается с глубиной в атмосфере 53 Cam. Эффективная температура этой звезды ($T_{\text{эфф}} = 8500\text{K}$) позволяет предположить, что на рис.2а 53 Cam займет место, близкое к положению β CrB и HR 7575.

Изучение зависимости a от $\langle \log(\text{Cr}/\text{N}) \rangle$ (рис.2б) не позволяет выявить столь же определенной зависимости, как для хода a с $T_{\text{эфф}}$. В отличие от однородной группы Ап-звезд, Ар-звезды занимают на рис.2б широкую область от содержания Cr, близкого к солнечному, до избытка Cr на 2-3 порядка и от значительного возрастания содержания Cr с глубиной до его небольшого уменьшения. По-видимому, величина стратификации Cr не зависит от его среднего содержания. Действительно, при одном и том же содержании Cr встречаются Ар-звезды как с положительным (β CrB), так и с отрицательным (α^2 CVn) значением параметра a .

Следует отметить, что группа Ар-звезд с отрицательным значениям a целиком состоит из горячих пятнистых Sr-Cr-Eu звезд, а увеличение содержания Cr с глубиной наблюдается у более холодных звезд без заметной переменности интенсивностей спектральных линий. Число исследованных нами Ар-звезд пока слишком мало, чтобы связать эту закономерность с физическим механизмом возникновения вертикальной стратификации.

Итак, рис.2а,б позволяет предположить существование некоторых закономерностей стратификации Cr в атмосферах Ар-звезд. Для их подтверждения необходимо дополнительное исследование спектров многих

СР-звезд. Вместе с тем, на данном этапе можно утверждать два принципиальных результата нашего исследования: а) характер стратификации Cr в атмосферах Ар и Ам-звезд существенно различен, б) группа Ар-звезд характеризуется широким спектром наблюдаемых значений вертикального градиента содержания Cr.

3.3. *Ам-звезды.* Повторный анализ спектра γ Gem и изучение спектров α Gem, Сириуса, 68 Тау и 16 ОгI позволил подтвердить результаты, полученные для металлических звезд ранее [15].

Содержания Cr, найденные для пяти Ам-звезд, собраны в таблице 3б и показаны на рис.1б,с. Параметр a , найденный для γ Gem, в пределах ошибок совпадает с прежним его определением. Этот факт свидетельствует об устойчивости применяемой методики анализа линий Cr II к небольшому изменению наблюдательного материала.

Что касается характера стратификации Cr, то для всех металлических звезд $a < 0$ и можно подозревать некоторое увеличение $\log(\text{Cr}/N)$ в верхних слоях атмосфер этих звезд. По сравнению с результатами предыдущей работы, этот вывод кажется нам теперь более надежным по следующим причинам. Во-первых, практически одинаковые значения a получены для всех восьми Ам, включенных в программу наблюдений. Во-вторых, детальное исследование линий Cr II в спектрах нормальных звезд (Проциона и ι Peg) не показало какой-либо зависимости $\log(\text{Cr}/N)$ от $\Delta\lambda(\alpha < \sigma_\alpha)$. Наконец, вследствие небольшого разброса отдельных содержаний относительно аппроксимирующей прямой, параметр a для Сириуса заметно превышает $3\sigma_\alpha$. По-видимому, эта согласованность $\log(\text{Cr}/N)$, полученных по разным линиям Cr II, достигнута благодаря высокому качеству наших наблюдений Сириуса и сравнительно малым неопределенностям параметров модели атмосферы этой звезды. На рис.1с наши данные сравниваются с $\log(\text{Cr}/N)$, полученными для Сириуса Зверко и Жижновским [13]. Несмотря на небольшие различия отдельных содержаний, величины a и $\langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$ совпадают в пределах ошибок их определения (см. табл.4). Хорошее согласие двух независимых измерений a и $\langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$ также свидетельствует в пользу корректности методики обработки и анализа спектров звезд и реальности полученных результатов.

Анализ зависимости a от $T_{\text{эфф}}$ (рис.2а) позволяет предположить, что на всем интервале эффективных температур исследованных Ам-звезд ($T_{\text{эфф}} = 7500-10200\text{K}$) характер изменения $\log(\text{Cr}/N)$ с $\Delta\lambda$ остается постоянным. На рис.2б, иллюстрирующем зависимость a от $\langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$, металлические звезды, в отличие от Ар-звезд, образуют очень тесную группу со средним значением параметра стратификации $a_{\text{Am}} = (-4.9 \pm 1.0) \cdot 10^3$ и содержанием Cr $\langle \log(\text{Cr}/N) \rangle_{\text{Am}} = -6.07 \pm 0.21$. Среднее содержание Cr у группы исследованных нами Ам-звезд незначительно отличается от солнечного содержания этого элемента $\log(\text{Cr}/N)_\odot = -6.30$ [41].

3.4. *Hg-Mn звезды.* Среди CP, исследованных нами ранее в [15], не было объектов, классифицированных как ртутно-марганцевые звезды. В данной работе нам удалось восполнить этот пробел с помощью исследования высококачественных эшелле-спектров спектрально-двойной Hg-Mn звезды 46 Drg.

Компоненты 46 Drg имеют сравнительно небольшую разницу эффективных температур и отношение масс $M_A/M_B = 1.12$ [19]. Параметры моделей атмосфер первичного и вторичного компонентов были получены Адельманом и др. [19]. В той же работе был исследован химический состав атмосфер 46 Drg A и B. Цымбал и др. [16], используя атмосферные параметры [19], нашли содержание большого числа химических элементов. В целом результаты работ [16] и [19] хорошо согласуются: отличия в найденных содержаниях редко превышают 0.2-0.3 dex.

В расчетах синтетических спектров компонентов 46 Drg мы использовали химический состав, найденный в [16]; для элементов группы железа (Ti, Fe и Mn), которые в [16] не изучались, использовались данные [19]. Построение суммарного синтетического спектра 46 Drg проводилось по методике, описанной выше для 1 Peg. Отношение радиусов компонентов 46 Drg принималось равным $R_A/R_B = 1.23$ [19], синтетические спектры компонентов сдвигались друг относительно друга на величину, соответствующую разнице лучевых скоростей $\Delta V_r = 60$ и 25 км/с (соответственно для фаз 0.067 и 0.169). Содержания хрома, найденные по линиям 30-го мультиплета для обоих компонентов приведены в табл.3а, зависимость $\log(\text{Cr}/N)$ от $\Delta\lambda$ показана на рис.1d. Среднее значение содержания Cr и параметр вертикальной стратификации a указаны для 46 Drg A и B в табл.4. Какого-либо изменения профилей линий Cr II с фазой орбитального движения мы не обнаружили. Содержания Cr, представленные в табл.3а, одинаково хорошо описывают спектр 46 Drg как для фазы 0.067, так и для фазы 0.169. Интересно отметить, что $\langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$ у компонентов 46 Drg отличается примерно на 0.5 dex. Этот результат неплохо согласуется с данными [19], согласно которым 46 Drg A имеет на 0.4 dex меньшее содержание Cr, чем вторичный компонент.

В целом зависимость $\log(\text{Cr}/N)$ от $\Delta\lambda$ для исследованных Hg-Mn звезд совпадает с результатами, полученными для металлических звезд. На рис.2а (зависимость a от $T_{\text{эф}}$) Hg-Mn звезды продолжают последовательность Ap-звезд в сторону более высоких эффективных температур, а на рис.2б (зависимость a от $\langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$) точки, соответствующие 46 Drg A и B, лежат в области, занятой Ap-звездами. Все это подтверждает неоднократно высказывавшееся предположение о наличии генетической связи между ртутно-марганцевыми и металлическими звездами.

4. *Основные результаты.* В заключение обобщим основные результаты нашего исследования вертикальной стратификации Cr в атмосферах CP-звезд.

1. Методом спектрального синтеза исследованы восемь линий 30-го мультиплета Cr II в спектрах 18 звезд различных спектральных классов. Найдено содержание хрома в атмосферах двух нормальных, двух Hg-Mn, восьми Am и шести магнитных Ap-звезд.

2. С помощью анализа линий Cr II, находящихся на разном расстоянии от центра водородной линии H_β , проведена диагностика вертикальной стратификации этого элемента в атмосферах Ap, Am и Hg-Mn звезд. Для холодных Ap-звезд β CrB, HR 7575, γ Equ и 10 Aql выявлено увеличение содержания Cr с глубиной. Для всех Am-звезд и для обоих Hg-Mn компонентов 46 Dra предположено некоторое увеличение содержания Cr в верхних слоях атмосфер. В атмосферах горячих пятнистых Ap-звезд 17 Com и α^2 CVn вертикальное распределение хрома, по-видимому, однородно.

3. Исследованы зависимости параметра вертикальной стратификации a от эффективной температуры звезды и среднего содержания Cr. Найдено существенное различие обеих зависимостей для магнитных (Sr-Cr-Eu) и немагнитных (Am и Hg-Mn) CP-звезд: вертикальный градиент содержания Cr в атмосферах Ap-звезд, по-видимому, уменьшается с ростом $T_{\text{эфф}}$, а для Am-звезд не зависит от $T_{\text{эфф}}$. Для всех типов звезд какой-либо корреляции a с $\langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$ не найдено.

4. Характер возможной стратификации Cr в атмосферах Hg-Mn звезд 46 Dra A и B совпадает с результатами, полученными для металлических звезд. Это еще раз подтверждает существование тесной связи между этими двумя классами химически аномальных объектов.

1 Крымская астрофизическая обсерватория, Украина

2 Симферопольский государственный университет, Украина

INVESTIGATION OF STRATIFICATION OF VERTICAL DISTRIBUTION OF CHROMIUM IN THE ATMOSPHERES OF CP STARS. I. DIAGNOSTIC ANALYSIS

I.S.SAVANOV, O.P.KOCHUKHOV, V.V.TSYMBAL

High-dispersion CCD spectrograms obtained with the coude spectrograph of the 2.6-m Shajn telescope at Crimean Observatory were used in our investigation of Cr II lines located in the wings of H_β Hydrogen line. With the help of spectrum synthesis technique we diagnosed vertical stratification of chromium in the atmospheres of two normal and eight chemically peculiar stars. For the cool Ap stars β CrB, HR 7575, γ Equ and 10 Aql the increase of Cr abundance with

depth was found. For all investigated Am stars as well as for Hg-Mn components of 46 Dra we suspect the similar small increase of Cr abundance in the upper atmosphere. For the hot spotted Ap stars 17 Com and α^2 CVn we do not find evidence for the inhomogeneity distribution of Chromium.

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.Michaud*, *Astrophys. J.*, **160**, 641, 1970.
2. *G.G.Michaud*, *C.R.Proffitt*, in "Peculiar Versus Normal Phenomena in A-Type and Related Stars". Eds M.M.Dworetzky, F.Castelli, R.Faraggina, ASP Conf. Ser., **44**, 439, 1993.
3. *K.C.Smith*, *Astron. Astrophys.*, **207**, 237, 1995.
4. *J.Babel*, *Astron. Astrophys.*, **258**, 449, 1992.
5. *J.Babel*, *Astron. Astrophys.*, **283**, 189, 1994.
6. *K.Hunger*, in "Upper Main Sequence Stars with Anomalous Abundances". Eds C.R.Cowley, M.M.Dworetzky, C.Megessier, IAU Coloq. No90, D., Reidel, 257, 1986.
7. *D.A.Bohlender*, *Astrophys. J.*, **346**, 459, 1989.
8. *В.Л.Хохлова*, Письма в Астрон. ж., **4**, 228, 1978.
9. *И.И.Романюк*, *Г.Р.Топилская*, *О.А.Михнов*, in "Stellar Magnetism". Eds Yu.V.Glagolevsky, I.I.Romanyuk, St.-Peterburg, Nauka, **76**, 1992.
10. *T.Lanz*, *M.-C.Artru*, *P.Didelon*, *G.Mathys*, *Astron. Astrophys.*, **272**, 465, 1993.
11. *J.Babel*, *T.Lanz*, *Astron. Astrophys.*, **263**, 232, 1992.
12. *В.Л.Хохлова*, *Г.П.Топильская*, Письма в Астрон. ж., **18**, 150, 1992.
13. *J.Zverko*, *J.Ziznovskij*, in "Chemically Peculiar and Magnetic Stars". Eds J.Zverko, J.Ziznovskij, *Astron. Inst.*, Slovak Academy of Sci., Tatranska Lomnica, 110, 1994.
14. *J.Zverko*, *J.Ziznovskij*, Contribution of the Observ. Skalnaté Pleso, **25**, 39, 1995.
15. *И.С.Саванов*, *О.П.Кочухов*, Письма в Астрон. ж., **24**, 601, 1998.
16. *В.В.Цымбал*, *О.П.Кочухов*, *В.Л.Хохлова*, *Д.Л.Ламберт*, Письма в Астрон. ж., **22**, 116, 1998.
17. *G.Farnsworth*, *Astrophys. J.*, **76**, 313, 1932.
18. *G.W.Preston*, *K.Stepien*, *S.C.Wolff*, *Astrophys. J.*, **156**, 653, 1969.
19. *S.J.Adelman*, *T.A.Ryabchikova*, *E.S.Davydova*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **297**, 1, 1998.
20. *F.C.Fekel*, *J.Tomkin*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **95**, 1000, 1983.
21. *И.С.Саванов*, *Т.А.Рябчикова*, *Е.С.Давыдова*, Письма в Астрон. ж., **22**, 910, 1996.
22. *M.A.Smith*, *Astrophys. J.*, **189**, 101, 1971.
23. *И.С.Саванов*, Изв. Крымск. астрофиз. обсерв., **76**, 37, 1987.
24. *Л.С.Любимков*, *И.С.Саванов*, Изв. Крымск. астрофиз. обсерв., **67**,

- 3, 1983.
25. *И.С.Саванов, А.М.Халилов*, Изв. Крымск. астрофиз. обсерв., **72**, 106, 1985.
 26. *Л.С.Любимков, И.С.Саванов*, Изв. Крымск. астрофиз. обсерв., **68**, 121, 1983.
 27. *Л.С.Любимков, Н.С.Полосухина, С.И.Ростопчин*, *Астрофизика*, **34**, 149, 1991.
 28. *K.Kato, K.Sadakane*, *Astron. Astrophys.*, **113**, 135, 1982.
 29. *V.V.Tsybal*, in "Model Atmospheres and Stellar Spectra". Eds. S.J.Adelman, F.Kupka, W.W.Weiss, ASP Conf. Ser., **108**, 198, 1996.
 30. *R.I.Kurucz*, Programs and Line Data Published on CD-ROMs, SAO, Cambridge, 1993.
 31. *R.E.M.Griffin, R.F.Griffin*, A photometric Atlas of the Spectrum of Procyon, Cambridge, 1979.
 32. *G.Scholz, H.Lehmann, P.Harmanec, E.Gerth, G.Hildebrant*, *Astron. Astrophys.*, **320**, 791, 1997.
 33. *V.V.Leushin, G.P.Topilskaya, F.A.Musaev*, in "Stellar Magnetic Fields". Eds. Yu.V.Glagolevsky, I.I.Romanyuk, Nauka, Moscow, 143, 1997.
 34. *E.H.Pinnington, Q.Ji, B.Guo, R.W.Berends, J.van Hunen*, *Can. J. Phys.*, **71**, 470, 1993.
 35. *T.A.Sigut, J.D.Landstreet*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **247**, 611, 1990.
 36. *N.Piskunov, F.Kupka, T.A.Ryabchikova, W.W.Weiss, C.S.Jeffery*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **112**, 525, 1995.
 37. *L.S.Lyubimkov, N.S.Polosukhina, S.I.Rostopchin*, in "Stellar Magnetism". Eds. Yu.V.Glagolevsky, I.I.Romanyuk, St.-Peterburg, Nauka, **138**, 1992.
 38. *N.S.Polosukhina, L.S.Lyubimkov, S.I.Rostopchin*, in "Stellar Magnetism", Eds. Yu.V.Glagolevsky, I.I.Romanyuk, St.-Peterburg, Nauka, 141, 1992.
 39. *Л.С.Любимков*, Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. **84**, 3, 1992.
 40. *J.B.Rice, W.H.Wehlau*, *Astron. Astrophys.*, **291**, 285, 1994.