

УДК: 524.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХРОМА В АТМОСФЕРАХ CP-ЗВЕЗД. II. МОДЕЛИРОВАНИЕ

И.С.САВАНОВ<sup>1</sup>, О.П.КОЧУХОВ<sup>1,2</sup>, В.В.ЦЫМБАЛ<sup>2</sup>

Поступила 30 августа 2000

Принята к печати 15 января 2001

С помощью детального моделирования профилей линий Cr II подобраны вертикальные распределения хрома в атмосферах нескольких Ar- и Am-звезд. В случае Ar-звезд полученные вертикальные распределения согласуются с результатами исследований Бабеля линий Cr в спектре Ar-звезды 53 Cam. Показано, что наблюдательные данные не могут быть интерпретированы в рамках гипотезы о переменности с глубиной микротурбулентной скорости.

**1. Введение.** В данной работе мы продолжаем изучение вертикальной стратификации химических элементов в атмосферах CP-звезд. На основании новых наблюдений ранее [1] нами была проведена диагностика вертикального распределения Cr в атмосферах четырех Am, двух Hg-Mn и двух магнитных Ar-звезд. В настоящей статье мы представляем результаты количественного расчета вертикального распределения Cr в атмосферах некоторых Ar- и Am-звезд и рассматриваем возможность интерпретации нашего наблюдательного материала в рамках альтернативной гипотезы о переменности с глубиной микротурбулентной скорости  $\xi_r$ .

**2. Моделирование вертикального распределения хрома.** Следующим естественным шагом после получения зависимостей содержания Cr от  $\Delta\lambda$  является определение вертикального распределения Cr в реальной шкале геометрических или оптических глубин звездной атмосферы. Такой расчет необходим для сравнения наблюдательных данных с предсказаниями теории. Исходная зависимость  $\log(Cr/N)$  от  $\Delta\lambda$  может быть истолкована как доказательство самого факта наличия вертикальной стратификации Cr, однако не может быть использована для количественного анализа стратификации. Романюк и Топильская [2], анализируя эквивалентные ширины линий Cr II, полученные для  $\alpha^2 CVn$  в работах [3] и [4], рассчитали оптические глубины формирования  $W_\lambda$  линий 30-го мультиплета Cr, получив таким образом зависимость  $\log(Cr/N)$  от оптической глубины. В нашем исследовании, основанном на расчете синтетических спектров, мы отказались от применения такой методики по следующим причинам: во-первых, существуют разногласия относительно самого определения понятия глубины

формирования монохроматического излучения (см., например, обсуждение этого вопроса в работах [5] и [6]), во-вторых, использование для анализа линий Cr метода спектрального синтеза предполагает анализ формирования каждой точки спектра и не допускает естественного использования понятия глубины формирования спектральной линии в целом. Кроме того, так как спектральная линия в общем случае формируется на достаточно большом интервале оптических глубин, то высказывались сомнения [7] относительно принципиальной возможности сопоставления всей спектральной линии некоторой определенной глубины формирования.

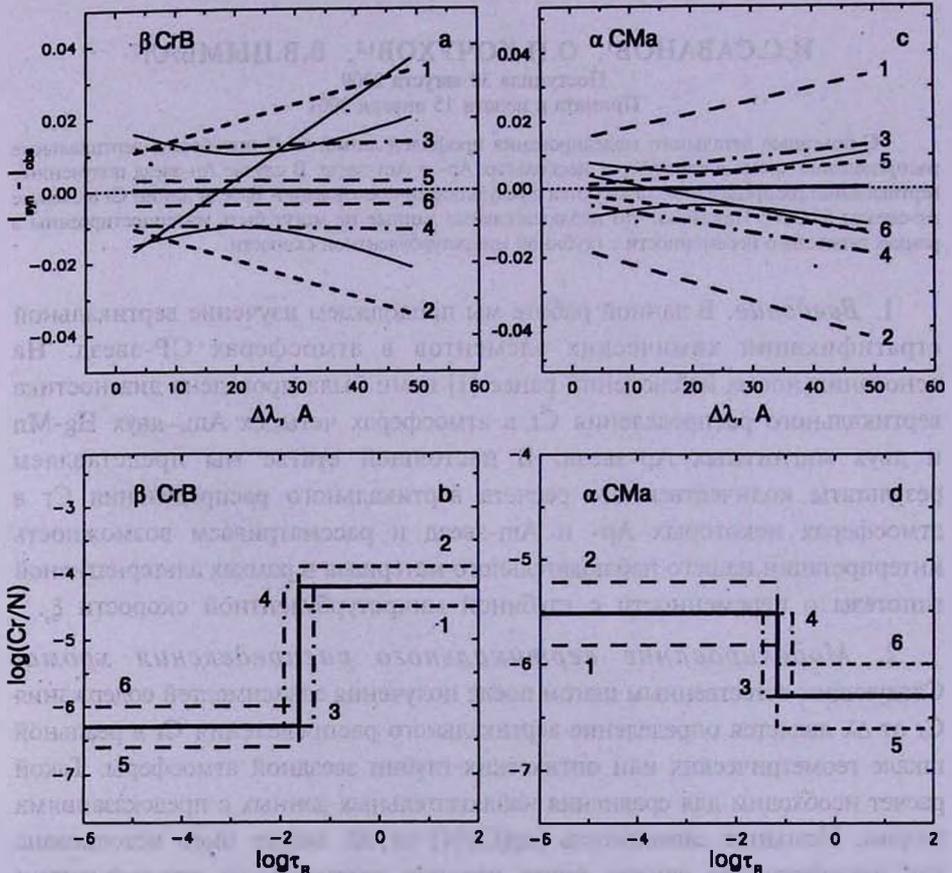


Рис.1. а) Линейная аппроксимация зависимостей  $I_{\text{syn}} - I_{\text{obs}}$  от  $\Delta\lambda$  для различных вертикальных распределений Cr в атмосфере  $\beta \text{ CrB}$ . Сплошная тонкая линия соответствует однородному распределению с  $\log(\text{Cr}/N) = \langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$  (см. табл.1), жирные линии - ступенчатым изменениям  $\log(\text{Cr}/N)$ : сплошная линия - оптимальное распределение, штриховые, штрих-пунктирные и короткие штриховые линии - вариации на  $\pm 0.3 \text{ dex}$  оптимальных значений  $\log(\text{Cr}/N)$ ,  $\log\tau_r$  и  $\log(\text{Cr}/N)$ . Сплошными тонкими кривыми показан 95%-ый доверительный интервал линейной аппроксимации зависимости  $I_{\text{syn}} - I_{\text{obs}}$  от  $\Delta\lambda$  для оптимального распределения Cr. б) Ступенчатые распределения Cr в атмосфере  $\beta \text{ CrB}$ , использованные для построения зависимостей  $I_{\text{syn}} - I_{\text{obs}}$  от  $\Delta\lambda$ , показанных на рис.1а. Все обозначения и нумерации совпадают с принятыми на рис.1а. с) То же, что и на рис.1а, но для различных вертикальных распределений Cr в атмосфере Сириуса. д) Ступенчатые распределения Cr в атмосфере Сириуса, использованные для построения зависимостей  $I_{\text{syn}} - I_{\text{obs}}$  от  $\Delta\lambda$ , показанных на рис.1с. Все обозначения и нумерации совпадают с принятыми на рис.1а.

Учитывая вышеизложенные соображения, мы решили определять вертикальное распределение Cr в атмосферах CP звезд подбором такого распределения Cr, которое лучше всего воспроизводит наблюдаемые интенсивности линий этого химического элемента. Сравнение теоретических распределений с наблюдениями производилось графически, путем построения для каждого варианта вертикальной стратификации Cr зависимости разницы теоретических и наблюдаемых центральных интенсивностей  $I_{\text{гн}} - I_{\text{об}}$  от  $\Delta\lambda$  (см. рис.1а и с). При этом наилучшим считалось такое вертикальное распределение Cr, которое минимизировало а) наклон прямой, аппроксимирующей зависимость  $I_{\text{гн}} - I_{\text{об}}$  от  $\Delta\lambda$  и б) отклонение аппроксимирующей прямой от прямой  $I_{\text{гн}} - I_{\text{об}} = 0$ . Отметим, что использование для сравнения с наблюдениями только центральных интенсивностей линий Cr II не означает потери какой-либо информации, заключенной в профилях линий. Действительно, все исследованные линии хрома достаточно слабы в спектрах Ap и Am-звезд, поэтому вряд ли можно ожидать такого влияния стратификации на форму их профилей, которое выявлено для резонансной линии K Ca II [8,9], резонансной ультрафиолетовой линии Ga III  $\lambda$  1495 Å [5] или сильных оптических линий He I [10].

Важно отметить, что теоретические центральные интенсивности  $I_{\text{гн}}$  линий Cr II для каждого вертикального распределения этого химического элемента определялись нами с помощью расчета синтетических спектров в области линий Cr. Использование синтетических спектров позволило адекватно учесть эффекты блендирования линий Cr и уширения спектральных линий за счет вращения звезды и инструментального профиля. Синтетические спектры рассчитывались по программе В.В.Цымбала SYNTHMN, которая позволяет для любого химического элемента задавать изменяющееся с глубиной содержание и/или изменяющуюся с глубиной микротурбулентную скорость. Свертка синтетических спектров с профилем вращения и инструментальным профилем осуществлялась с помощью системы STARSP [11].

В качестве первого приближения мы использовали ступенчатое распределение Cr, определяемое тремя параметрами: содержанием Cr выше скачка ( $\log(\text{Cr}/N)_1$ ), ниже скачка ( $\log(\text{Cr}/N)_2$ ) и оптической (росселандовой) глубиной самого скачка ( $\log\tau_1$ ). Для Ap-звезд содержание Cr в слоях атмосферы выше скачка было выбрано солнечным  $\log(\text{Cr}/N)_1 = \log(\text{Cr}/N)_\odot = -6.30$  и варьировались положение скачка и его величина ( $\Delta\log(\text{Cr}/N) = \log(\text{Cr}/N)_2 - \log(\text{Cr}/N)_\odot$ ), для Am-звезд мы, наоборот, фиксировали солнечное содержание Cr ниже скачка  $\log(\text{Cr}/N)_2 = \log(\text{Cr}/N)_\odot$  и варьировали положение скачка и содержание Cr в верхних слоях атмосфер звезд. На данном этапе исследования микротурбулентная скорость считалась постоянной на всей протяженности звездной атмосферы и равной величине  $\xi_r$ , найденной в предыдущих исследованиях химического состава звезд (см., например, табл.2 в [1])

и табл.2 в [12]).

Во всех предыдущих исследованиях вертикальной стратификации химических элементов авторы использовали для анализа наблюдений подобные ступенчатые распределения (см., например, [5,9,13]). На настоящий момент качество наблюдательного материала, по-видимому, не позволяет выявить более сложные вертикальные распределения химических элементов. Кроме того, как показал Бабель [8], для Ар-звезды 53 Cam ступенчатые распределения очень хорошо описывают теоретические изменения содержания многих элементов с глубиной. Таким образом, можно надеяться, что ступенчатое распределение Cr является хорошим приближением реальной стратификации, по крайней мере, для случая Ар-звезд.

Далее в нашей работе приводятся конкретные результаты подбора оптимальных вертикальных распределений Cr в атмосферах Ар и Am-звезд.

2.1. *Ар-звезды.* Вертикальные распределения Cr подбирались для  $\beta$  CrB, HR 7575 и  $\gamma$  Equ - Ар-звезд, показавших самую сильную зависимость  $\log(\text{Cr}/N)$  от  $\Delta\lambda$ . В табл.1 указаны параметры  $\log(\text{Cr}/N)_1$ ,  $\log(\text{Cr}/N)_2$  и  $\log\tau_c$  оптимальных ступенчатых распределений Cr, полученных для трех Ар-звезд. Там же приводится оценка вероятных ошибок определения этих параметров. Рис.1а, б иллюстрирует процесс подбора вертикального распределения Cr для  $\beta$  CrB. На рис.1а показана линейная аппроксимация зависимости  $I_{\text{кр}} - I_{\text{ли}}$  от

Таблица 1

### ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Cr, ПОЛУЧЕННЫЕ ДЛЯ Ар И Am-ЗВЕЗД

Звезда	$\log(\text{Cr}/N)_1$	$\log\tau_c$	$\log(\text{Cr}/N)_2$
Ар-звезды			
HR 7575	$-6.30 \pm \begin{matrix} 0.70 \\ \infty \end{matrix}$	$-2.62 \pm \begin{matrix} 0.55 \\ 0.30 \end{matrix}$	$-4.15 \pm \begin{matrix} 0.16 \\ 0.22 \end{matrix}$
$\beta$ CrB	$-6.30 \pm \begin{matrix} 0.60 \\ \infty \end{matrix}$	$-1.68 \pm \begin{matrix} 0.20 \\ 0.30 \end{matrix}$	$-4.19 \pm \begin{matrix} 0.15 \\ 0.15 \end{matrix}$
$\gamma$ Equ	$-6.30 \pm \begin{matrix} 0.23 \\ 0.30 \end{matrix}$	$-0.31 \pm \begin{matrix} 0.18 \\ 0.15 \end{matrix}$	$-4.72 \pm \begin{matrix} 0.45 \\ 0.45 \end{matrix}$
Am-звезды			
$\alpha$ CMa	$-5.52 \pm \begin{matrix} 0.05 \\ 0.05 \end{matrix}$	$-1.18 \pm \begin{matrix} 0.18 \\ 0.20 \end{matrix}$	$-6.30 \pm \begin{matrix} 0.23 \\ 0.40 \end{matrix}$
$\sigma$ Peg	$-5.21 \pm \begin{matrix} 0.25 \\ 0.39 \end{matrix}$	$-2.68 \pm \begin{matrix} 0.32 \\ 0.61 \end{matrix}$	$-6.30 \pm \begin{matrix} 0.20 \\ 0.38 \end{matrix}$
$\gamma$ Gem	$-6.02 \pm \begin{matrix} 0.45 \\ 0.07 \end{matrix}$	$-2.31 \pm \begin{matrix} 0.57 \\ 1.54 \end{matrix}$	$-6.30 \pm \begin{matrix} 0.06 \\ 0.06 \end{matrix}$
32 Aqr	$-5.87 \pm \begin{matrix} 0.22 \\ 0.31 \end{matrix}$	$-2.06 \pm \begin{matrix} 0.63 \\ 1.31 \end{matrix}$	$-6.30 \pm \begin{matrix} 0.13 \\ 0.14 \end{matrix}$

Примечание. Символ  $\infty$  означает, что, согласно принятой нами процедуре оценки ошибок параметров вертикального распределения Cr, этот химический элемент может полностью отсутствовать в верхних слоях атмосфер HR 7575 и  $\beta$  CrB.

$\Delta\lambda$  для различных вариантов вертикальной стратификации Cr, соответствующие вертикальные распределения этого химического элемента представлены на рис.1b. После определения оптимального варианта стратификации, мы фиксировали два параметра найденного ступенчатого распределения, а третий изменяли до тех пор, пока соответствующая линейная аппроксимация зависимости  $I_{\text{пр}} - I_{\text{об}}$  линий Cr II от  $\Delta\lambda$  оставалась в пределах 95%-го доверительного интервала линейной аппроксимации, соответствующей оптимальному вертикальному распределению. Максимально допустимые отклонения параметров  $\log(\text{Cr}/N)_1$ ,  $\log(\text{Cr}/N)_2$  и  $\log t_0$  от их оптимальных значений и указаны в табл.1 как возможные ошибки определения этих параметров.

Интересно отметить очень малую чувствительность интенсивностей линий Cr II к содержанию Cr в верхних слоях атмосфер Ар-звезд. При этом,

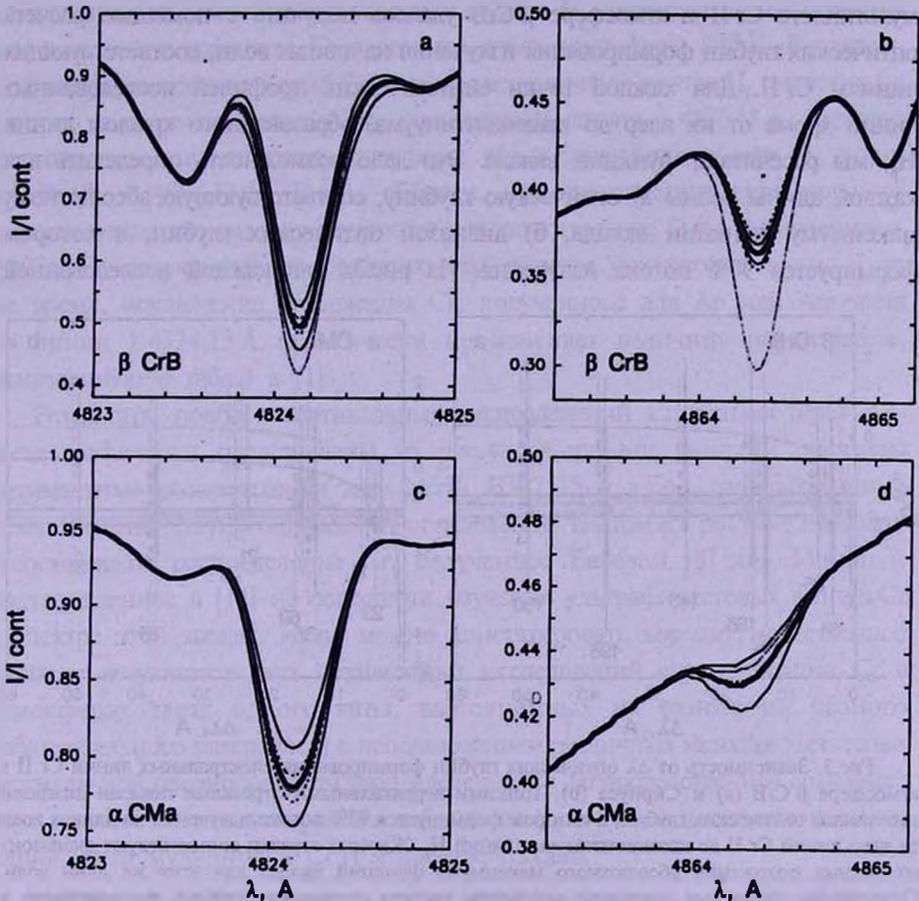


Рис.2a-d. Синтетические профили спектральных линий Cr II  $\lambda$  4824.13 Å (a, c) и  $\lambda$  4864.33 Å (b, d), рассчитанные с различными вертикальными распределениями Cr. Пунктирной линией обозначен спектр, соответствующий однородному распределению Cr с  $\log(\text{Cr}/N) = \langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$  (см. табл.1). Сплошная жирная линия - спектр при оптимальном вертикальном распределении Cr, сплошная тонкая линия - спектр при вариации на  $\pm 0.3$  dex величины скачка содержания Cr, штриховая линия - спектр при вариации на  $\pm 0.3$  dex оптической глубины скачка. Соответствующие ступенчатые распределения Cr показаны на рис.1b для  $\beta$  CrV и на рис.1d для Сириуса.

однако, максимально возможное содержание Cr выше скачка  $\log(Cr/N)_1^{\max}$ , несмотря на значительную ошибку определения  $\log(Cr/N)$ , все же на порядок меньше минимально возможного содержания Cr  $\log(Cr/N)_1^{\min}$  в нижних слоях атмосфер Ar-звезд.

Рис.2а, б иллюстрирует чувствительность профилей линий Cr II  $\lambda 4824.13$  и  $4864.33 \text{ \AA}$  к вариациям вертикального распределения Cr в атмосфере  $\beta$  CrV. Расчеты показывают, что линия  $\lambda 4864.33 \text{ \AA}$  чувствительна прежде всего к положению скачка содержания Cr, тогда как линия  $\lambda 4824.13 \text{ \AA}$  - к его величине. Интенсивность обеих спектральных линий при наличии стратификации Cr меньше, чем в предположении однородного распределения Cr с  $\log(Cr/N) = \langle \log(Cr/N) \rangle$ .

Дополнительную информацию об условиях формирования линий 30-го мультиплета Cr II в атмосфере  $\beta$  CrV удалось получить с помощью расчета оптических глубин формирования излучения на длинах волн, соответствующих линиям Cr II. Для каждой точки синтетических профилей исследованных линий хрома от их ядер до квазиконтинуума, образованного крылом линии  $H_\beta$ , мы рассчитали функции вклада. Это дало возможность определить для каждой длины волны а) оптическую глубину, соответствующую абсолютному максимуму функции вклада, б) диапазон оптических глубин, в котором формируется 90% потока излучения. На рис.3а для каждой исследованной

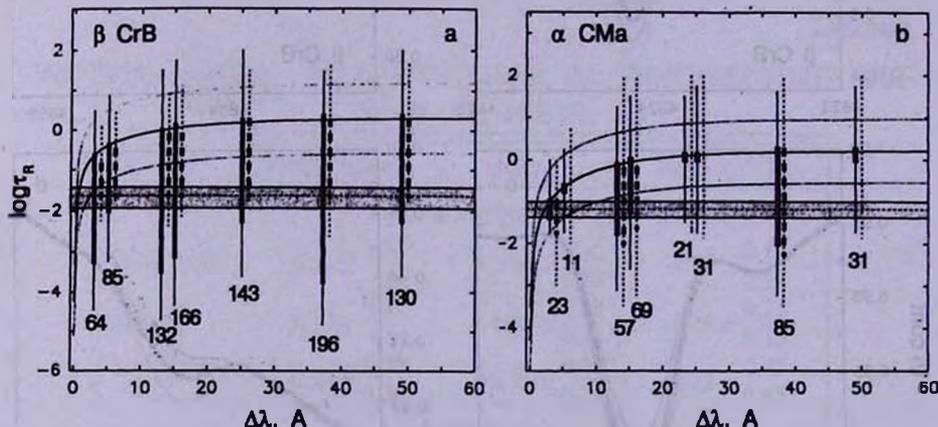


Рис.3. Зависимость от  $\Delta\lambda$  оптических глубин формирования спектральных линий Cr II в атмосфере  $\beta$  CrV (а) и Сириуса (б). Тонкими вертикальными отрезками показан диапазон интервалов оптических глубин, в котором формируется 90% потока излучения на длинах волн от ядер линий Cr II до квазиконтинуума линий  $H_\beta$ . Жирные отрезки соответствуют диапазону изменения положения абсолютного максимума функций вклада для этих же длин волн. Сплошными отрезками показаны результаты расчета оптических глубин, выполненного в предположении однородности вертикального распределения Cr, штриховыми - с оптимальным ступенчатым распределением (для удобства представления сдвинуты на 1 A). Изменение с  $\Delta\lambda$  максимума функции вклада для собственно водородной линии  $H_\beta$  показано сплошной кривой, пунктирные кривые соответствуют границам интервала формирования 90% потока излучения в линии  $H_\beta$ . Также указаны наблюдаемые эквивалентные ширины исследованных линий Cr. Горизонтальной штриховой линией показана оптимальная оптическая глубина скачка содержания Cr, заштрихованная область соответствует ошибке ее определения.

линии Cr II вертикальными отрезками показаны интервалы, в которые попадают вышеуказанные характеристики функций вклада. При этом сплошными отрезками обозначены результаты расчетов с однородным распределением Cr, а штриховыми - с оптимальным вариантом скачкообразного распределения, найденного выше.

Анализ рис.3а позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, благодаря чрезвычайно высокому среднему содержанию Cr в атмосфере  $\beta$  CrB и значительной интенсивности линий Cr II (о ней можно судить по величине  $W_{\lambda}$ , также указанной на рис.3а) все рассмотренные линии Cr формируются на достаточно большом интервале оптических глубин. Это подтверждает неадекватность использования какой-либо средней глубины формирования всей линии в целом. Во-вторых, благодаря своей силе даже линии Cr II, находящиеся на значительном удалении от ядра  $H_{\gamma}$ , чувствительны к наличию относительного дефицита Cr в верхних слоях атмосферы  $\beta$  CrB. В-третьих, глубина формирования линий Cr II кроме расстояния до центра  $H_{\gamma}$  существенно зависит и от силы линии. Так, спектральная линия  $\lambda 4824.13 \text{ \AA}$  частично формируется в тех же слоях атмосферы, что и ближайшие к ядру  $H_{\gamma}$  линии  $\lambda 4856.19$  и  $4864.33 \text{ \AA}$ . Таким образом, при диагностике вертикального распределения химических элементов предпочтительнее было бы сравнивать  $\log(Cr/N)$ , полученные по спектральным линиям одинаковой силы. В то же время, исключение содержания Cr, полученного для Ar или Am-звезд по линии  $\lambda 4824.13 \text{ \AA}$  практически не изменяет величину параметра  $a$ , приведенную в табл.4 в [1].

Результаты подбора вертикальных распределений Cr в атмосферах Ar-звезд графически представлены на рис.4а. Жирными линиями показаны оптимальные распределения для  $\beta$  CrB, HR 7575 и  $\gamma$  Equ, заштрихованные области соответствуют ошибкам их определения. На том же рисунке показано теоретическое распределение Cr, полученное Бабелем [8] для 53 Cam и подтвержденное в [14] на основании изучения ультрафиолетовых линий Cr в спектре этой звезды. Итак, можно констатировать хорошее качественное согласие результатов двух независимых исследований стратификации Cr в атмосферах звезд одного типа, выполненных на основании разного наблюдательного материала и с использованием различных методик выявления вертикальной неоднородности распределения Cr. Непосредственное сравнение двух методик возможно провести в будущем с помощью детального анализа линий 30-го мультиплета Cr II в спектре 53 Cam.

2.2. Am-звезды. Для расчета вертикального распределения Cr были выбраны Am-звезды Сириус,  $\sigma$  Peg,  $\gamma$  Gem и 32 Aqr. Эффективная температура этих металлических звезд полностью охватывает интервал  $T_{\text{eff}}$  для Am-звезд, исследованных в данной работе и ранее в [12]. В табл.1 и на рис.4б, с представлены результаты подбора оптимальных распределений

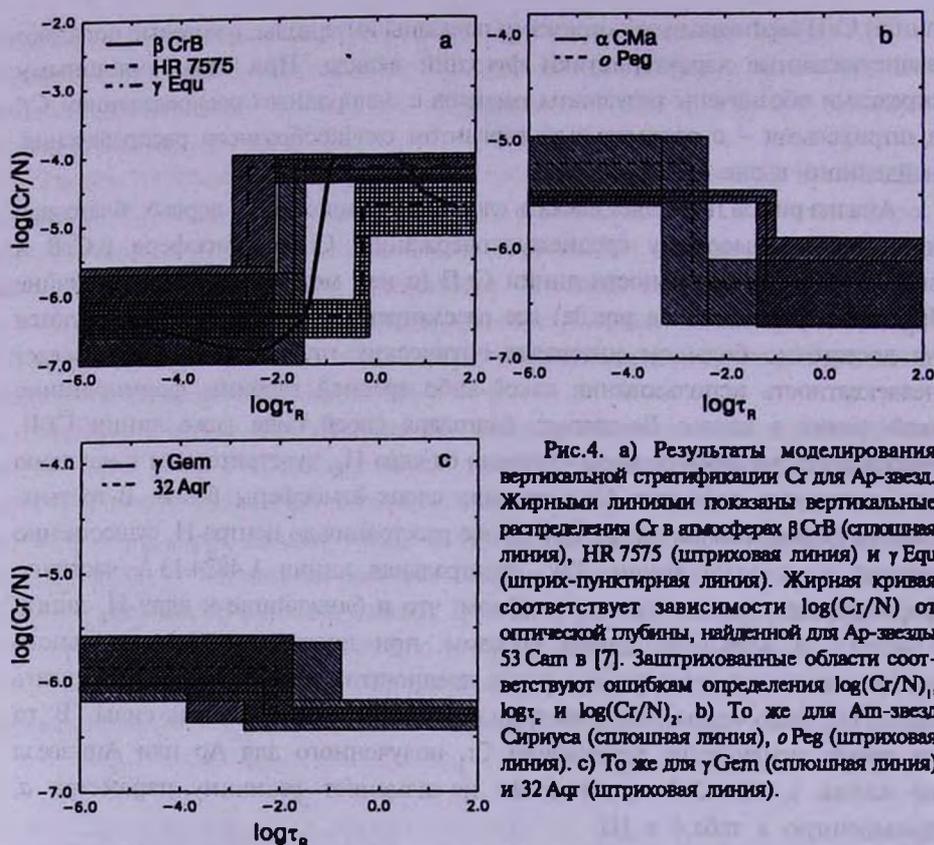


Рис.4. а) Результаты моделирования вертикальной стратификации Sr для Ap-звезд. Жирными линиями показаны вертикальные распределения Sr в атмосферах  $\beta$  CrB (сплошная линия), HR 7575 (штриховая линия) и  $\gamma$  Equ (штрих-пунктирная линия). Жирная кривая соответствует зависимости  $\log(\text{Sr}/N)$  от оптической глубины, найденной для Ap-звезды 53 Cam в [7]. Заштрихованные области соответствуют ошибкам определения  $\log(\text{Sr}/N)$ ,  $\log \tau_r$  и  $\log(\text{Cr}/N)$ . б) То же для Ap-звезд Сириуса (сплошная линия), o Peg (штриховая линия). в) То же для  $\gamma$  Gem (сплошная линия) и 32 Aqr (штриховая линия).

Sr. Ошибки параметров этих ступенчатых вертикальных распределений определялись так же, как и для Ap-звезд.

Подбор вертикального распределения Sr иллюстрируется на примере Сириуса (рис.1с, d). В отличие от Ap-звезд, зависимость  $I_{\text{syn}} - I_{\text{abs}}$  от  $\Delta\lambda$  достаточно чувствительна к изменению каждого из трех параметров ступенчатого распределения Sr. Следует отметить, что результаты, приведенные в табл.1 для более холодных Am-звезд  $\gamma$  Gem и 32 Aqr, не являются вполне однозначными: наш наблюдательный материал допускает одновременное увеличение скачка содержания Sr и сдвиг его в более высокие атмосферные слои. Эта неоднозначность, возможно, является следствием недостаточного качества нашего наблюдательного материала и/или наличием более плавного хода  $\log(\text{Sr}/N)$  с глубиной.

На рис.2с, d для Сириуса представлены профили линий Sr II  $\lambda 4824.13$  и  $4864.33 \text{ \AA}$ , рассчитанные с различными вариантами вертикального распределения Sr. Обе спектральные линии чувствительны к изменению величины скачка содержания Sr, а линия  $\lambda 4824.13 \text{ \AA}$  - также к вариации оптической глубины скачка.

Анализ глубин формирования линий Sr II выполнен для Сириуса на

рис.3б. В отличие от  $\beta$  CrV, у Сириуса наблюдается умеренный избыток содержания Cr, спектральные линии 30-го мультиплета не столь сильны и формируются в меньшем диапазоне оптических глубин. Однако так же, как и для  $\beta$  CrV, линия  $\lambda$  4824.13 Å хотя и находится на достаточном удалении от ядра  $H_p$ , но при этом частично формируется достаточно высоко в атмосфере  $\alpha$  CMa.

3. *Зависимость микротурбулентной скорости от оптической глубины.* При исследовании химического состава атмосфер ряда сверхгигантов классов A, F и G было показано, что микротурбулентная скорость  $\xi$ , растет с высотой в атмосфере от 1-2 км/с в нижних ее слоях до 10-20 км/с в верхних (см., например, работу [15], в которой зависимость  $\xi(\tau)$  была получена для сверхгиганта  $\gamma$  Cyg). Гигас [16] в своем детальном не-ЛТР анализе линий Fe в спектре Веги также обнаружил зависимость  $\xi(\tau)$ . Согласно этому исследованию,  $\xi$ , меняется в атмосфере Веги от 1 до 2 км/с. В работе [17] для  $\gamma$  Gem оказалось необходимым ввести для ультрафиолетовых спектральных линий Ti, Fe и Ni на 0.6 км/с меньшую величину  $\xi_n$ , чем при анализе линий тех же элементов, находящихся в видимом диапазоне. Это также может служить основанием для предположения о переменности  $\xi$ , с глубиной в атмосфере A и F-звезд главной последовательности.

Возможно ли интерпретировать полученные нами зависимости  $\log(\text{Cr}/N)$  от  $\Delta\lambda$  с помощью введения для химически однородной звездной атмосферы такой переменной с глубиной микротурбулентной скорости? В рамках этой гипотезы наблюдаемый для Ar-звезд относительный дефицит Cr в поверхностных слоях объясняется уменьшением в этих слоях  $\xi$ , по сравнению с остальной атмосферой; для металлических звезд, наоборот, следует предположить увеличение  $\xi$ , в поверхностных атмосферных слоях.

Для проверки гипотезы о переменности с глубиной  $\xi$ , мы попытались подобрать для  $\beta$  CrV и Сириуса такие зависимости  $\xi(\tau)$ , которые ликвидировали бы ход  $I_{\text{ггн}} - I_{\text{обс}}$  с  $\Delta\lambda$ . Для оценки приемлемости той или иной зависимости  $\xi(\tau)$  использовалась та же методика, что и ранее для определения вертикальных распределений Cr. Несмотря на множество испробованных зависимостей  $\xi(\tau)$ , нам не удалось подобрать такого хода микротурбулентной скорости с глубиной, который бы объяснил наблюдаемые относительные интенсивности линий Cr II в спектрах  $\beta$  CrV и Сириуса также хорошо, как и гипотеза о вертикальной стратификации Cr. Детальные расчеты показали, что введение переменной  $\xi$ , практически не оказывает влияния на слабые линии  $\lambda$  4856.19 и 4864.33 Å, которые расположены ближе всего к ядру  $H_p$ . В то же время, интенсивность сильных линий ( $\lambda$  4824.13, 4848.24 и 4876.40 Å) меняется, и в результате разброс содержаний Cr, определенных по сильным и слабым линиям, значительно увеличивается. Зависимость  $I_{\text{ггн}} - I_{\text{обс}}$  от  $W_\lambda$  становится доминирующей и не позволяет ликвидировать зависимость  $I_{\text{ггн}} - I_{\text{обс}}$  от  $\Delta\lambda$ . На

рис.5а и с представлена аппроксимация зависимостей  $I_{\text{пл}} - I_{\text{ат}}$  от  $\Delta\lambda$  для нескольких "неудачных" вариантов хода  $\xi_r$  с глубиной в атмосферах  $\beta$  CrV и Сириуса. Соответствующие зависимости  $\xi_r(\tau)$  показаны на рис.5б и д.

Итак, гипотеза о зависимости  $\xi_r$  от оптической глубины не может объяснить наблюдаемые относительные интенсивности линий Cr II. Следует добавить, что традиционная методика определения  $\xi_r$ , требующая отсутствия хода  $\log(EI/N)$  с  $W_\lambda$ , вряд ли является корректной при наличии вертикальной стратификации данного химического элемента. Действительно, сильные спектральные линии чувствительны к содержанию химического элемента в широком диапазоне оптических глубин, а слабые - только к содержанию химического элемента вблизи области формирования континуума. По этой

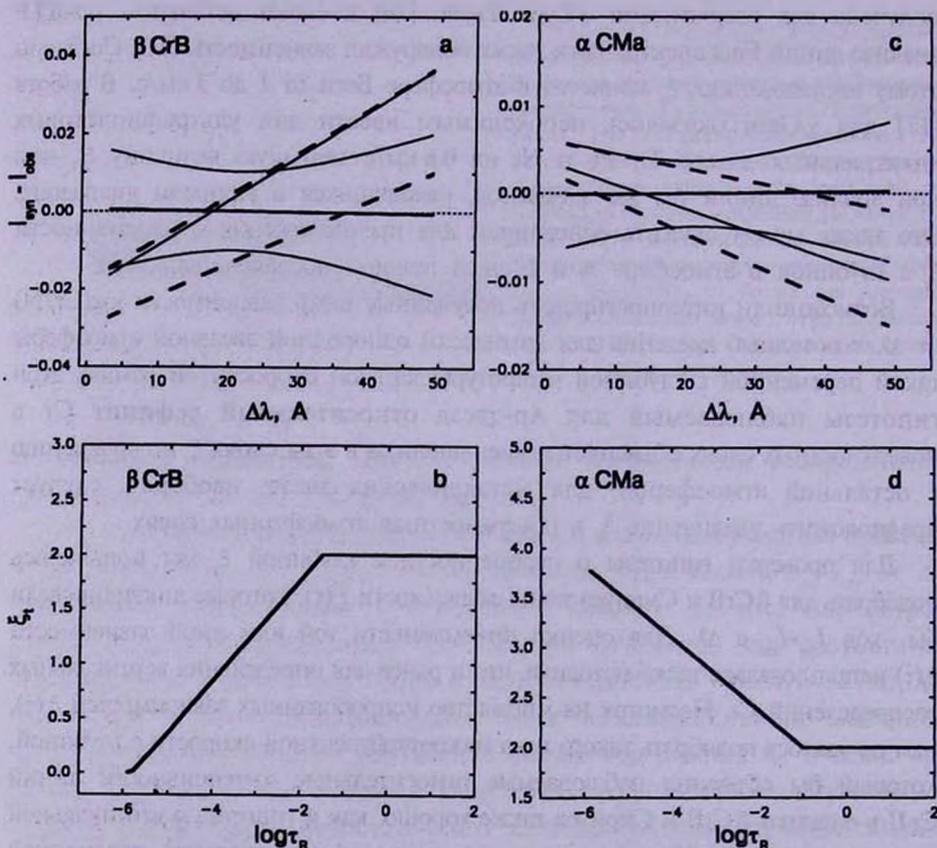


Рис. 5. а) Линейная аппроксимация зависимостей  $I_{\text{пл}} - I_{\text{ат}}$  от  $\Delta\lambda$  для различных  $\xi_r(\tau)$  в атмосфере  $\beta$  CrV. Сплошная тонкая линия соответствует однородному распределению с  $\log(\text{Cr}/N) = \langle \log(\text{Cr}/N) \rangle$  (см., табл.1), жирная сплошная линия - оптимальному ступенчатому распределению Cr, жирные штриховые линии - однородному распределению Cr с  $\log(\text{Cr}/N) = -5.65$  и  $-5.85$  и с зависимостью  $\xi_r(\tau)$ , изображенной на рис.5б. Сплошными тонкими кривыми показан 95%-ый доверительный интервал линейной аппроксимации зависимости  $I_{\text{пл}} - I_{\text{ат}}$  от  $\Delta\lambda$  для оптимального варианта стратификации Cr. б) Один из вариантов зависимости  $\xi_r(\tau)$  в атмосфере  $\beta$  CrV. в) То же, что и на рис.5а, но для Сириуса. Жирными штриховыми линиями показана линейная аппроксимация зависимостей  $I_{\text{пл}} - I_{\text{ат}}$  от  $\Delta\lambda$ , рассчитанных при однородном распределении Cr с  $\log(\text{Cr}/N) = -4.65$  и  $-4.85$  и с зависимостью  $\xi_r(\tau)$ , изображенной на рис.5д. д) То же, что и на рис.5б, но для Сириуса.

причине при наличии вертикальной стратификации можно ожидать зависимости содержания элемента от силы линий, никак не связанной с неправильным выбором  $\xi_r$ .

Что касается Ar-звезд, то для них ситуация усложняется наличием сильных магнитных полей. В этом случае следует ожидать дополнительной стабилизации звездной атмосферы и малости истинной величины  $\xi_r$ . Микротурбулентные скорости, вводимые при анализе химических составов магнитных Ar-звезд, скорее всего являются эффективным учетом магнитного уширения спектральных линий. Таким образом, в случае магнитных Ar-звезд зависимость  $\log(Cr/N)$  от  $\Delta\lambda$  может быть, в принципе, объяснена изменением с глубиной напряженности магнитного поля при отсутствии стратификации Cr. В работе Романюка [18] была предпринята попытка определения вертикального градиента магнитного поля с помощью сравнительного анализа спектральных линий, расположенных до и после бальмеровского скачка. В этом исследовании для  $\alpha^2 CVn$  было найдено увеличение напряженности поля с глубиной, а для  $\beta CrV$  - однородное магнитное поле. Окончательный ответ на вопрос о влиянии вертикального градиента магнитного поля на относительные интенсивности линий Cr II может дать детальное моделирование профилей этих спектральных линий с учетом их уширения в магнитном поле.

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

1. Для нескольких Ar и Am-звезд с помощью моделирования профилей линий Cr II подобраны вертикальные распределения хрома. Эти расчеты подтвердили корректность интерпретации зависимости  $\log(Cr/N)$  от  $\Delta\lambda$  на основании гипотезы о наличии вертикального градиента исследованного химического элемента. В случае Ar-звезд полученные вертикальные распределения согласуются с результатами исследований [8,14] линий Cr в спектре Ar-звезды 53 Cam.

2. С помощью исследования функций вклада проведен детальный анализ условий формирования линий Cr II в атмосферах  $\beta CrV$  и Сириуса.

3. Показано, что альтернативная гипотеза о переменности с глубиной микротурбулентной скорости  $\xi_r$  не способна объяснить наблюдаемые относительные интенсивности линий Cr II.

<sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория, Украина

<sup>2</sup>Симферопольский государственный университет, Украина

## INVESTIGATION OF STRATIFICATION OF VERTICAL DISTRIBUTION OF CHROMIUM IN THE ATMOSPHERES OF CP STARS. II. MODEL ANALYSIS

I.S.SAVANOV<sup>1</sup>, O.P.KOCHUKHOV<sup>1,2</sup>, V.V.TSYMBAL<sup>1</sup>

Detailed modelling of Cr II line profiles has been performed in order to obtain vertical distributions of this element in the atmospheres of several Ap and Am-stars. Our results for Ap-stars are in agreement with vertical Cr distribution calculated by Babel [8,14] for Ap-star 53 Cam. It is shown that our observational material cannot be interpreted using hypothesis of depth-dependent microturbulent velocity.

### ЛИТЕРАТУРА

1. И.С.Саванов, О.П.Кочухов, В.В.Цымбал, *Астрофизика*, **44**, 79, 2000.
2. I.I.Romanyuk, G.P.Topil'skaya, in "Stellar Magnetic Fields". Eds. Yu.V.Glagolevsky, I.I.Romanyuk; М., Nauka, 170, 1997.
3. В.Л.Хохлова, Г.П.Топильская, *Письма в Астрон. ж.*, **18**, 150, 1992.
4. 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.
5. K.C.Smith, *Astron. Astrophys.*, **297**, 237, 1995.
6. P.Magain, *Astron. Astrophys.*, **163**, 135, 1986.
7. Д.Ф.Грей, *Наблюдения и анализ звездных фотосфер*, Мир, М., 1980.
8. J.Babel, *Astron. Astrophys.*, **258**, 449, 1992.
9. J.Babel, *Astron. Astrophys.*, **283**, 189, 1994.
10. K.Hunger, in "Upper Main Sequence Stars with Anomalous Abundances". Eds. C.R.Cowley, M.M.Dworetzky, C.Megessier, IAU Colloq. No. 90, D.Reidel, 257, 1986.
11. V.V.Tsybal, in "Model Atmospheres and Stellar Spectra". Eds S.J.Adelman, F.Kupka, W.W.Weiss, ASP Conf. Ser., **108**, 198, 1996.
12. И.С.Саванов, О.П.Кочухов, *Письма в Астрон. ж.*, **24**, 601, 1998.
13. K.C.Smith, M.M.Dworetzky, *Astron. Astrophys.*, **274**, 335, 1993.
14. J.Babel, T.Lanz, *Astron. Astrophys.*, **263**, 232, 1992.
15. Л.С.Любимков, З.А.Самедов, *Астрофизика*, **32**, 49, 1990.
16. D.Gigas, *Astron. Astrophys.*, **165**, 170, 1986.
17. M.Nishimura, K.Sadakane, *Publ. Astron. Soc. Jap.*, **46**, 349, 1994.
18. И.И.Романюк, *Письма в Астрон. ж.*, **10**, 443, 1984.