

УДК 524.333

## Моделирование хромосферы звезды R CrB

Э.А. Барановский<sup>1</sup>, А.Э. Розенбуш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный  
*edward@crao.crimea.ua*

<sup>2</sup> Главная астрономическая обсерватория, Киев, Украина

Поступила в редакцию 5 декабря 2008 г.

**Аннотация.** Рассчитана модель хромосферы звезды R CrB по наблюдаемым профилям линий H и K и ИК-триплета Ca II, линий D Na I и H- $\alpha$ . Рассчитанные профили линий H и K и ИК-триплета Ca II и H- $\alpha$  хорошо согласуются с наблюдаемыми как для спокойного состояния звезды, так и для активного – минимума блеска. Расчет профилей линий во время минимума блеска сделан в предположении, что минимум вызван затмением диска звезды пылевым облаком. При этом хромосфера не является гидростатической – колонковая плотность в основании хромосферы на 2 порядка больше по сравнению с величиной в гидростатической модели. Наша модель более протяженная, менее плотная в основании хромосферы и более плотная в верхней хромосфере. Протяженность рассчитанной хромосферы около 3 радиусов звезды. Плотность вещества – 108–1010 атомов на 1 см<sup>3</sup>. Температура хромосферы 5000–7000 К. Согласование вычисленных и наблюдаемых профилей линий поглощения D Na I оказалось возможным только в предположении, что вокруг звезды имеется холодная оболочка, содержащая атомы Na I, расширяющаяся со скоростью около 30 км/с. Она находится выше хромосферы, но достаточно близко к звезде, чтобы звезда и оболочка наблюдались как одно целое. Оптическая толщина оболочки в линии D2 Na I составляет около 1.8. В минимуме блеска эта оболочка, освещаемая излучением звезды, дает дополнительную эмиссию, вызванную резонансным рассеянием в D линиях Na I.

CHROMOSPHERE MODELLING OF THE STAR R CrB, by E.A. Baranovsky, A.E. Rozenbush. The model chromosphere is calculated for the R CrB star using the observed profiles of H,K CaII, D lines of NaI and H-alpha. The profiles of H,K CaII and H-alpha, calculated with the model, are in good agreement with the observed profiles both for the undisturbed state and for the minimum. The profile calculations for the state of minimum are made by the assumption that minimum is caused by the dust cloud obscuring the photosphere of the star. The model is not hydrostatic in the sense that mass column density at the base of chromosphere is about 2 orders higher as compared to the value corresponding to hydrostatic model. The density is lower at the base of chromosphere and higher at the upper chromosphere and the extension is greater as compared to hydrostatic model. The temperature in the chromosphere is 5000–7000 K and density is 108–1010 atoms in 1 cm<sup>3</sup>. The extension of the calculated chromosphere is about 3 star radii. To get an agreement of the profiles of D lines of NaI was possible only with the assumption that around the star there exists cold envelope, containing the NaI atoms which expands with the velocity about 30 km/s. This envelope is located beyond the bounds of chromosphere, but nearly enough to be observed as one object with the star. Optical thickness of the envelope in the D2 line is about 1.8. In the undisturbed state of star the envelope contributes to the absorption in D lines, but in the minimum this envelope, illuminated by the star light, creates also the additional emission caused by the resonance scattering in the D lines.

**Ключевые слова:** хромосфера, R CrB

---

## 1 Введение

Звезды с переменностью типа R Северной Короны (RCB) на длительное время уменьшают свой визуальный блеск на несколько звездных величин. Это сопровождается значительными изменениями в линейчатом спектре звезды, в частности изменением профилей спектральных линий (Розенбуш, 1996). Линии поглощения, наблюдаемые в спокойном состоянии звезды, во время ослабленного состояния (минимума блеска) становятся менее глубокими. По мере ослабления блеска появляются и усиливаются эмиссионные линии. В частности, в центре линий дублета натрия появляется узкая эмиссия (ширина не превышает ширину инструментального профиля), интенсивность которой постепенно увеличивается, и при достаточном ослаблении блеска звезды, т. е. континуума спектра звезды, эмиссия в линиях может превысить уровень непрерывного спектра. Эмиссии сохраняют свою абсолютную интенсивность (Пэйн-Гапошкин, 1963) по крайней мере в первой половине минимума блеска (Розенбуш, 2001). При достаточно высоком спектральном разрешении эмиссии в ядре у ряда сильных линий (Sc II  $\lambda$  424.6 нм, ИК-триплета Ca II) можно наблюдать и в максимуме блеска. Наблюдается хромосферный индикатор первого рода – эмиссия в линии C II  $\lambda$  1335 Å (R CrB, RY Sgr и V854 Cen) (Бруннер и др., 1999). Во время минимума наблюдаются также и широкие эмиссии, ширина которых соответствует скоростям движения вещества до 300 км/с. Эти данные можно коротко суммировать таким образом: в окрестностях звезды с переменностью типа R Северной Короны постоянно существует область или области, где образуются эмиссионные линии. Интерпретация переменности такого типа ведется в рамках гипотезы конденсации пыли на луче зрения. Звезды с переменностью типа RCB – это маломассивные (около  $0.7 M_{\odot}$ ) пульсирующие гелиевые сверхгиганты с низким содержанием водорода и высоким содержанием углерода. Имеет место значительная постоянная потеря массы (около  $10^{-6} M_{\odot}$  в год). Удаляясь от звезды, плазма охлаждается и в ней конденсируется углеродная пыль, формирующая пылевые облака, которые наблюдаются в виде инфракрасного избытка. Минимум блеска наблюдается при конденсации облака пыли на луче зрения. Происхождение эмиссионных линий при таком подходе объясняется как затмение фотосферы звезды пылевым облаком, и тогда начинает доминировать хромосферное излучение (Фист, 1996; Пэйн-Гапошкин, 1963). Причины и развитие минимума обычно описываются в общих чертах, но никогда не моделировались изменения профилей спектральных линий, которые можно ожидать при ослаблении фотосферного излучения во время затмения. Неизвестно, насколько близкими могут быть расчетные изменения профилей к тому, что наблюдается.

Мы поставили себе задачу смоделировать изменения профилей нескольких сильных спектральных линий во время затмения пылевым облаком и сравнить результаты с наблюдаемыми изменениями применительно к самой R CrB.

## 2 Наблюдения

Основу исследования составили результаты спектрального мониторинга с высоким спектральным разрешением, ведущегося с 1998 г. на спектрографе куде 2.6-м телескопа ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории. В сочетании с матрицей AT-200 CCD Camera System, имеющей  $1024 \times 256$  элементов, регистрировались участки спектра протяженностью около 6.4 нм, центрированные на линии дублета D Na I. В наблюдениях в сезон 2000 г. мы использовали камеру ASTROMED-2000 с матрицей EEV P8600 и получили спектры протяженностью, не превышавшей 3 нм. При наблюдениях R CrB в максимуме блеска ( $V \sim 6$  m) экспозиция 20–30 минут давала отношение сигнал/шум ( $S/N$ )  $> 100$ ; при наблюдениях в ослабленном состоянии ( $V \sim 8-10$  m) отношение  $S/N$  снижалось до 40. Некоторые спектрограммы были получены сложением нескольких изображений. Инструментальный профиль имел полную ширину на половине максимума интенсивности FWHM от 0.015 нм

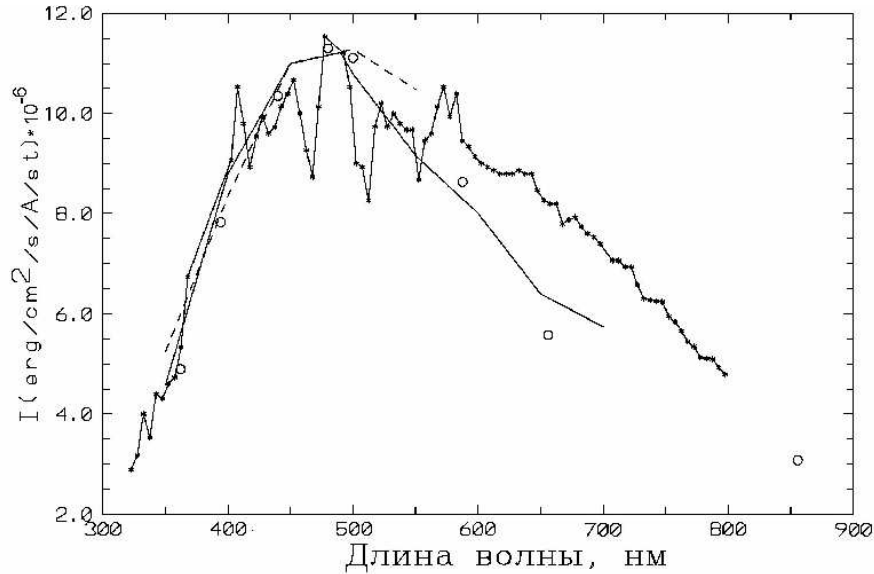
для щели 0.2 мм до 0.046 нм для щели 1.0 мм или 2.3 и 7 пикселей матрицы соответственно. Шкала длин волн задавалась спектром сравнения Th-Ne-Ar, точность проведения дисперсионной кривой была не хуже 0.001 нм. Лучевая скорость звезды определялась по 5–7 линиям со средней ошибкой не более +1.0 км/с. Для учета вклада в спектр звезды теллурических линий воды были получены спектры звезды раннего спектрального класса при идентичных условиях наблюдений. Все коррекции спектров звезд (за плоское поле, космические частицы, орбитальную скорость Земли и т. п.) выполнены с помощью комплекса программ обработки спектров, используемого в КрАО и включающего программный пакет SPE (Spectral Processing Engine). Окончательные спектры звезд были приведены к лабораторной шкале длин волн. Спектры R CrB в минимуме 1985 г. были получены на 60-см телескопе ВНБ “Терскол” ГАО АН УССР со спектрографом UAGS, оснащенным набором дифракционных решеток с дисперсией около 2.9 нм/мм или спектральным разрешением около 0.06 нм. Использовались фотопластинки Eastman Kodak 103aO и 103aF. Для калибровки шкалы длин волн использовался Ar-Ne-Fe спектр сравнения. Все спектрограммы имели калибровки для измерения фотопластинок в шкале интенсивностей. В табл. 1 представлены данные наблюдений.

Таблица 1. Наблюдения R CrB

Дата	Ослабление блеска звезды	Область
3.08.1985	0	H, K Ca II
2.10.1985	2.4	H, K Ca II
5.10.1985	3.5	H, K Ca II, линии D Na I
7.08.1998	0	ИК триплет Ca II, линии D Na I
12.09.1998	2.3	линии D Na I
19.08.2002	0	H-alpha
19.02.2003	2.4	H-alpha

### 3 Моделирование

В расчетах использовались следующие параметры звезды: ускорение силы тяжести  $\log(g) = 0.5$ , эффективная температура 7000 K. Модели хромосфер для этих звезд отсутствуют, но есть модели для трех обычных сверхгигантов классов G и M, рассчитанные по наблюдаемым профилям линий Ca II и Mg II (Басри и др., 1981). Одна из этих звезд – e Gem – по величине эффективной температуры и величине силы тяжести (0.85) близка к R CrB, и модель ее хромосферы можно взять в качестве исходной для невозмущенного состояния. Для расчета моделей мы использовали наблюдаемые профили линий Na, H и K и ИК-триплет Ca II и D Na I. Поиск модели производился путем подбора зависимости температуры, плотности и турбулентной скорости от высоты. Подбором мы находили такой ход параметров с высотой, с которым вычисленные профили хромосферных линий соответствуют наблюдаемым. При этом произвольно задавался ход температуры и турбулентной скорости, а плотность определялась в соответствии с условием гидростатического равновесия. Для вычисления профилей хромосферных линий кроме модели хромосферы необходима также модель фотосферы. Фотосфера определяет интенсивность континуума, а для правильного вычисления профилей линий необходимо, чтобы вычисленная интенсивность континуума соответствовала наблюдаемой. Модель фотосферы для R CrB была рассчитана Асплундом (Асплунд и др., 2000) по наблюдаемой зависимости интенсивности континуума от длины волны. По нашей просьбе Асплунд прислал нам модель в том виде, какой нужен для наших вычислений. Мы использовали величины коэффициентов непрерывного поглощения из тех источников, которые цитирует Асплунд в своей работе по расчету модели фотосферы. Основной вклад в коэффициент непрерывного поглощения для нашей звезды дает нейтральный углерод и рассеяние на электронах. Заметный вклад дают также отри-



**Рис. 1.** Сравнение вычисленной по модели Асплунда (кружки) и наблюдаемой (сплошная – (Асплунд, 1997), пунктир – (Паттерсон, 1974)) интенсивности непрерывного спектра. Штриховая линия со звездочками – распределение энергии в спектре R CrB согласно (Розенбуш 1979)

цательные ионы гелия и углерода. Величины коэффициентов поглощения мы взяли из (Пич, 1970; Джон, 1994; Соммервил, 1965; Травис, 1968; Мейрскоф и др., 1966).

Расчет интенсивности непрерывного спектра с принятыми значениями величин коэффициентов непрерывного поглощения для модели фотосферы Асплунда дал хорошее согласие с наблюдаемым распределением энергии в спектре R CrB для длин волн более 5000 Å. Для длин волн меньше 5000 Å расчетные величины оказались завышенными по сравнению с наблюдаемыми в 1.1–1.5 раза. Это говорит о том, что в области коротких длин волн мы взяли заниженные значения коэффициентов непрерывного поглощения. Мы не учитывали покровный эффект от множества слабых фотосферных линий и молекулярных полос, которые присутствуют в области коротких длин волн. Так как учесть точно покровный эффект в области коротких длин волн практически невозможно, то иногда применяется метод эмпирического определения этого эффекта. Коэффициент увеличения непрерывного поглощения подбирается так, чтобы получить согласие с наблюдаемой величиной континуума также и в синей области спектра. Для согласования вычисленной и наблюдаемой интенсивности непрерывного спектра в области длин волн короче 500 нм мы увеличили в этой области коэффициент непрерывного поглощения в 1.2–2.6 раза. Сравнение вычисленных и наблюдаемых величин интенсивности непрерывного спектра представлено на рис. 1. Мы взяли наблюдения из работ (Асплунд, 1997; Паттерсон, 1974; Розенбуш, 1979). Дальнейшие расчеты мы проводили с этими значениями коэффициента непрерывного поглощения и моделью фотосферы Асплунда и меняли только модель хромосферы. Расчет модели хромосферы был сделан по невозмущенным профилям линий H и K и ИК-триплета Ca II, линии Na и линий D Na I. Профили линий вычислялись по не-ЛТР программе типа Pandora (Авретт и др., 1969). Однако необходимо было учесть, что хромосфера очень протяженная и условие плоско-параллельности слоев не выполняется. Мы применили некоторое приближение. При решении уравнений переноса и вычислении функции источников используется обычная схема для плоско-параллельных слоев. Но при вычислении интенсивности выходящего излучения, т. е. при интегрировании функции источников по глубине, учитывается кривизна слоев. При этом диск звезды разбивается на концентрические кольца с разными углами наклона луча зрения к поверхности звезды и вычисленные интенсивности усредняются с соответствующими весами. Варьируя параметры исходной модели (звезды e Gem), мы получили согласие вычисленных

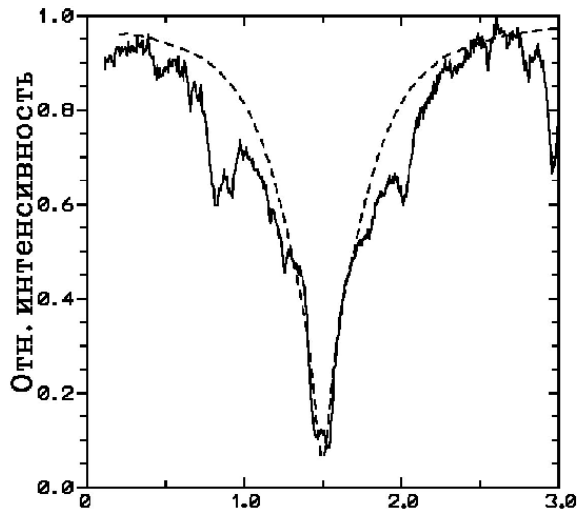


Рис. 2. Сравнение вычисленного (пунктир) и наблюдаемого (сплошные) профиля линии ИК CaII 8542 для спокойного состояния звезды

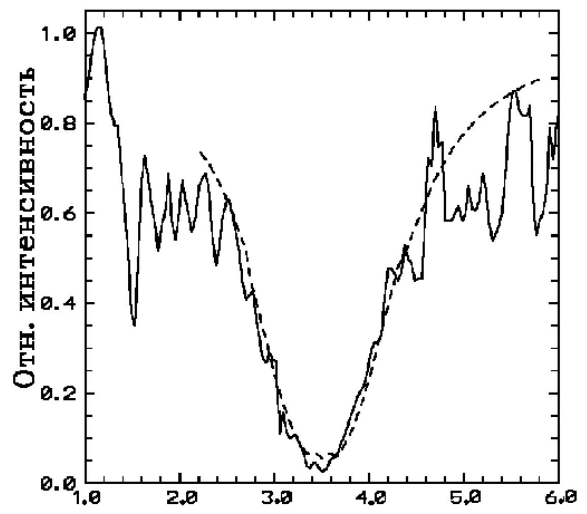


Рис. 3. Сравнение вычисленного (пунктир) и наблюдаемого (сплошные) профиля линии K CaII для спокойного состояния звезды

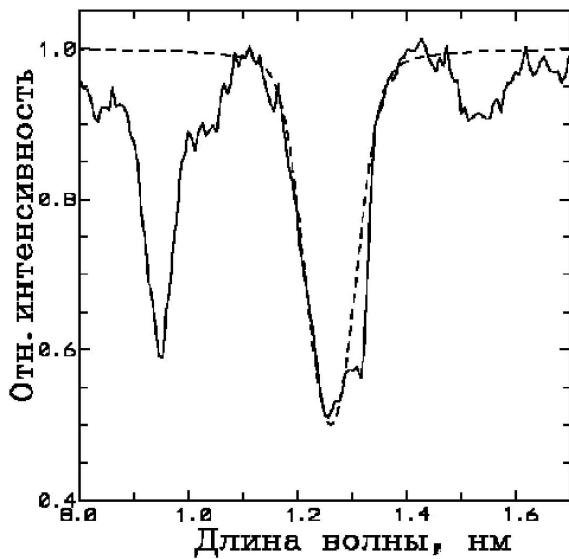


Рис. 4. Сравнение вычисленного (пунктир) и наблюдаемого (сплошные) профиля линии H-alpha для спокойного состояния звезды

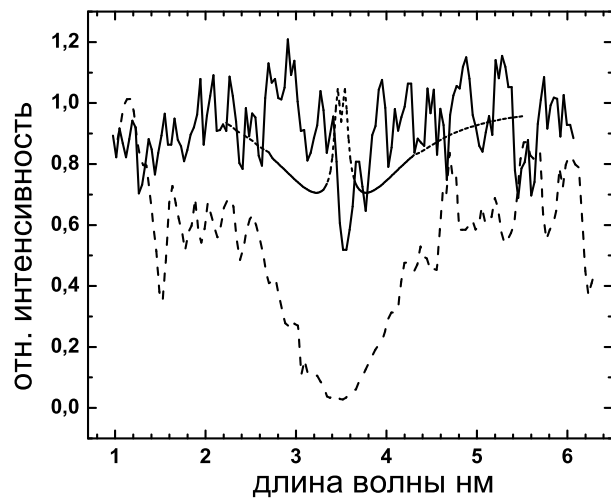


Рис. 5. Сравнение вычисленных (короткий пунктир) и наблюдаемых (сплошные) профилей линий в минимуме блеска звезды; длинный пунктир – невозмущенные профили. K CaII, ослабление на 3.5 м

и наблюдаемых профилей линий H $\alpha$  и H и K и ИК-триплета Ca II для невозмущенного состояния звезды. Согласие профилей для D-линий натрия оказалось не очень хорошим и, кроме того, гидростатические модели оказались совершенно непригодными для объяснения наблюдаемой эмиссии в минимуме блеска. Вычисленная величина эмиссии в хромосферных линиях получается слишком малой по сравнению с наблюдаемой во время минимумов блеска. Хромосфера гидростатической

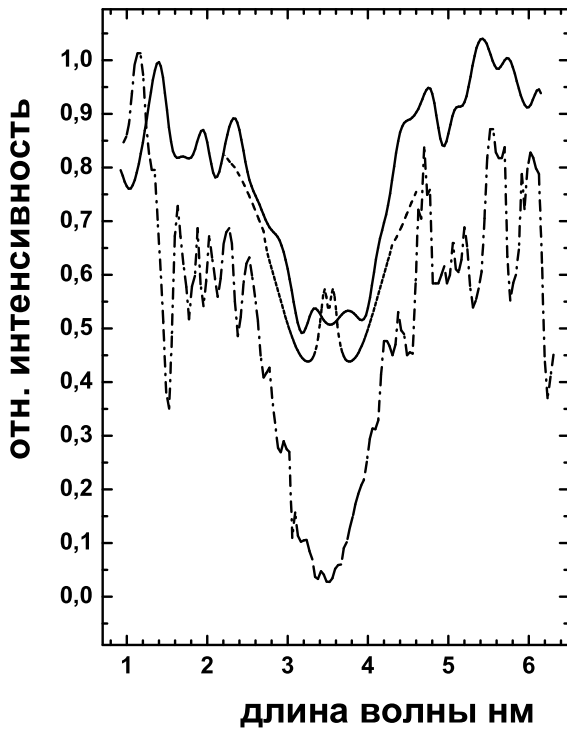


Рис. 6. Сравнение вычисленных (короткий пунктир) и наблюдаемых (сплошные) профилей линий в минимуме блеска звезды; длинный пунктир – невозмущенные профили. К Ca II, ослабление на 2.4 m

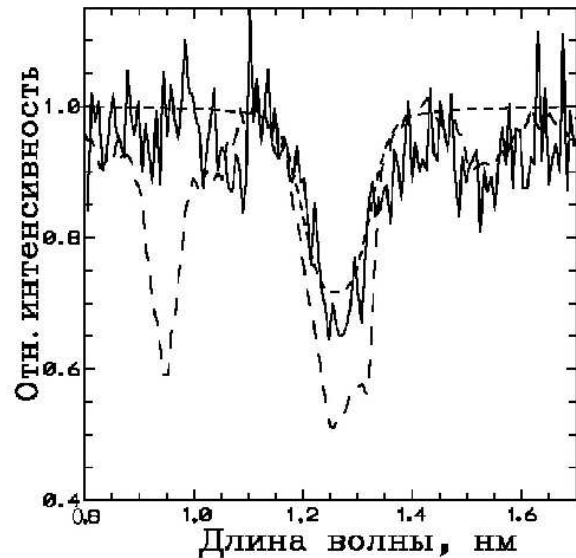


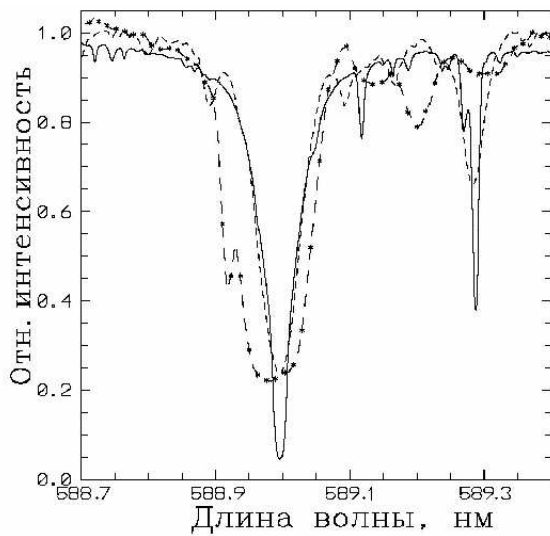
Рис. 7. Сравнение вычисленных (короткий пунктир) и наблюдаемых (сплошные) профилей линий в минимуме блеска звезды; длинный пунктир – невозмущенные профили. H-alpha, ослабление на 2.4 m

модели недостаточно протяженная и содержит мало вещества. В связи с этим мы отказались от условия гидростатического равновесия. Кроме того, при подборе модели мы для каждого варианта проверяли согласование профилей линий и для невозмущенного состояния, и для затмения. Оказалось, что достаточно большая величина эмиссии в хромосферных линиях во время минимума возможна только с моделями, в которых масса вещества над температурным минимумом на два порядка больше той массы, которая соответствует условию гидростатического равновесия. Плотность хромосферы при этом должна быть достаточно низкой, так что протяженность хромосферы должна составлять 2–3 радиуса звезды. С моделями такого типа мы получили согласие вычисленных и наблюдаемых профилей линий H-alpha и H и K и триплета Ca II для невозмущенного состояния и минимумов с различным ослаблением блеска звезды. На рис. 2–7 показано сравнение вычисленных и наблюдаемых профилей.

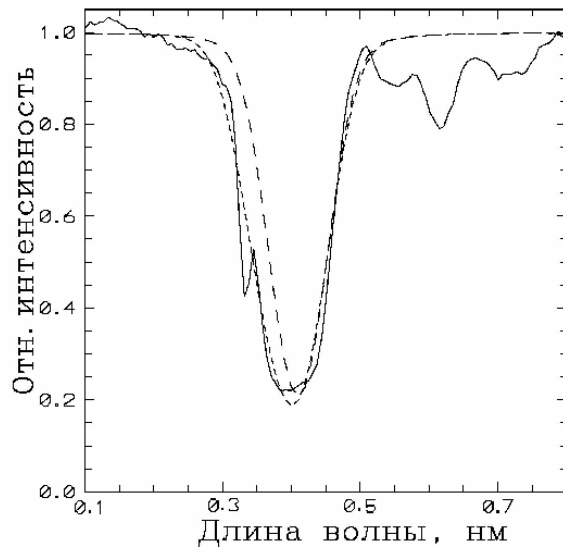
Однако рассчитанная модель не объясняет наблюдаемые профили линий D натрия. На рис. 8 показаны наблюдаемые профили линии D2 для R CrV в максимуме, для обычного сверхгиганта  $\beta$ Aqr и для Солнца. Калибровка по шкале длин волн сделана по фотосферным линиям, т. е. фотосферным линиям приписаны лабораторные длины волн.

Наблюдаемый профиль звезды R CrV шире профилей  $\beta$ Aqr и солнечного профиля и смещен в сторону коротких длин волн. Смещение нельзя объяснить отличием хромосферных лучевых скоростей от фотосферных, так как другие хромосферные линии – H и K и ИК-триплет Ca II, триплет Mg I и H-alpha – не смещены. Вычисленный профиль линии D2 также уже наблюдаемого (рис. 9).

По-видимому, усиление коротковолнового крыла вызвано межзвездным или околозвездным поглощением. Нетрудно рассчитать, какое количество нейтрального натрия должно находиться на лу-

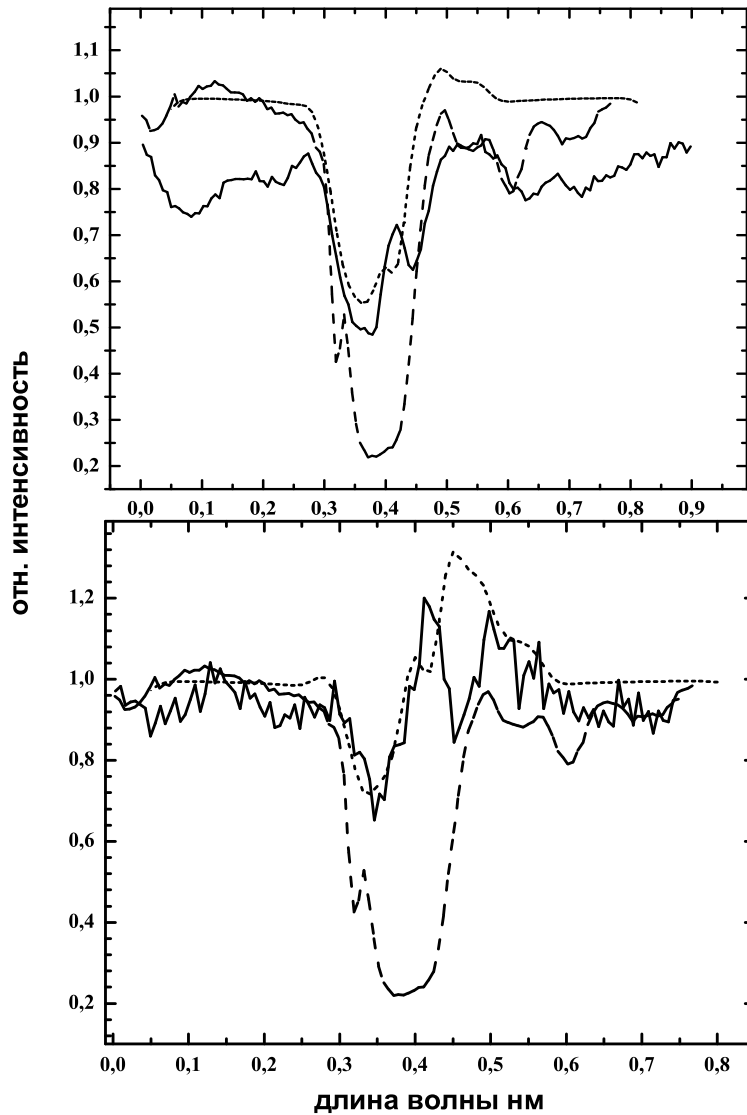


**Рис. 8.** Наблюдаемые профили линии D2 Na I для RCB (длинный пунктир), для Солнца (сплошная) и для обычного сверхгиганта beta Aqr (короткий пунктир)



**Рис. 9.** Наблюдаемый (сплошная) и вычисленный без учета околозвездного поглощения (длинный пунктир) и с учетом околозвездного поглощения (короткий пунктир) профили линии D2 Na I

че зрения для объяснения наблюдаемой ширины профиля. Согласие вычисленного и наблюдаемого профилей мы получили с поглощающим слоем, который имеет оптическую толщину в центре линии D2 около 1.8–2.0 и лучевую скорость (направленную от звезды) около 30 км/сек (рис. 9). Но при этом не удалось получить вычисленную эмиссию, сравнимую с наблюдаемой во время минимумов, для линий D натрия. Вычисленная эмиссия в этих линиях намного меньше наблюдаемой при любых вариациях параметров моделей. В связи с этим мы рассмотрели возможность дополнительного источника свечения линий D натрия, связанного с наличием атомов натрия в окрестностях звезды. Выше мы учитывали околозвездное поглощение в линиях D натрия для согласования профилей в невозмущенном состоянии звезды. Этого достаточно, если поглощающие атомы натрия находятся только на луче зрения. Но если имеется оболочка вокруг звезды (за пределами хромосферы, но достаточно близко, так что звезда и оболочка наблюдаются как одно целое), то нужно учитывать также эмиссию от оболочки, возникающую вследствие резонансного рассеяния излучения звезды в частотах линий D Na I. Свечение атомов натрия в линиях D натрия в данной ситуации обусловлено тем же механизмом, который вызывает свечение комет в этих линиях вблизи Солнца. Как известно, эмиссия комет в линиях D натрия является одной из самых ярких в спектрах комет. В нашем случае уже без расчетов можно ожидать значительный эффект. При оптической толщине оболочки около 2 в линии D2 излучение звезды в этой линии поглощается оболочкой почти полностью. Все это излучение после рассеяния в оболочке уходит от звезды, т. е. количество излучения в каком-либо направлении не изменилось по сравнению с тем, что было при отсутствии оболочки. Во время затмения пылевое облако закрывает звезду, но оболочка остается видимой. При ослаблении излучения от звезды в 10 раз эмиссия в линии D2 от оболочки окажется в 2 раза больше континуума звезды (ослабленного пылевым облаком), так как остаточная интенсивность в центре линии D2 равна 0.2. Существование оболочки объясняется постоянной потерей массы у нашей звезды, что приводит к тому, что в окрестности звезды постоянно присутствует какое-то количество вещества. Подсчет на основании величины потери ( $10^{-6} M_{\odot}$  в год) и скорости истечения вещества на уровне фотосферы показывает, что на расстоянии от 10 до 100 радиусов звезды (т. е. за пределами хромосферы) находится достаточное количество нейтральных атомов натрия для образования оболочки с оптической

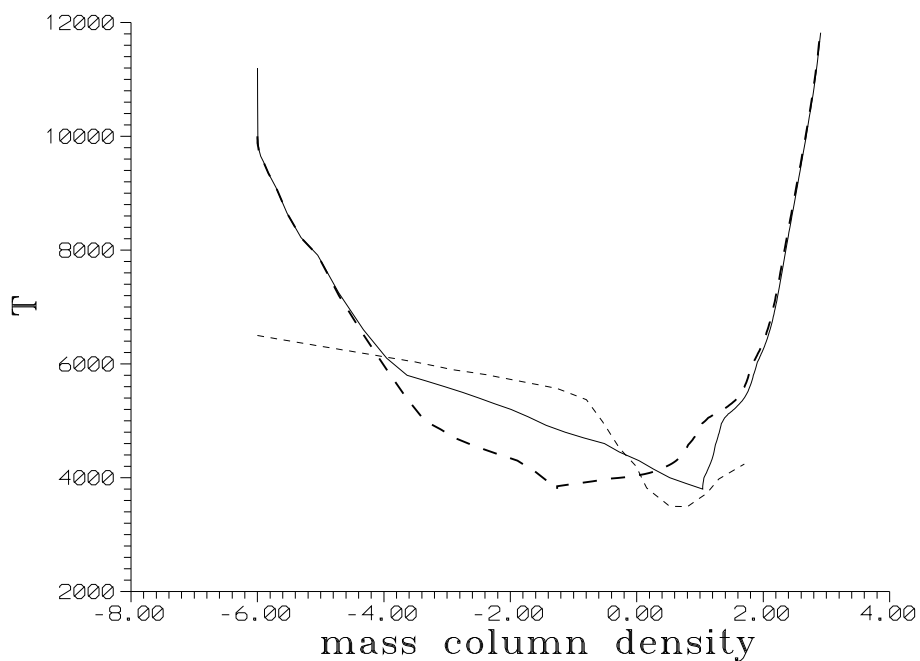


**Рис. 10.** Сравнение вычисленных (короткий пунктир) и наблюдаемых (сплошные) профилей линий D2 Na I в минимуме блеска звезды; длинный пунктир – невозмущенные профили (ослабление на 2.4 m и на 3.5 m)

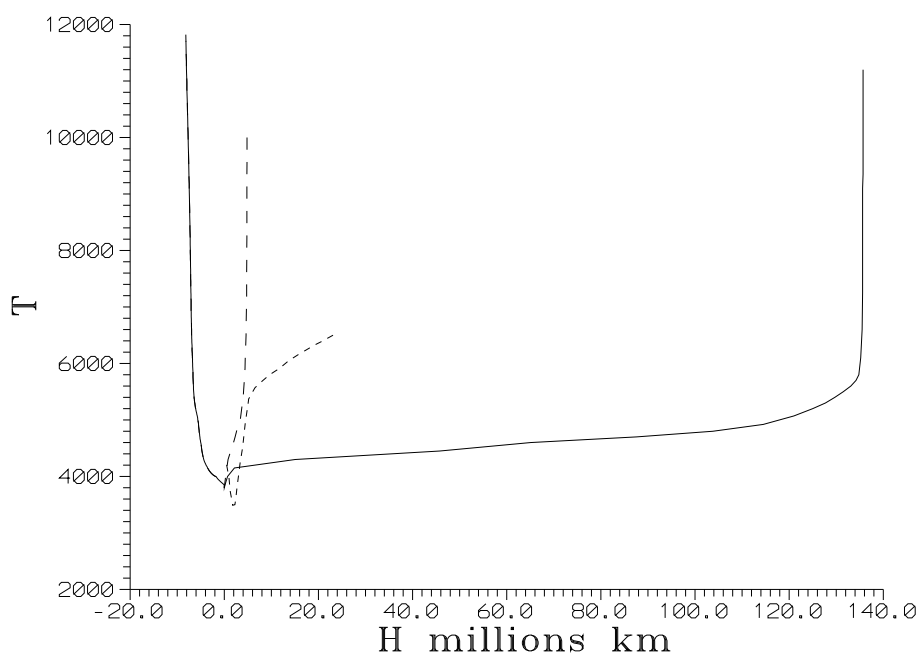
толщиной в центре линии D2, равной 2–3. Для вычисления интенсивности излучения от оболочки используется та же не-ЛТР программа, что и для вычисления излучения от хромосферы. Различие только в том, что в хромосфере первичный источник имеет тепловое происхождение, а в оболочке первичный источник определяется рассеянием излучения центральной звезды на атомах натрия. Для согласования вычисленных и наблюдаемых профилей линий D натрия подбирается оптическая толщина оболочки и радиальная скорость. При вычислении эмиссии видимый диск оболочки разбивается на концентрические кольца, так же как это делается при вычислении излучения от звезды, затем вычисленные интенсивности для отдельных колец усредняются с соответствующими весами.

Путем проб мы получили наилучшее согласие профилей для линий D натрия во время минимумов с оболочкой, оптическая толщина которой в линии D2 равна 1.8, а лучевая скорость, направленная от звезды, равна 30–32 км/сек. Сравнение вычисленных (с учетом оболочки) и наблюдаемых





**Рис. 11.** Рассчитанная модель хромосферы для RCrB (сплошная). Длинный пунктир – модель, соответствующая условию гидростатического равновесия для RCrB, короткий пунктир – модель хромосферы для сверхгиганта epsilon геминорис. По оси абсцисс – колонковая плотность



**Рис. 12.** То же, что на рис. 11, но по оси абсцисс – высота в миллионах км

профилей линии D2 натрия для ослабления звезды на 2.4 и 3.5 звездной величины показано на рис. 10.

Расчетная и наблюдаемая интенсивности сравнимы. Отличие расчета от наблюдения заключается в длинноволновом смещении рассчитанной эмиссии, что может быть обусловлено вкладом и другого механизма образования узкой эмиссии. Окончательная модель хромосферы показана на рис. 11–12.

## 4 Заключение

Нам удалось смоделировать хромосферу звезды в виде зависимости температуры, плотности и турбулентной скорости от высоты. Рассчитанные по модели хромосферы (и модели фотосферы Асплунда) профили линий Na и H и K и ИК триплета Ca II согласуются с наблюдаемыми как для спокойного состояния звезды, так и для минимумов с ослаблением блеска 2.4–3.5 зв. величины. Согласование профилей линий поглощения D натрия оказалось возможным только в предположении, что вокруг звезды за пределами хромосферы имеется холодная оболочка из атомов натрия, оптическая толщина которой в линии D2 натрия равна 1.8, а лучевая скорость около  $-30$  км/сек. Протяженность рассчитанной хромосферы около 3 радиусов звезды, что на порядок превышает протяженность гидростатической модели (1/3 радиуса). Некоторое отличие наблюдаемых профилей эмиссионных линий от расчетных заключается в отсутствии центрального обращения, что указывает на малую оптическую толщину линий. Полученная большая протяженность хромосферы находится в большом контрасте с хромосферой солнечного типа, что может быть связано со значительной потерей массы звездой.

**Благодарности.** Авторы признательны М. Асплунду за предоставленные данные по модели атмосферы звезды с переменностью типа R Северной Короны.

## Литература

- Авретт (Avrett E.H., Loeser R.) // *Smith. Astroph. Obs. Special Report*. 1969. № 303. I-IX.  
 Асплунд (Asplund M.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 318. P. 521.  
 Асплунд (Asplund M. et al.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 353. № 1. P. 287.  
 Басри (Basri G.S., Linsky J.L., Eriksson K.) // *Astrophys. J.* 1981. V. 251. P. 162.  
 Бруннер (Brunner A.R., Clayton G.C., Ayres T.R.) // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. 1999. V. 110. P. 1412.  
 Джон (John T.L.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1994. V. 269. P. 871.  
 Мейрскоф (Meyscough V.P., McDowell M.R.C.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1966. V. 132. P. 457.  
 Паттерсон (Patterson R.S.) // *Astrophys. J.* 1974. V. 204. № 3. P. 838.  
 Пэйн-Галошкин (Payne-Gaposchkin C.) // *Astrophys. J.* 1963. V. 138. № 2. P. 320.  
 Пич (Peach G.) // *Mem. Roy. Astron. Soc.* 1970. V. 73. part 1.  
 Розенбуш А.Э. // *Астрометрия и Астрофизика*. 1979. вып. 38. С. 36.  
 Розенбуш А.Э. // *Астрофизика*. 1996. Т. 39. № 1. С. 145.  
 Розенбуш А.Э. // *Астрофизика*. 2001. Т. 44. № 1. С. 97.  
 Соммервилл (Sommerville W.B.) // *Astrophys. J.* 1965. V. 141.  
 Тревис (Travis L.D.) // *Astrophys. J.* 1968. V. 154. P. 689.  
 Фист (Feast M.W.) // *ASP Conf. Ser.* 1996. V. 96. P. 3.