

IV-Й БОЛЬШОЙ МИНИМУМ ВИЗУАЛЬНОГО БЛЕСКА R CrB. II. СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

А.Э.РОЗЕНБУШ

Поступила 28 октября 2015

Принята к печати 24 августа 2016

Представлены результаты спектральных наблюдений низкого и высокого спектрального разрешения на основных этапах уникально длительного и глубокого минимума визуального блеска R CrB 2007-2015 гг. Развитие спектра показало известные типичные тенденции изменений линейчатого и молекулярного спектра: замещение абсорбционного спектра на эмиссионный. Значительное и длительное ослабление излучения звезды способствовало регистрации редко наблюдаемых запрещенных эмиссионных линий. В частности, линии [OII] $\lambda\lambda 3726 - 3729$ существовали более 1500 суток при ослаблении блеска на $6 + 9^m$. Скорость выноса экранирующей пыли в околозвездные окрестности имела пониженные, примерно в 1.5 раза, величины сравнительно с известными значениями, что было интерпретировано образованием многослойной околозвездной пылевой оболочки с внутренним радиусом $1.5 + 3$ радиусов звезды. Предложены некоторые возможные причины уникальных Больших минимумов блеска R CrB с длительностью и ослаблением подобными минимуму 2007-2015гг.

Ключевые слова: *звезды; переменность типа R CrB; фотометрия; R CrB*

1. *Введение.* Звезда R Северной Короны и основная часть группы звезд с переменностью типа R CrB (RCB) кроме уникальной впечатляющей переменности блеска (длительных временных и значительных ослаблений блеска) обладает еще одной отличительной чертой: слабостью или отсутствием линий водорода в спектре звезды - дефицитом водорода (см. обзоры [1,2]). Спектр звезды в спокойном состоянии подобен спектру нормальной звезды соответствующего температурного класса за исключением усиленных линий атомарного и полос молекулярного углерода. Последнее обстоятельство стало основой гипотезы Лореты-О'Кифа: образование углеродной пыли в атмосфере звезды является причиной ослабления блеска. Подтверждением этой гипотезы стало обнаружение в инфракрасной (ИК) области спектра ИК избытка излучения с эффективной температурой $T_{\text{eff}} \approx 700$ K, но который оказался не связанным с минимумом блеска. Абсорбционный спектр звезды во время минимума блеска замещается на эмиссионный. Появляются многочисленные линии излучения нейтральных и однократно ионизованных атомов, полосы углеродных молекул. Детальное исследование поведения

спектра R CrB во время глубокого минимума блеска проведено коллективом авторов [3]. Наиболее богатый эмиссионный спектр образуется в синей и ультрафиолетовой областях спектра, что создает эффект так называемого "поголубения" показателей цвета $U - B$ и $B - V$ [4]. Выделяют несколько типов эмиссионных линий. У некоторых линий эквивалентные ширины никогда не превышают 20 км/с и они исчезают в фазе минимального блеска (линии Ti II, Sc II, Sr II и др. - узкие эмиссии или спектр типа E1). Спектр типа E2 - широкие эмиссии He I $\lambda\lambda$ 3889, 5876, 7065 и 10 830 Å, D Na I, дублета H и K и ИК триплета Ca II, K I $\lambda\lambda$ 7664, 7699 Å наблюдаются на протяжении всей фазы минимального блеска как широкие линии с полушириной 200-300 км/с; широкая и узкая эмиссия в H α появляется у богатой водородом звезды V854 Cen [5]. Узкие эмиссии запрещенных линий [N II], [S II], [O II] иногда сопровождаются слабой широкой абсорбцией. Развитие профилей некоторых широких эмиссий дополняется появлением высокоскоростных одноименных абсорбций со смещением $-(150 \div 250)$ км/с. Молекулярные полосы C₂, CN неоднократно отмечены в эмиссии [5-7]; у V854 Cen и FG Sge предполагалась идентификация в эмиссии молекул CN и C₃ [8,9]. Поляризация оптического излучения в спокойном состоянии имеет межзвездную природу. Во время минимума блеска появляется значительная (до 10% и более) собственная поляризация. Спектрополяриметрия в минимумах блеска установила отсутствие поляризации у широких и молекулярных эмиссий, что было интерпретировано как следствие расположения источников эмиссий вне поляризирующей среды (см. для деталей обзор [2]).

К настоящему времени, конец 2015г., имеется уже несколько публикаций по исследованию текущего минимума блеска R CrB, три из них посвящены исследованию спектра. Две публикации касаются предварительного описания результатов наблюдений с высоким и низким спектральным разрешением [10,11]. В третьей проведено обсуждение результатов спектральных наблюдений с низким спектральным разрешением 2-6 Å в 2011-2012гг. при блеске 12-13^m [12]. Как и в предыдущих минимумах подтверждено присутствие известных эмиссий H и K CaII, нескольких линий HeI, запрещенных линий [OI], [OII], [NII], [CaII].

В данной статье продолжается представление результатов фотометрических и спектральных R CrB в IV-м Большом минимуме визуального блеска. Ниже будут рассмотрены результаты спектрометрии в этот период и на некоторых этапах заключительной стадии минимума блеска. Большой минимум визуального блеска R CrB будет проанализирован с точки зрения модели оболочки: минимум блеска обусловлен образованием сферической пылевой оболочки в верхних слоях атмосферы звезды [13].

2. *Наблюдения.* Спектральные наблюдения проводились на 2.6-м

телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) с тремя вариантами спектральной аппаратуры. В первом варианте использовался спектрограф в фокусе Куде, оснащенный ПЗС камерой Andor iKon 936 ($2k \times 2k$), что позволяло регистрировать участки спектра протяженностью около 60 \AA в областях избранных спектральных линий: линий дублета натрия D Na I и одной из линий инфракрасного триплета кальция Ca II $\lambda 8542$. Слабость объекта привела к низким значениям отношения сигнал/шум $S/N \approx 10$ для спектра за JD 2456207 и $S/N \approx 40$ за JD 2456416. II-м вариантом с 2014г. стал эшелле-спектрометр в фокусе Куде с вышеупомянутой ПЗС камерой. Входная щель, эквивалентная 2 угловым секундам, обеспечивала спектральное разрешение около 22000 против 30000-40000 в первом варианте. Отношение сигнал/шум из-за слабости объекта было невысоким: 30-60. Наконец, III-й вариант - спектрометр СПЭМ (Спектрограф Эопный Монина) в фокусе Нэсмита, оснащенный ПЗС камерой Princeton Instruments SPEC-10:100B (ХТЕ). В основном использовалась решетка $651''/\text{мм}$: спектральное разрешение при ширине входной щели $3''$ составляло около 8A, отношение сигнал/шум

Таблица 1

СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ R CrB

Дата(ггммдд)/ Юлианская дата, 2450000+	Визуаль- ный блеск звезды	Длительность экспонирова- ния, с (число экспозиций)	Аппара- тура	Спектр- ральная область, A	Входная щель для I-го варианта, мм	Калиб- ровоч- ные звезды
070801/4314.3	9.3	660 (2)	3	4340-5347		γ CrB
080320/4546.4	13.8	1200 (2) 1260 (3)	"	3722-6183 5608-7908		55 UMa
080606/4624.3	14.2		"	3742-6203 5502-7814		55 UMa
080607/4625.3	14.2		"	3729-6200		41 LMi
080813/ 4692.3	14.5		"	3728-6190		HR5986
080815/4694.3	14.5		"	4062-5101		HR7679
080924/4734.2	14.6		"	3711-6043		γ CrB
090526/4978.4	14.9		"	3542-6018 5593-7895		50 Dra
090826/5070.3	14.8		"	5183-7518 3570-6040		BS7826
121006/6207.2	11.8	7800 (5)	1	5893	0.6	
130503/6416.4	10.8	15000 (10)	"	5893	0.6	
140913...140916/ 6914.4...6917.4	10.4	27300 (16)	2	5893		
140914...140915/ 6914.4...6915.4	10.4	12900 (8)	"	8542		

было равно $S/N \sim 100$ и спадало к краям регистрируемых спектральных участков протяженностью около 2500 \AA . В двух случаях (даты JD ...4314 и ...4694) использовалась решетка $1300''/\text{мм}$, что обеспечило спектральное разрешение около 4 \AA . Рабочий спектральный участок был около 1000 \AA в синей области спектра. Результирующие спектры звезды были скомпонованы из 2-х перекрывающихся участков. Данный вариант позволял выполнить абсолютную калибровку спектров звезды: регистрировались спектрофотометрические стандарты [14-16] по нашей или другим наблюдательным программам в данную ночь.

Редукция результатов наблюдений для всех вариантов проводилась по стандартной методике (коррекция за шумы считывания, плоское поле, темновой шум, свечение ночного неба) с помощью пакета программ и параметров атмосферной экстинкции, используемых в КрАО и предоставленных в наше распоряжение Сергеевым. Обработка эшеле-спектрограмм проводилась с использованием пакета программ DECH20 Галазутдинова. Условия наблюдений представлены в табл.1. Профили линий натрия и кальция в 2014 г., как основные объекты, представляющие для нас интерес в данном исследовании, ввиду отсутствия заметных систематических отличий за данный ряд наблюдений, получены суммированием соответствующих участков спектра за 2-4 даты наблюдений.

3. *Спектр, детали поведения.* Первый наш спектр R CrV в IV-м Большом минимуме получен примерно на 31-е сутки падения блеска при ослаблении блеска Δm на $3^m.3$ (рис.1). В поглощении уверенно

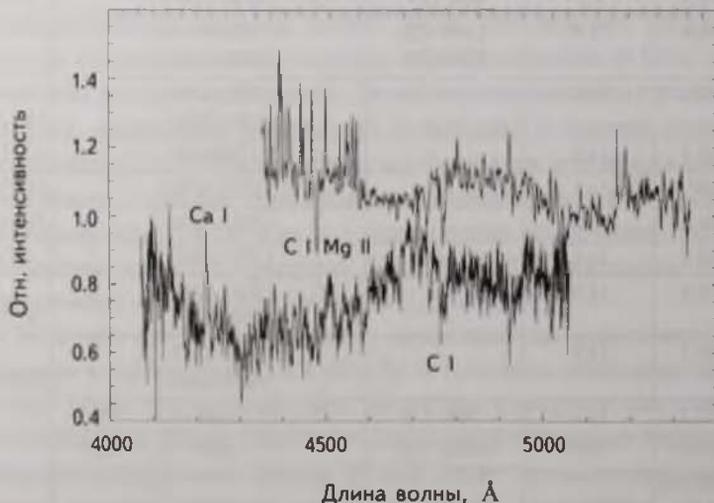


Рис.1. Спектр R CrV на фазе падения блеска, $\Delta m = 3^m.3$ (верхний спектр). Второй спектр (нижняя кривая) - фаза минимального блеска, $\Delta m = 7^m.8$.

выделяются самые "долгоживущие" сильные бленды Mg II $\lambda 4481$ и C I $\lambda 4477 - 4478$ [17], линии углерода C I и полоса Свана молекулы C_2 $\lambda 4737$. Эмиссионный спектр представлен, как обычно, многочисленными линиями Ti II, Sc II, Ba II, еще не достигшими максимумов интенсивности. Следующий спектр с таким же спектральным разрешением, но с худшим отношением сигнал/шум (нижняя кривая на рис.1), примечателен сохранением в поглощении линий углерода. В эмиссии уверенно можно выделить только линию Ca I $\lambda 4226$, она заметна и на спектре с вдвое меньшим спектральным разрешением (рис.2).

На рис.2 представлен относительно-абсолютизированный спектр R CrB, полученный сложением 5 дат наблюдений (JD 2454546, ...4624, ...4692, ...4734, ...4978), которые не имели заметных различий. Для калибровки этого спектра в энергетические единицы достаточно знать блеск звезды в этот промежуток времени. Для сравнения на рис.2 со сдвигом вниз по шкале ординат примерно на 4 порядка показано распределение энергии в спектре R CrB в максимуме блеска по наблюдениям 1976г. [17]. В сравнении с максимумом блеска континуум в диапазоне $\lambda\lambda 4000 - 7500$ стал почти гладким с небольшим отрицательным трендом в длинноволновую сторону, что в разной степени отразилось на показателях цвета звезды (см. первую часть данного исследования). Линейчатый спектр звезды во время наших наблюдений ($\Delta m = 7^m.8$) типичен спектрам и в других глубоких минимумах блеска, например, 1948г. [6], 1977, 1983 и 1985гг. [4,16] и др. Очень интенсивными являются линии гелия He I $\lambda 3889$ и $\lambda 7065$,

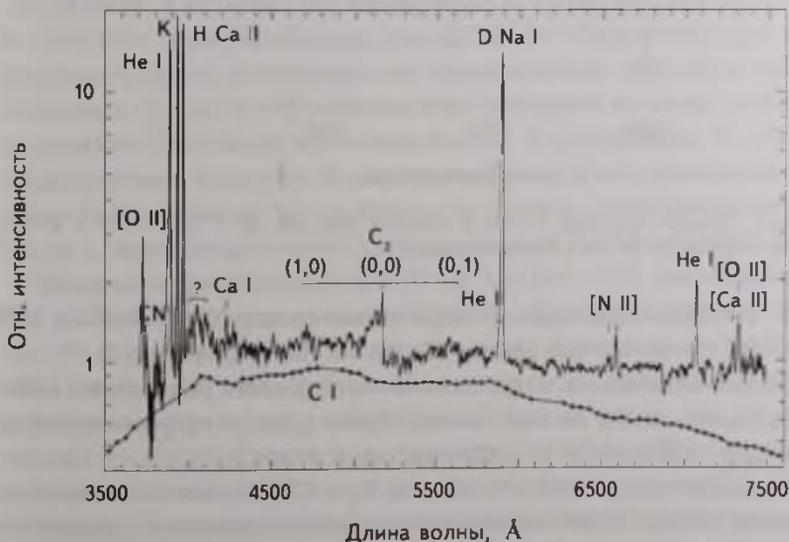


Рис.2. Спектр R CrB усредненный за 5 дат наблюдений в фазе минимального блеска (см. текст). Сплошная линия с точками - спектр R CrB в спокойном состоянии [17].

дублетов кальция H и K Ca II и натрия D Na I. Первая и последние линии на наших спектрах имеют протяженные коротковолновые крылья (рис.3). Протяженность линии He I до $\lambda 3860$ объясняется присутствием эмиссионной полосы молекулы CN $\lambda 3883$, наблюдаемой, начиная с минимума 1948г. [6]. Асимметрия линий дублета натрия обусловлена присутствием эмиссии He I

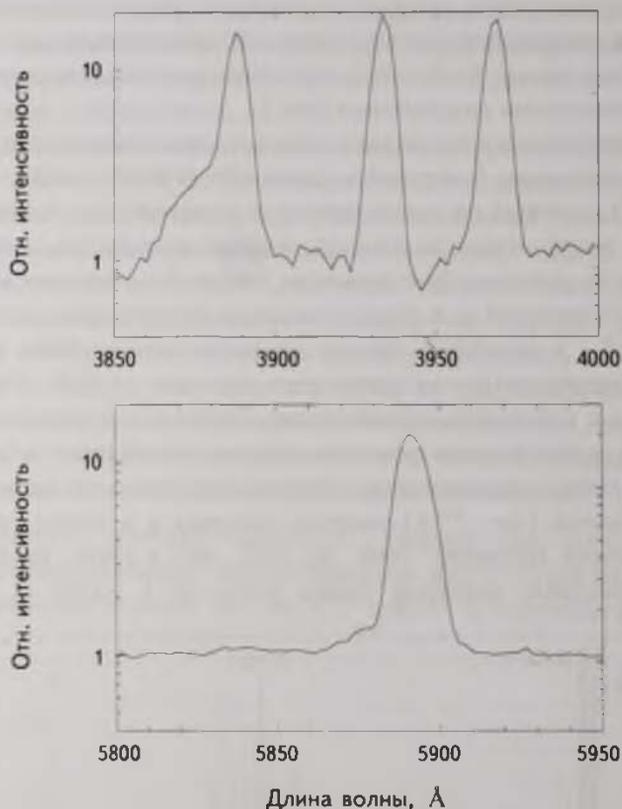


Рис.3. Участки спектров R CrB в областях эмиссий He I $\lambda 3889$, H и K Ca II (верхняя панель) и D Na I (нижняя панель).

$\lambda 5876$. В спектре представлены запрещенные линии: [O II] $\lambda\lambda 3726 - 3729$, 7318-7330, [N II] $\lambda\lambda 6548$, 6548, [Ca II] $\lambda\lambda 7291$, 7324 (табл.2).

Следует отметить, что при низком спектральном разрешении слабые спектральные детали не выделяются. Пример такого эффекта виден при сравнении эмиссии Ca II $\lambda 4226$ на рис.1 и рис.2.

В эмиссии представлены молекулы C_2 и CN. За эмиссионную деталь в области $\lambda\lambda 4000 - 4100$ возможно ответственна эмиссия C_3 , присутствие которой впервые заподозрили у V854 Cen во время глубокого минимума ($\Delta m \approx 6.9$) [5].

Таблица 2

СПИСОК ЭМИССИЙ В СПЕКТРЕ R CrB В ФАЗЕ
МИНИМАЛЬНОГО БЛЕСКА (рис.2)

Элемент, ион, молекула	Длина волны, Å
Ca I	4226
Ca II	3933, 3968
[Ca II]	7291, 7324
He I	3888, 5876, 7065
[N II]	6548, 6584
[O II]	3726, 3729 7318, 7319, 7331
C ₂	4737, 5165, 5636
CN	3883

Запрещенные линии кислорода [OII] $\lambda\lambda$ 3726 – 3729 были зарегистрированы нами в дату JD 2454692 (ранее они не попадали в рабочую область спектрометра), что почти на два года ранее регистрации [10], и присутствовали вплоть до завершения наших соответствующих наблюдений в JD 2455070. Но первая фиксация этих линий произошла на 60 суток ранее при ослаблении блеска около $8^m.4$ [11]. Звезда при таком ослаблении находилась уже около 200 суток (JD 2454430), следовательно, время появления запрещенных эмиссий кислорода можно отнести к промежутку времени между этой датой и датой наблюдений авторов исследования [12] - JD 2454630. Согласно [12], они исчезли к последней дате наблюдений JD 2456199.6 при ослаблении блеска на 6^m . Таким образом общая продолжительность присутствия этих линий достигает 1600 суток; диапазон ослабления блеска $9 \div 6^m$. Эти данные относятся к самой глубокой и продолжительной части минимума блеска. В дальнейшем R CrB стала демонстрировать тенденцию к увеличению блеска, в ходе которого испытала четыре более коротких, но сравнимых по глубине, локальных ослаблений блеска, о запрещенных линиях которых пока нет опубликованных данных.

Впервые запрещенные линии [O II] $\lambda\lambda$ 3726 – 3729 наблюдались у R CrB во время глубокого минимума 1948г. [6] при ослаблении блеска $\Delta m = 7^m.5$, т.е. сразу после наступления фазы минимального блеска, и далее в течение 47 суток (далее наблюдения не проводились) при общей продолжительности фазы минимального блеска около 140 суток. Эта эмиссия предположительно была идентифицирована у V854 Cep во время глубокого минимума 1992г. при ослаблении блеска около $7^m.5$ [5].

Спектры высокого спектрального разрешения в области широких резонансных линий дублета натрия и субординатных линий ИК триплета кальция дают возможность получить представление о движении околозвездного вещества во

время минимума блеска. Перед изучением вопроса о скорости выноса пылевого вещества из окрестностей звезды следует определиться с системой отсчета из-за пульсаций звезды. Здесь воспользуемся результатами [18], согласно которым разное смещение линий высокого и низкого потенциалов возбуждения различных элементов позволило сделать заключение о расширении атмосферы звезды со скоростью не менее 3 км/с, (для уровня образования молекулы C_2 скорость расширения 5 км/с). Положение линий $Na I$ с высоким потенциалом возбуждения авторы интерпретировали как гелиоцентрическую лучевую скорость звезды $+20.5$ км/с. Эмиссия Na , наблюдавшаяся на некоторых фазах пульсаций звезды в спокойном состоянии, имела смещение около -70 км/с относительно фотосферы. В профиле линий поглощения дублета натрия $D1$ и $D2$ $Na I$ в исследовании [18] выделили 4 компонента. Выбрать в таком разнообразии компонентов и скоростей нам помогает присутствие узкой межзвездной линии натрия, стабильность положения которой не вызывает сомнений. Гелиоцентрическая скорость последней -20.5 ± 0.5 км/с [18]. Относительно межзвездной линии компоненты А, В, С звездной линии натрия имеют смещение: $+20(\pm 1.3)$, $36(\pm 2)$, $50(\pm 2)$ км/с. Таким образом скорость звезды относительно межзвездной линии 41 км/с. ИК область наших спектрограмм представлена относительно бедным линейчатым спектром, поэтому здесь в качестве отсчета для оценки величины смещения можно использовать положение крыльев широких субординатных линий ИК триплетка кальция, так как эти части линий образуются в глубоких слоях атмосферы звезды.

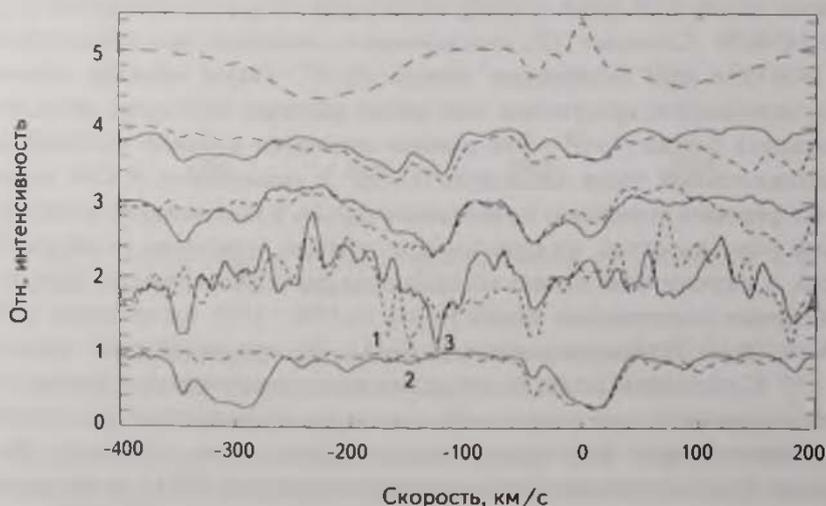


Рис.4. Линии дублета натрия в шкале скорости. Снизу вверх - линии дублета натрия $D1$ (сплошная линия) и $D2$ (штриховая линия) соответственно за JD 2453872 (максимум блеска), ...6207 (ослабление блеска - $5^m.8$), ...6416 ($4^m.8$) и ...6916 ($4^m.4$) ...1205 ($3^m.5$) со сдвигом на +1, +2, +3 и +4 по шкале интенсивности.

Наши спектры (участки спектра около избранных спектральных линий) относятся к фазе выхода звезды из минимума (рис.4). Наибольшее ослабление блеска было на уровне $5^m.8$ для JD 2456207. Дублирование деталей линий дублета натрия позволяет отличить собственно компоненты линий натрия от линий других элементов и сделать некоторые обобщения, особенно при низком уровне полезного сигнала для JD 2456207 (см. описание наблюдательного материала). Возможно, что в первую дату наших наблюдений высокого спектрального разрешения околосветная абсорбция имела три узких компонента 1, 2 и 3 (рис.4). В последнюю дату наших спектральных наблюдений и после повторного ослабления на восходящей ветви кривой блеска JD 2456916 уверенно выделяются два компонента, но более широких, чем в первую дату. Во вторую дату отдельные широкие компоненты сформировали одну широкую линию, интенсивность которой спадала при более высоких скоростях расширения. По крайней мере, общей чертой трех профилей околосветных линий является крутое низкоскоростное крыло и пологое высокоскоростное. Скорости вещества занимают диапазон от 100 до 200 км/с, что не достигает скоростей, достигаемых иногда в минимумах блеска. Например, в 1960г. [7] или в 1999г. максимальное значение было около 300 км/с при среднем значении 225 км/с [19]. На месте звездной линии поглощения находится эмиссия. Ее интенсивность значительно ниже, чем, например, во время минимума 1999г., когда интенсивность мало менялась на протяжении неглубоких минимумов 1998-1999гг. [19]: самый верхний профиль на рис.4. Кроме узкой эмиссии имеется известная широкая эмиссия, присутствие которой можно видеть в первую дату наших наблюдений с высоким спектральным разрешением. Профиль широкой эмиссии (рис.4) сильно искажен сложным профилем широкой околосветной абсорбции. Можно оценить протяженность профиля от +130 до -280 км/с т.е., среднее смещение около -200 км/с. Если сопоставить эту величину со средним смещением околосветной абсорбции, то можно допустить, что источник широкой эмиссии расположен выше области образования широкой абсорбции. Согласно формуле (1) из [19] толщина сферического слоя, в котором образуется широкая эмиссия, составляет примерно 0.23 радиуса экранирующей оболочки.

На рис.5 представлен профиль двух линий инфракрасного триплета Ca II $\lambda 8542$ и $\lambda 8662$ за JD 2456916 при ослаблении блеска звезды на $4^m.4$ (синее крыло последней линии деформировано из-за положения линии на краю спектрального порядка эшеллеграммы). Асимметричность профилей можно интерпретировать как наличием эмиссии со смещением примерно на 13 км/с, так и отличием фаз пульсаций фотосферы звезды и разных слоев ее протяженной атмосферы (см. выше). Первое допущение

подтверждается сопоставимыми интенсивностями эмиссии, полученными вычитанием профиля линии в максимуме блеска [19] из профиля за JD 2456916 (вставка на рис.5), и эмиссии в центре линии в минимуме 1998г. (рис.5). Второй эффект также может иметь место, так как величины смещений находятся в пределах смещений компонентов фотосферных линий натрия (см.выше и [18]). Совмещение профилей линии кальция

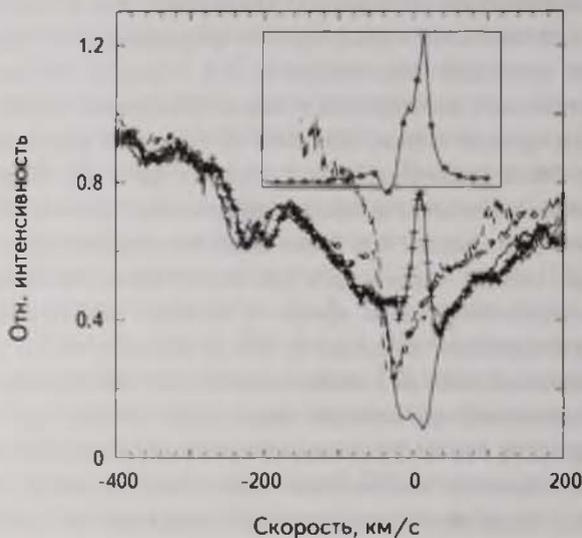


Рис.5. Профили двух линий инфракрасного триплета Ca II $\lambda 8542$ (штриховая линия с кружками) и $\lambda 8662$ (штриховая линия) за JD 2456916 (ослабление блеска $\Delta m \approx 4^m.4$). Сплошная линия - профиль линии $\lambda 8542$ в максимуме блеска JD 2451038 (1998г.), сплошная линия с плюсами - ее профиль в минимуме 1998г. (JD 2451069, $\Delta m \approx 2^m.3$). Во вставке сплошная линия с кружками - "эмиссия" в линии Ca II $\lambda 8542$ (для удобства отображения шкала интенсивности уменьшена в 10 раз и смещена на +0.7).

$\lambda 8542$ для минимумов блеска 1998 и 2014гг. с линией для максимума блеска 1998г. [19] выявило смещение эмиссий +4 км/с для крыльев и +22 км/с для центра эмиссий второго (2007-2015гг.) минимума относительно первого (1998-1999гг.) и зеркальную симметрию их профилей. Околозвездные компоненты у ИК линий кальция не выделяются.

4. *Дискуссия.* При первичном анализе данных наблюдений становится ясным, что спектр при данном минимуме в общих чертах не отличается от предыдущих [1,2]. По мере ослабления блеска звезды ее спектр из абсорбционного трансформируется в эмиссионный (рис.1), что продемонстрировала первая наша спектрограмма (JD 2454314) с известными узкими эмиссиями Ti II, Sc II и др. [4,7,16]. Следующий спектр с таким же спектральным разрешением (JD 2454546) показал тенденцию ослабления узких эмиссий. Низкое спектральное разрешение последующих спектров

в стадии наибольшего ослабления звезды не позволило обнаружить присутствие многочисленных узких эмиссионных линий, всегда наблюдаемых в минимумах блеска (см., например, [16]). Нам были доступны наиболее интенсивные широкие эмиссии, наблюдаемые во время минимумов блеска (D Na I; He I $\lambda 3889$, $\lambda 7065$; H & K Ca II) (рис.2). Область возникновения этих широких эмиссий можно отождествить с пылевыми, перманентной и экранирующей, оболочками [4]. Перманентная оболочка может простираться на значительные расстояния от звезды (до $2''.5$ или 6000 а.е. у V854 Cen [20]). Кинетическая энергия атомов гелия, самых легких и многочисленных частиц в потоке вещества, истекающего со скоростью не менее 200 км/с, достигает 800 эВ, но относительное движение в этом потоке - дрейф пылинок через газ - происходит со скоростью не более 20 км/с [21]. Такая относительная скорость может обеспечить энергию необходимую для ионизации и возбуждения широких эмиссий Ca II и Na I (≤ 6 эВ). Фиксация запрещенных линий иона кислорода [O II] $\lambda\lambda 3727 - 3729$ у R CrV в текущем минимуме ([12], данная работа) на протяжении четырех лет при ослаблении блеска $6 + 9^m$ и в минимуме 1948г. [6], а также у V854 Cen [5] дает нам основание для отнесения этих линий к разряду традиционных деталей глубоких минимумов блеска: отсутствие соответствующей аппаратуры и наблюдений было причиной незнания этого факта. Происхождение этих и других линий, например, [SII] $\lambda 6717$ и $\lambda 6731$ относят к областям околос звездных окрестностей с электронной плотностью не более 10^3 см^{-3} [10,22], т.е. к более удаленным от звезд в отличие от области возникновения запрещенных линий [O II] $\lambda\lambda 7318 - 7330$ с электронной плотностью не более $5 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ [22]. Для возбуждения линий [O II] $\lambda\lambda 3727 - 3729$ необходима энергия менее 4 эВ. Регистрация ультрафиолетовых линий кислорода послужила Хербигу [23] поводом для поиска туманности около R CrV посредством прямых фотографических наблюдений во время наибольшего ослабления ($\Delta m \approx 8^m$) в III Большом минимуме в 1964г., но результат поиска был отрицательным. В работе [10] возможную протяженность этой туманности для R CrV оценили около $0''.59$, что было ниже угловой разрешающей способности аппаратуры во время выполнения наблюдений [23].

В работе [24] приводят поток в эмиссии D Na I в минимумах 1995-1996 и 2003гг. $(1.4 \div 1.7) \pm 0.2 \times 10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Сравнимую величину, $0.7 \times 10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, по нашей оценке имел поток в этой эмиссии в 2008-2009гг., а также в 2001г. на начальном этапе восстановления блеска из минимума 2000г. [25]. Но на стадии выхода из минимума блеска можно отметить уменьшение потока в эмиссионных линиях D Na I (рис.4) до значений около $0.25 \times 10^{-12} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Если обратиться к данным рис.22 из работы [3], то можно сказать, что на стадии восстановления блеска

после минимума блеска 1995-1996гг. также имело место понижение потока в эмиссиях натрия. В текущем минимуме эмиссия в линиях ИК триплета Са II также, по-видимому, уменьшила свою интенсивность: наш единственный профиль линии кальция $\lambda 8542$ на стадии восстановления блеска показывает только деформированное узкой эмиссией длинноволновое крыло центральной абсорбции, тогда как в минимуме 1998г. присутствовала только узкая эмиссия на фоне неискаженных широких абсорбционных крыльев (сообщения о широкой эмиссии в линиях ИК триплета кальция, подобной линиям дублета натрия, отсутствуют). Авторы [10] также отметили уменьшение потока энергии в линиях [N II] в 1.7 раза за два года наблюдений. Такой набор данных позволяет сказать, что поток в эмиссионных линиях натрия у R CrB во время минимума блеска меняется менее порядка величины, тогда как блеск звезды падает более чем на три порядка. Следовательно, экранирующая среда не оказывает существенного влияния на источник эмиссии, который в нашей интерпретации [4,13,26,27] находится в области формирования пылевых, перманентной и экранирующей, околозвездных оболочек. Однако этот вопрос требует более детального рассмотрения, так как эмиссия натрия имеет два компонента: узкий, с полушириной один-два десятка км/с и широкий, с полушириной около двух-трех сотен км/с.

К отличительной черте заключительной фазы текущего IV-го Большого минимума блеска можно отнести факт понижения скоростей движения пылинок во внешние слои звезды, по крайней мере, в сравнении с неглубоким минимумом 1998-1999гг.: разница достигает 1.5 раза. Скорость движения пылевых частиц зависит от двух факторов: светимости звезды и торможения при движении пылинки через газовую составляющую окрестностей звезды [21]. Последовательность экранирующих оболочек, образовавшихся в течение нескольких лет, создает эффект одной непрерывной газопылевой оболочки с внутренним радиусом 1.5-3 радиуса звезды. Это становится ясным, если сделать оценку радиального распределения газопылевых слоев, исходя из факта, что в каждую пульсацию может образоваться новый слой и средняя скорость его движения около 100 км/с: ускорение от 0 км/с до 200 км/с происходит за 40 суток [19], что соизмеримо с периодом пульсаций звезды. При размерах звезды и экранирующей оболочки (табл.3 из I части данного исследования) получаем разделение оболочек около 5% радиуса оболочки. За год образуется не менее 10 экранирующих оболочек, а к началу наших наблюдений высокого спектрального разрешения было образовано более 50-ти таких оболочек.

Остается обратить внимание на наиболее важную характеристику текущего минимума - многолетнюю продолжительность фазы исключительного ослабления блеска звезды, которая в разной степени вырази-

тельности повторяется с цикличностью 46 лет. Ослабление блеска - это образование пыли на луче зрения, а значит каждые 46 лет создаются особые долговременные условия, облегчающие процесс образования пылинок. В связи с этим следует обратить внимание на известные подобные условия. В настоящее время установлено, что процесс конденсации пылинок контролируется пульсациями звезды [28-30]. Но каких-либо трендов в изменении пульсаций перед предстоящим минимумом блеска не обнаружено. Далее можно обратить внимание на роль водорода в переменности типа RCB. Давно было обращено внимание на отсутствие данной переменности у так называемых углеродных звезд с дефицитом водорода - HdC звезд (HD 182040 и несколько подобных звезд), у которых водород находится в большем дефиците, чем у самой R CrB и подобных звезд. Мнение, что для возникновения переменности типа RCB необходим дефицит водорода, привело к поиску эволюционных сценариев возникновения дефицита водорода как причины появления этой уникальной переменности. Но в последние десятилетия переменность типа RCB была обнаружена у V854 Cen и неожиданно на наших глазах развилась у FG Sge. Дефицит водорода у них только намечился. Первая попала в поле зрения исследователей 30 лет назад: не исключено, что это произошло в результате снижения активности процессов пылеобразования, и звезда больше времени стала проводить в максимуме блеска. FG Sge из-за своей уникальной истории развития переменности была объектом постоянного внимания наблюдателей, поэтому первый же минимум блеска типа RCB был хорошо охвачен наблюдениями, как и последующие. FG Sge за 15 лет с момента развития переменности типа RCB в 1992г. приобрела высокую степень активности: практически постоянно находится в состоянии ослабления блеска на 6-9^m [31]. Эти факты были суммированы в работах [32,33]: интервалы времени между последовательными минимумами уменьшаются с уменьшением дефицита водорода. Следовательно, можно говорить, что чем больше водорода, тем более активной будет звезда, большей будет частота минимумов блеска. В результате может возникать состояние длительного ослабления блеска. В детальном исследовании [34] возможных цепочек химических процессов при пылеобразовании водороду отводится важная роль. Теперь возникает вопрос происхождения требуемого циклического увеличения содержания водорода в атмосфере звезды и амплитуды этих увеличений. Аргументом против последнего представления может быть кратность периодов трех циклическостей в долговременной переменности R CrB: (46 лет):(4284 суток):(1100 суток)=16:4:1. Поэтому, возможно существуют и другие причины 46-летней циклическости. Например, на некоторые размышления может подтолкнуть сравнимость длительности 4284-суточного цикла у R CrB и солнечного 11-летнего цикла. В поиске

причин развития переменности типа RCB следует учитывать одну особенность процесса конденсации углеродной пыли: минимумы блеска с небольшим ослаблением ($2-3^m$) происходят менее часто, чем более глубокие [35], и минимумы блеска, которые допускают представление о них как следствие образования единственной экранирующей оболочки, более редкие, чем случаи образования последовательности экранирующих оболочек.

5. Заключение. Исключительная длительность и глубина падения блеска во время IV-го Большого минимума блеска R CrB, начавшегося в 2007г. и продолжающегося до сих пор, никак не отразились на известном, типичном поведении спектра звезды. Если будут найдены какие-либо неизвестные ранее детали, то они скорее будут следствием недостаточности наблюдательного материала, чем следствием уникальности события. Фиксация некоторых ранее редко наблюдаемых спектральных линий, например, запрещенных линий иона кислорода [O II] $\lambda\lambda 3726 - 3729$, обусловлена появлением чувствительных приемников излучения в этом диапазоне спектра. Наши и опубликованные наблюдения позволяют говорить о длительном существовании этих линий: более 1500 суток. Наблюдаемыми они становятся вследствие ослабления излучения звезды экранирующей оболочкой. Нет данных о переменности потока излучения в запрещенных линиях кислорода. Но достаточно данных, чтобы сказать об устойчивом существовании области низкой электронной плотности ($n_e \leq 100 \text{ см}^{-3}$). Скорее всего эта область более удалена от звезды, чем область формирования широких эмиссий, слабеющих в несколько раз в течение минимума.

Критичными для выяснения относительного расположения экранирующей пыли и областей образования широких и узких эмиссий могут быть результаты новой спектрополяриметрии с более высоким спектральным разрешением, чем упомянутые в [2].

В последнее время наши знания о звездах с переменностью типа R Северной Короны существенно детализировались, особенно в результате спектроскопии высокого спектрального разрешения, но ощущается кратковременность этих и других наблюдений, особенно спектрополяриметрии, для получения обобщающих выводов, выявления основополагающих закономерностей. Важно понимать, что мы имеем дело не с переменными типа R Северной Короны, а с феноменом типа R Северной Короны, который возникает у пульсирующих звезд с высоким содержанием углерода при пониженном содержании водорода и с высоким темпом потери массы, что способствует образованию углеводородной пыли в верхних слоях атмосферы звезды. Нам представляется необходимым несколько поменять очередность причин и следствий феномена RCB. Упрощенно это выглядит следующим образом. У звезды с высоким темпом потери массы сначала развивается избыток углерода при пониженном содержании водорода, что

способствует конденсации углеродной пыли в окрестностях звезды. Пульсации создают условия для конденсации пыли на более близких к поверхности звезды расстояниях. По мере потери слоев атмосферы звезды с высоким содержанием водорода переменность типа R Северной Короны угасает: частота и амплитуда минимумов уменьшается. Эту последовательность можно проиллюстрировать следующими звездами: V854 Cen - SU Tau - R CrB - UV Cas - XX Cam. Очень высокая светимость звезды, первоначально считавшаяся необходимым требованием для развития переменности типа RCB, не является обязательным условием. По-видимому, нет неопровержимых аргументов при выборе между двумя модельными подходами, облачной и оболочечной структуры околосредней пылевой среды, при интерпретации минимумов блеска типа RCB. Облачная модель хорошо проработана в серии работ Пугача [36, там же ссылки на предыдущие статьи], расчеты отдельных аспектов переменности провел Ефимов [37]. Интерпретация в рамках одной модели может помочь в решении проблем второй модели: экранирующая оболочка и облако на определенных этапах своего развития мало различимы.

Автор признателен сотрудникам Крымской астрофизической обсерватории С.Сергееву, Т.Тарасовой, С.Назарову за помощь в наблюдениях и предоставленную возможность использования наблюдений звезд-стандартов; С.С. любезно предоставил нам также данные по атмосферной экстинкции в КрАО и пакет программ для обработки спектральных изображений. Автор признателен Г.Галазутдинову за возможность использования программного пакета обработки спектральных данных DECH20 и Т.Кипперу за предоставление участка спектра R CrB в области линий дублета натрия в минимуме 2000г. Это исследование было выполнено с использованием базы данных SIMBAD (Страсбург, Франция).

Главная астрономическая обсерватория, НАН Украины, Киев,
Украина, e-mail: aecos@mao.kiev.ua

THE IV-TH GREAT VISUAL LIGHT MINIMUM OF R CrB. II. SPECTRAL OBSERVATIONS

A.E.ROSENBUSH

Results of spectral observations of the low and high spectral resolution at basic stages a unique long and deep visual light minimum of R CrB at 2007-2015.

The development of the spectrum showed the typical known patterns of changes of line and molecular spectrum: the replacement of the absorption spectrum in the emission. Significant and sustained weakening of the radiation of a star provided registration is rarely observed forbidden emission lines. In particular, the line [OII] $\lambda\lambda 3726-3729$ existed in the period of 1500 days when the star was weakened at $6 \div 9^m$. The remove velocity of dust in circumstellar environs had decreased about 1.5 times from the typical value what has been interpreted as the formation of multilayer circumstellar dust shell with an inner radius of $1.5 \div 3$ stellar radii. It suggests some possible reasons of light minima of R CrB with the duration and the deep of such a minimum 2007-2015.

Key words: *stars: variability of R CrB type: photometry: R CrB*

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Э.Розенбуш, *Астрофизика*, **39**, 145, 1996, (*Astrophysics*, **39**, 78, 1996).
2. G.C.Clayton, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **108**, 225, 1996.
3. N.K.Rao, D.K.Lambert, M.T.Adams et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **310**, 717, 1999.
4. А.Э.Розенбуш, *Астрофизика*, **43**, 587, 2000, (*Astrophysics*, **43**, 435, 2000).
5. N.K.Rao, D.L.Lambert, *Astron. J.*, **105**, 1915, 1993.
6. G.H.Herbig, *Astrophys. J.*, **110**, 143, 1949.
7. C.Payne-Gaposchkin, *Astrophys. J.*, **138**, 320, 1963.
8. D.Kilkenny, F.Marang, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **238**, 1, 1989.
9. G.Gonzalez, D.L.Lambert, G.Wallerstein et al., *Astrophys. J., Suppl. Ser.*, **114**, 133, 1998.
10. N.K.Rao, D.L.Lambert, *Planetary Nebulae: An Eye to the Future*, IAU Symp. No 283, Proceedings of the IAU, **7**, 476, 2012.
11. N.K.Rao, D.L.Lambert, *Recent Advances in Spectroscopy, Astrophysics and Space Science Proceedings*, Eds: R.K.Chaudhuri, M.V.Mekkaden, A.V.Raveendran, A.S.Narayanan, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, **177**, 2010 (astro-ph: arXiv:1002.3433v1).
12. S.B.Howell, T.A.Rector, D.Walter, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **125**, 879, 2013.
13. A.E.Rosenbush, *Astron. Soc. Pacif., Conf. Ser.*, **391**, 39, 2008.
14. А.В.Харитонов, В.М.Терещенко, Л.Н.Князева, *Спектрофотометрический каталог звезд*, Алма-Ата, Наука, 198, 1988.
15. И.Б.Волошина, И.Н.Глушнев, В.Т.Дорошенко и др., *Спектрофотометрия ярких звезд*, М., Наука, 255, 1982.
16. А.Э.Розенбуш, *Кинематика и физика небесных тел*, **2**, 83, 1986.
17. А.Э.Розенбуш, *Астрометрия и Астрофизика*, **38**, 36, 1979.
18. N.K.Rao, D.L.Lambert, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **284**, 489, 1997.

19. *A.Э.Розенбуш*, *Астрофизика*, **44**, 97, 2001, (*Astrophysics*, **44**, 78, 2001).
20. *G.C.Clayton, T.R.Ayres*, *Astrophys. J.*, **560**, 986, 2001.
21. *Yu.A.Fadeyev*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **233**, 65, 1988.
22. *T.Kogure, K.-Ch.Leung*, *Astrophys. Space. Sci. Library*, **342**, 537, 2007.
23. *G.H.Herbig*, *Mem. Soc. Roy. Sci. Liege*, **18**, 353, 1969.
24. *N.K.Rao, D.L.Lambert, M.D.Shetrone*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **370**, 941, 2006.
25. *T.Kipper*, *Inf. Bull. Var. Stars*, **5063**, 1, 2001.
26. *A.E.Rosenbush*, *Astron. Soc. Pacif., Conf. Ser.*, **96**, 91, 1996.
27. *A.E.Rosenbush*, *Kinematics and Phys. Celest. Bodies, Suppl. Ser.*, **3**, 399, 2001.
28. *M.W.Feast*, *Astron. Soc. Pacif., Conf. Ser.*, **96**, 3, 1996.
29. *A.F.Pugach*, *Inf. Bull. Var. Stars*, 1277, 1977.
30. *J.W.Menzies, M.W.Feast*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **285**, 358, 1997.
31. *А.Э.Розенбуш, Ю.С.Ефимов*, *Астрофизика*, **58**, 57, 2015, (*Astrophysics*, **58**, 46, 2015).
32. *J.Jurcsik*, *Astron. Soc. Pacif., Conf. Ser.*, **96**, 96, 1996.
33. *J.Jurcsik*, *Acta Astron.*, **46**, 325, 1996.
34. *A.Goeres*, *Astron. Soc. Pacif., Conf. Ser.*, **96**, 69, 1996.
35. *A.E.Rosenbush*, *Hydrogen Deficient Stars and Related Objects, IAU Coll.* **87**, 173, 1986.
36. *А.Ф.Пугач, Г.У.Ковальчук*, *Астрон. ж.*, **71**, 250, 1994.
37. *Ю.С.Ефимов*, *Астрон. ж.*, **67**, 494, 1990.

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice. The text also mentions the need for regular audits to ensure the integrity of the financial data. Furthermore, it highlights the role of the accounting department in providing timely and accurate information to management for decision-making purposes.

In addition, the document outlines the procedures for handling discrepancies and errors. It states that any identified mistakes should be investigated immediately and corrected. The text also discusses the importance of maintaining confidentiality of financial information and the need for strict access controls. Moreover, it mentions the requirement for all employees to adhere to the company's financial policies and procedures. The document concludes by stating that the goal is to ensure the highest level of transparency and accountability in all financial activities.

The second part of the document provides a detailed overview of the company's financial performance over the past year. It includes a summary of key financial indicators such as revenue, profit, and expenses. The text also discusses the company's financial strategy and the measures taken to improve its financial health. Furthermore, it mentions the company's commitment to sustainable growth and the importance of investing in research and development. The document concludes by stating that the company is confident in its ability to achieve its long-term financial goals.