

## IV-Й БОЛЬШОЙ МИНИМУМ ВИЗУАЛЬНОГО БЛЕСКА R CrB. I. UVVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub> ФОТОМЕТРИЯ

А.Э.РОЗЕНБУШ

Поступила 28 октября 2015

Принята к печати 23 марта 2016

Представлены результаты UVVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub> фотометрии R CrB в минимуме визуального блеска 2007-2015гг. Уникальная длительность (более 8 лет) и глубина ослабления блеска (9<sup>m</sup>) не изменили типичного поведения показателей цвета: уменьшения показателей цвета на стадии падения блеска и их увеличения при временном увеличении блеска на интервале JD 2454500-2454600. Волновая зависимость амплитуды увеличения блеска в этот эпизод временного увеличения блеска имеет типичный характер: увеличение блеска 0<sup>m</sup>.7 в полосе i<sub>c</sub> соответствовало 0<sup>m</sup>.1 в полосе b. Текущий минимум блеска интерпретируется как проявление 46-летней цикличности в активности R CrB, дополняющей известные 4284 и 1200-суточные цикличности. IV-й Большой минимум блеска, как и любой другой минимум, интерпретируется как следствие образования последовательности экранирующих оболочек.

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

1. **Введение.** Звезда R Северной Короны (R CrB) обладает уникальной переменностью и уже более 200 лет приковывает к себе внимание исследователей [1,2]. Она стала прототипом небольшой (до сотни членов) группы звезд с переменностью типа R Северной Короны (RCB). Основная отличительная черта данного типа переменности - временные ослабления визуального блеска характерной формы - минимумы блеска, прерывающие длительное "спокойное" состояние максимального блеска. Глубина варьирует от 0.5 до 8<sup>m</sup>. Характерное время длительности минимума блеска - до сотни и более суток; но иногда длительность минимума превышает тысячи суток, как, например, один такой минимум начался в 1962г. и закончился в 1967г. В спокойном состоянии - максимуме блеска - звезда показывает полуправильную мультипериодичность с характерными временами 30-60 суток [3]. Минимумы блеска сопровождаются радикальным изменением практически всех наблюдаемых характеристик с последующим восстановлением исходных параметров. Например, радикальное изменение спектра приводит к радикальному изменению показателей цвета: трансформация чисто абсорбционного спектра в полностью эмиссионный создает эффект поголубения, т.е. уменьшения показателей цвета звезды [1,4]. Причиной минимумов визуального блеска является образование на луче зрения слоя

пылевого вещества и последующее его рассеяние в околозвездное пространство. В инфракрасной (ИК) области спектра присутствует переменный ИК избыток с эффективной температурой  $T_e$  около 700 К, который обусловлен околозвездной углеродно-пылевой оболочкой и который не связан с минимумом блеска. Но через сотню суток после начала минимума визуального блеска ИК блеск показывает временное увеличение на несколько десятых звездной величины из-за притока пылевого вещества, вызвавшего протекающий или уже завершившийся минимум [1,5,6]. Благодаря своей яркости, а блеск звезды в спокойном состоянии варьирует около 6 визуальной звездной величины, R CrB продолжает оставаться основным источником наших знаний о переменности типа RCB.

В 30-е годы XX в. наблюдения дали два результата. Значимость одного увеличивается до настоящего времени, в то время как второй временами подвергается сомнению, но остается одной из основ наиболее распространенной модели переменности у звезд типа RCB - модели затмения центральной звезды облаком пыли [7,8]. Первый из этих двух результатов касается обнаружения полуправильных колебаний блеска у RY Sgr в спокойном состоянии [9]. Затем было обнаружено, что эти пульсации блеска являются спусковым механизмом как для начала минимума визуального блеска [10], так и для его завершения [8,11]. Второй результат 30-х годов XX в. - последовательность минимумов визуального блеска у R CrB представляет собой идеальный неправильный процесс [12]. Необходимость примирить эти два противоречивых результата постоянно создает сложности при интерпретации переменности типа R Северной Короны в рамках модели облака [8]. Результат Sterne [12] доминировал при попытках поиска периодичностей в следовании минимумов визуального блеска у звезд с переменностью типа RCB и редкие положительные результаты этого поиска [13] не принимались во внимание при интерпретации феномена RCB. В ряде наших исследований этого вопроса было высказано допущение существования 4400-суточной цикличности в следовании минимумов блеска у R CrB [1,14-16], последнее уточнение этого значения  $4284 \pm 140$  суток [17]. В 1997г. в исследовании [15] было высказано предположение, что в следующем, VII-м цикле с началом в 2007-2008гг. [16] может произойти "четвертый большой минимум". В исследовании [18] нашли подобный 4342-суточный период в ИК диапазоне, а также период 1206 суток, который скорее всего эквивалентен известному 1100-суточному периоду [19].

После начала в 2007г. нового минимума блеска R CrB нам представляется возможным более уверенно говорить о существовании нескольких цикличностей в переменности этого прототипа уникальной группы звезд. Минимум 2007г. означает начало как нового 4284-суточного цикла

активности, так и начало очередного, IV-го Большого минимума блеска R CrB, как следствия 46-летнего цикла активности [13], для которого автор в своем коротком исследовании не связала конкретные события с этой цикличностью.

К моменту написания данной работы имеются три публикации по исследованию текущего минимума блеска R CrB, одна из них [20] посвящена фотометрии. Исследована переменность блеска в течение 2-3 часов по данным наблюдений за 5 ночей в апреле-мае 2009г.: какой-либо определенной переменности обнаружено не было. Две другие касаются исследований спектра звезды.

В данном исследовании представлена фотометрия и спектрометрия R CrB на некоторых этапах уникального минимума блеска, начавшегося в 2007г. и продолжающегося по настоящее время. В I-й части описана фотометрия в период наибольшего ослабления блеска R CrB в 2007-2009гг., во II-й части описана спектроскопия в этот период (низкого спектрального разрешения) и некоторых этапах восстановления блеска (высокого спектрального разрешения). Будет обосновано наименование минимума 2007-2015гг. как IV-го Большого минимума визуального блеска R CrB. Мы проанализируем минимум визуального блеска R CrB 2007-2015гг. с точки зрения модели оболочки: минимум блеска обусловлен образованием сферической пылевой оболочки в верхних слоях атмосферы звезды [17].

2. *Наблюдения.* Фотометрия R CrB была выполнена в 2007-2009гг. на 1-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории (КрАО), расположенном на горе Кошка вблизи Симеиза и оснащенном ПЗС камерой Aropsee Alta U42 (2k×2k, размер пикселя 13.5×13.5 мм<sup>2</sup> или 0.21"/пиксель) с набором стандартных  $UBVR_cI_c$  фильтров [21]. Фотометрические условия в месте наблюдений не являются удачными и стабильными для получения высококачественных данных [22]. Это обстоятельство определило необходимость получения нескольких кадров в каждом фильтре и выбора соответствующего режима камеры: ячейки матрицы объединялись (binning) в режимах 2×2 пикселя или 3×3 пикселя. Последняя операция одновременно увеличивала чувствительность аппаратуры. Длительность экспозиции варьировала в диапазоне 10-240 секунд. Наблюдения и их редукция выполнены с помощью пакета программ MaxIm DL4. Применение стандартной процедуры редукции изображений позволило достичь предельных звездных величин на уровне отношения сигнал/шум  $S/N \sim 1$  в полосе  $U \sim 16^m.5$  для экспозиций 240с,  $B \sim 18^m.5$  для экспозиций 120с и  $V \sim 20-21^m$  для экспозиций 120с при размере изображений около 1.5-2". Для звезд окрестностей (рис.1, табл.1) была проведена привязка к стандартам в экваториальных площадках SA [23]. Сравнительно невысокая результи-

рующая точность в табл.1 обусловлена ошибками учета атмосферной экстинкции (разница воздушных масс области переменной и стандартных площадок SA достигала значения 0.4) и трансформацией инструментальной системы фотометра в стандартную. Точность фотометрии звезд сравнения (табл.1) также характеризует точность фотометрии переменной (табл.2), так как выбор условий наблюдений минимизировал вклад внешних ошибок. Фотометрию переменной мы не приводили к стандартной системе, так как



Рис.1. Звезды сравнения (табл.1) в окрестностях R CrB. Сторона карты 14 угловых минут, север вверху.

Таблица 1

UBVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub> ВЕЛИЧИНЫ ЗВЕЗД ОКРЕСТНОСТЕЙ R CrB

Звезда	UCAC4 [24]	U ±σ	B ±σ	V ±σ	R <sub>c</sub> ±σ	I <sub>c</sub> ±σ
1	592-054134	13.049 .143	12.888 .040	12.208 .046	11.809 .025	11.386 .034
2	591-054838	13.524 .142	13.430 .045	12.819 .031	12.502 .095	12.095 .042
3	592-054149	13.981 .160	13.924 .091	13.389 .032	13.066 .031	12.700 .037
4	592-054141	15.586 .239	15.636 .098	15.123 .040	14.826 .052	14.409 .046
5	591-054832	-	17.265 .148	16.481 .056	16.045 .097	15.604 .050
6	592-054139	-	16.972 .166	16.268 .136	15.861 .158	15.528 .097
7	591-054839	-	17.269 .208	16.281 .073	15.774 .076	15.238 .060

Таблица 2

ФОТОМЕТРИЯ R CrV В ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ  
ПОЛОСАХ  $ubvr_{i_c}$

Юлианская дата, JD 2450000+	$u$	$b$	$v$	$r_c$	$i_c$
1	2	3	4	5	6
4418.17	-	14.345	13.768	13.269	12.254
4426.14	-	14.361	13.785	13.401	12.300
4439.66	-	-	13.857	13.443	12.398
4447.66	-	14.268	13.868	13.457	12.442
4450.66	13.940	14.371	13.868	13.465	12.447
4453.65	14.072	14.486	13.874	13.479	12.413
4502.57	13.963	14.578	14.009	13.618	12.619
4503.55	13.990	14.623	14.036	13.608	12.632
4507.62	-	14.543	14.011	13.640	12.597
4511.60	14.053	14.633	14.026	13.650	12.605
4524.55	14.062	14.587	14.028	13.530	12.446
4525.55	14.036	14.588	13.986	13.517	12.417
4534.57	-	14.541	13.732	13.103	12.038
4535.49	14.051	14.523	13.702	13.050	11.956
4537.53	14.002	14.575	13.688	13.048	11.935
4541.63	-	14.584	13.757	13.085	11.971
4573.35	-	14.679	14.246	13.761	12.805
4574.28	14.144	14.645	14.237	13.751	12.763
4576.37	14.213	14.680	14.240	13.791	12.813
4577.52	14.170	14.699	14.219	13.799	12.838
4582.42	14.420	14.756	14.246	13.840	12.893
4600.28	14.172	14.754	14.251	13.894	12.936
4602.28	14.237	14.787	14.275	13.884	12.924
4603.32	14.205	14.736	14.291	13.884	12.928
4604.29	14.092	14.758	-	13.888	12.926
4605.29	14.164	14.776	14.140	13.789	12.933
4606.30	14.093	14.738	14.129	13.878	12.926
4609.32	-	14.695	14.136	-	-
4611.34	14.296	14.785	14.143	13.859	12.973
4613.31	-	14.831	14.144	13.929	13.006
4616.28	14.328	14.833	14.188	13.940	13.056
4629.32	14.474	14.842	14.285	13.959	13.040
4630.37	-	14.534	14.162	14.113	13.018
4774.18	14.282	14.934	14.440	14.296	13.489
4815.67	14.660	15.085	14.705	14.361	13.690
4925.42	14.774	15.289	14.886	14.718	13.981
4927.44	14.878	15.567	15.096	14.737	14.018
4929.50	14.907	15.680	15.111	14.764	14.002
4956.35	14.635	15.501	15.054	14.699	13.676
4957.45	14.823	15.505	15.013	14.684	14.005
4967.31	-	15.276	14.952	14.668	14.063
4968.48	14.924	15.454	14.904	14.671	13.892
4969.36	15.032	15.456	14.924	14.623	13.892
4970.32	14.760	15.447	14.925	14.623	13.912

Таблица 2 (окончание)

1	2	3	4	5	6
4971.36	15.056	15.447	14.927	14.548	13.897
4973.32	14.765	15.422	14.906	14.623	13.871
4974.36	14.949	15.423	14.809	14.766	13.881
4975.32	14.646	15.445	14.899	14.582	13.862
4976.37	14.814	15.514	14.903	14.488	13.672
4989.30	14.941	15.417	14.889	14.490	13.834
4990.31	14.873	15.357	14.833	14.413	13.820
4991.39	15.091	15.468	14.892	14.588	13.842
4992.32	14.668	15.404	14.867	14.546	13.900
4993.36	14.831	15.401	14.890	14.605	13.888
4994.39	14.863	15.461	14.896	14.499	13.843
4995.32	14.742	15.441	14.902	14.495	13.853
4996.32	14.680	15.394	14.928	14.546	13.903
4997.31	14.930	15.458	14.878	14.544	13.903
4998.32	14.866	15.371	14.893	14.504	13.910
4999.37	14.725	15.417	14.849	14.484	13.858
5001.30	14.974	15.420	14.919	14.417	13.913
5002.32	14.769	15.420	14.757	14.345	13.750
5003.35	15.000	15.478	14.752	14.560	13.890
5004.31	14.744	15.406	14.911	14.378	13.916
5005.31	14.775	15.468	14.985	14.515	13.892
5006.30	14.826	15.445	14.905	14.518	13.856

ввиду трансформации спектра звезды из абсорбционного во время максимума блеска в эмиссионный спектр в минимуме блеска эта процедура является не вполне корректной.

В окрестностях переменной имеется обширная фотометрия слабых звезд поля [20], где звезда №23 ( $U=17^m.480$ ,  $B=17^m.193$ ,  $V=16^m.432$ ,  $R=16^m.020$ ,  $I=15^m.603$ ) идентична нашей звезде №5 (табл.1). Фотометрические системы совпадают, так как имеют общие исходные данные [23].

3. *Фотометрическое поведение.* Текущий минимум блеска начался в середине 2007г. и продолжается уже более 8 лет. Наша фотометрия охватила 600-суточный интервал времени (рис.2). Блеск звезды за это время продемонстрировал тренд на ослабление с амплитудой  $1^m.2$  и достиг самого большого зарегистрированного ослабления на  $9^m$  против известного на  $8^m$ , показав единственное временное увеличение блеска на  $0^m.3$ . Дальнейшее поведение можно охарактеризовать наличием общего тренда на восстановление нормального блеска с временными, но длительными и значительными ослаблениями. Глубина около  $9^m$  и длительность более 8 лет являются уникальным отличием данного минимума блеска от многих известных и позволяют охарактеризовать его большим минимумом. На

рис.3 представлены вариации показателей цвета R CrB в начале фазы минимального блеска, которые имели тренды разной амплитуды на уменьшение своих значений. Общее поведение показателей цвета характерно

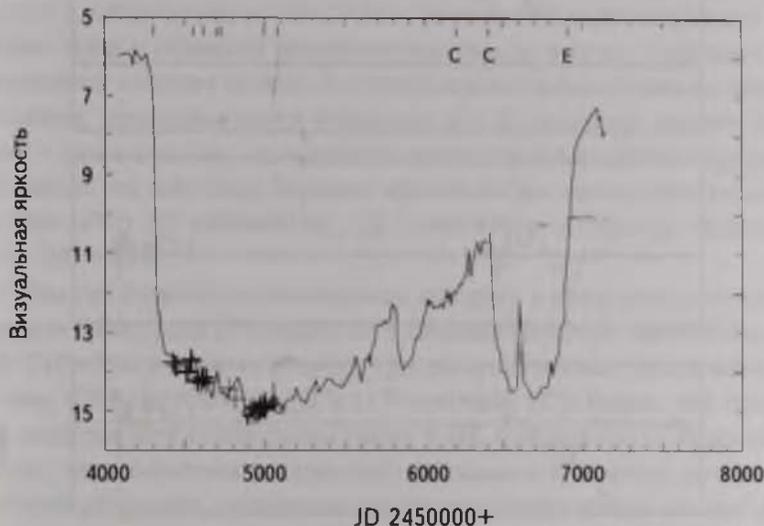


Рис.2. Кривая визуального блеска R CrB в IV-м Большом минимуме. Сплошная линия - усредненные данные наблюдателей AAVSO, плюсы - данные табл.2, кружки - данные [20]. Вертикальные линии в верхней части - моменты наших спектральных наблюдений (см. II-ю часть данной публикации) (C - Куде-спектрограф, E - Эшеле-спектрограф, остальные - спектрометр SPEM).

для стадии уменьшения блеска во время минимума: при уменьшении блеска звезды показатели цвета уменьшаются, т.е. становятся более голубыми. Временное увеличение блеска в период JD 2454500-2454580 сопровождалось типичным временным увеличением (покраснением) трех показателей цвета кроме  $u-b$ . Такое поведение можно расценивать как начало выхода звезды из локального минимума блеска: начало восстановления нормального состояния в первую очередь проявляется большей амплитудой увеличения блеска в ближней ИК области спектра, в частности, в полосе  $I_c$  [25]. Амплитуда увеличения блеска  $i_c$  достигла  $0^m.7$  против  $0^m.1$  для блеска  $b$  (табл.2). Отличия показателей цвета от нормальных значений (рис.3) во время наших наблюдений обусловлены, по крайней мере, двумя причинами. Во-первых, волновая зависимость экстинкции в экранирующем веществе привела к изменению в распределении энергии в спектре звезды; во-вторых, присутствие интенсивных эмиссий He I и Ca II в ультрафиолетовой области спектра также уменьшит на  $0.1-0^m.2$  соответствующий показатель цвета  $u-b$  (см. рис.2 во второй части данного исследования).

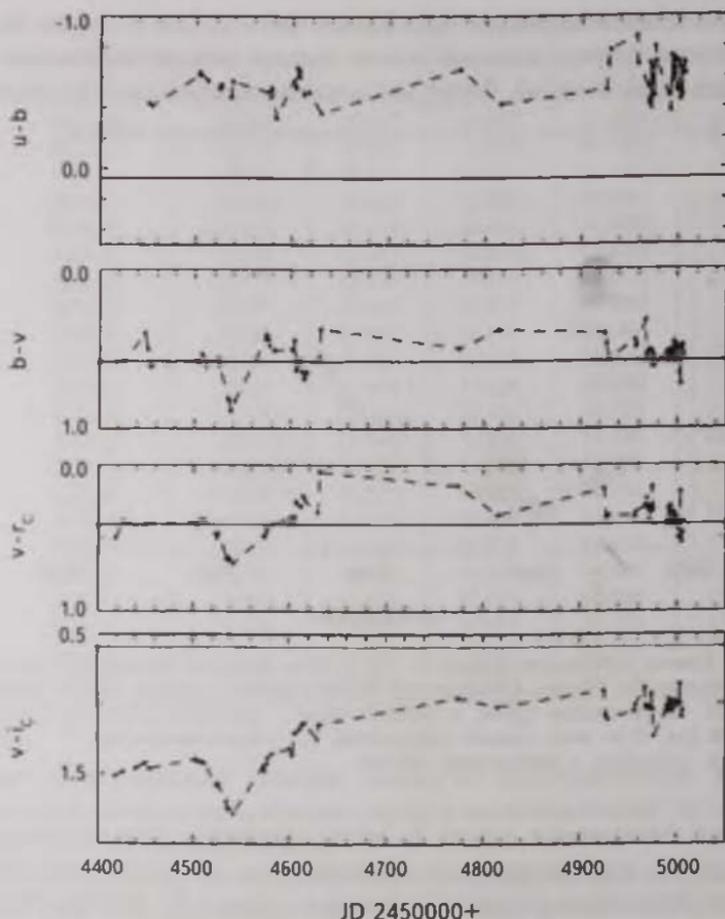


Рис.3. Вариации показателей цвета  $u-b$ ,  $b-v$ ,  $v-r_c$ ,  $v-i_c$  (сверху вниз) R CrB в фазе минимального блеска. Горизонтальные линии на каждой панели - средние уровни показателей цвета в максимуме блеска.

4. *Дискуссия.* При первичном анализе данных наблюдений становится ясным, что данный минимум общими трендами в фотометрическом поведении не отличается от предыдущих. Исключение составляют продолжительность и глубина ослабления блеска в этом минимуме: не менее 8 лет и  $9^m$ , соответственно. Просмотр исторической кривой блеска R CrB (см., например, базу данных AAVSO, для более ранних эпох [26]) позволяет увидеть еще несколько подобных минимумов. Ранее [5,15] уже обращалось внимание на подобные большие минимумы блеска в 1863-1873гг., 1962-1968гг. и менее выраженный "большой" минимум 1908-1912гг. Нами было предложено связать эти большие минимумы с 46-летней цикличностью в активности

R CrB, которую нашла Хрузина [13] в результате анализа исторической кривой блеска, но, к сожалению, не представила идентификацию с деталями кривой блеска. Еще один возможный большой минимум попадает на пробел в наблюдениях в 1819-1844гг. Этот пробел в кривой блеска связан скорее всего с сезонной невидимостью звезды в лучах Солнца во время соединения в ноябре месяце, а в этот интервал времени начался очередной минимум, продолжавшийся несколько лет. В результате интерес к звезде упал и она выпала из поля зрения наблюдателей до 1844г. Для удобства обозначим эти известные Большие минимумы последовательно по времени: I - 1863-1873гг., II - 1908-1912гг., III - 1962-1967гг. и, наконец, современный IV - 2007-2015гг.

Нам представляется возможным говорить в утвердительной форме о существовании ряда регулярностей в следовании/начале минимумов блеска у R CrB. Это в первую очередь три долговременных цикличности: 46-летняя, 4284-суточная [15,16] и 1170-суточная [27]. Важно, что последние две цикличности обнаружены также в ИК блеске [18,19]. Вариации ИК блеска, что тождественно вариациям светимости или массы околосредной пылевой оболочки, отображают вариации темпа потери массы звездой, поэтому допустимо говорить, что многолетние цикличности отображают вариации темпа потери массы. В связи с этим следует обратить внимание на интересную особенность 1206-суточной периодичности (см. рис.2 в работе [18]): имеется уровень блеска  $L \approx 2^m.5$ , выше которого блеск звезды не поднимается на фазах около 0 и 1 и не опускается ниже на фазах около 0.5. Но в основе этой потери массы находятся пульсации самой звезды. Пульсации способствуют потере массы звездой. Пульсации также контролируют минимумы визуального блеска: начало и завершение минимума управляются пульсациями звезды [7,8,10,11,28,29]. Ослабление блеска начинается после максимума блеска в пульсации; восстановление - после минимума блеска в пульсации. Но, если учесть, что пылинки начинают свой рост за 10-20 суток до того, как они обнаруживают себя ростом поглощения в визуальной области спектра [1,4], то становится ясным, что условия для образования пылинок создаются в минимуме блеска звезды в пульсации. Фаза минимума блеска в пульсации несколько опережает фазу максимального радиуса звезды (этот вывод можно сделать, если проанализировать данные по лучевым скоростям для RY Sgr из обширного исследования [30]). По-видимому, процессы образования и разрушения пылинок запускаются на одной фазе пульсаций звезды близко соответствующей максимальному радиусу звезды.

В исследовании [31] было обосновано представление о минимуме визуального блеска у звезды с переменностью типа RCB с кривой блеска любой формы как суперпозиции нескольких независимых эпизодов

образования на луче зрения и последующего рассеяния ряда пылевых слоев, описываемых идеализированной кривой блеска и представляемой несложной аналитической формулой. Это представление сохраняется и для Большого минимума и не требует каких-либо условий, дополнительных к [31].

Применение результата [31] по аналитическому представлению кривой блеска во время минимума к кривой блеска на рис.2 не вызывает трудностей. Для аналитического представления минимума блеска достаточно всего два параметра: максимальной оптической толщины образующегося пылевого слоя и длительности падения блеска от нормального уровня до максимального значения в данном эпизоде. Другими словами можно сказать, что после достижения точки экстремума, все дальнейшее поведение блеска почти точно следует расчетной кривой. На рис.4 приведен вариант такого представления. Выбор вариантов представления ограничен при соблюдении условий из [31], одним из которых является возможность образования нового поглощающего слоя в одну из последующих пульсаций: первую, вторую и т.д. Для R CrV характерна мультипериодичность пульсаций: около 53, 40 и 27 суток [3], что создает некоторую неопределенность в выборе временного параметра. В результате аппроксимаций получается набор параметров, численно не выходящих за пределы наблюдаемых

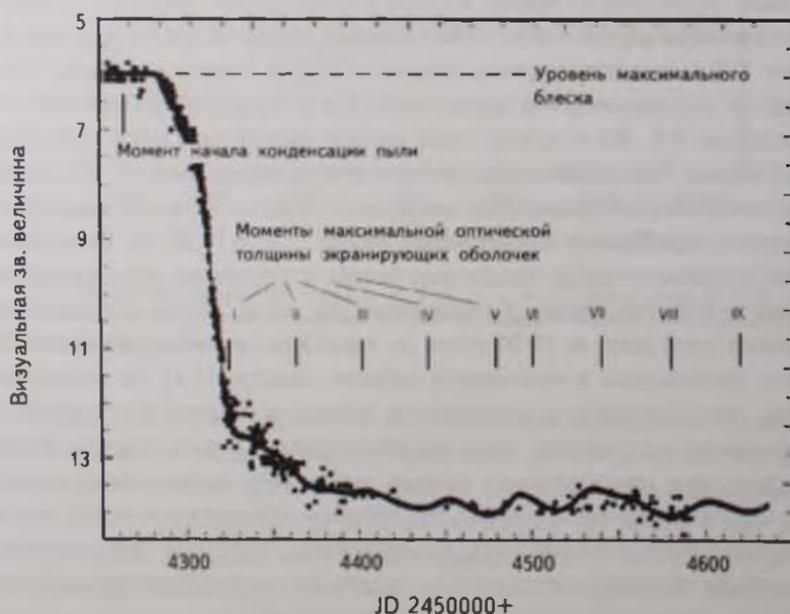


Рис.4. Вариант аналитического представления кривой блеска R CrV в начальной стадии текущего минимума блеска. Точки - данные наблюдателей AAVSO, вертикальные линии - моменты минимального блеска в отдельном эпизоде (с I-го до IX-го) образования пылевого слоя. Отмечено время начала процесса конденсации пыли в I-м эпизоде.

значений. Это упрощенное формальное представление оправдано своей простотой, так как форма кривой блеска во время минимума блеска находила объяснение, даже исходя из достаточно простых физических представлений [32]. Авторы [33] не видели большой проблемы в представлении кривой блеска звезды в фазах падения и восстановления блеска, кроме фазы минимального блеска, так как она часто имеет значительную длительность. Аппроксимации [33] кривой блеска на выходе из минимума позволили получить оценки скорости движения пылевой среды во внешние слои: 124 и 242 км/с. Эти значения близки к наблюдаемым значениям скоростей (200-300 км/с), ассоциируемых с околосредной средой, которая формируется во время минимума блеска (см. обзоры [1,2]).

4.1. *Что же происходит в окрестностях звезды во время минимума визуального блеска?* Описанные выше некоторые моменты развития Большого минимума, как и любого другого минимума, можно последовательно изложить, основываясь на серии публикаций, начиная с краткой констатации ряда наблюдательных фактов в 1984г. [6]. Для определенности опишем минимум в применении к самой R CrB (табл.3). Для других звезд следует учесть отличие определяющих характеристик (светимости, температуры, пульсаций и т.п.). Некоторые нижеприведенные физические параметры применительно к околосредной среде были получены без привлечения модельных расчетов, но в основу наших рассуждений

Таблица 3

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ R CrB. СОБСТВЕННО ЗВЕЗДЫ [1,2],  
ОКОЛОЗВЕЗДНЫХ ОБОЛОЧЕК - ПОСТОЯННО  
СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ПЕРМАНЕНТНОЙ И ВРЕМЕННО  
СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ЭКРАНИРУЮЩЕЙ, ОТВЕТСТВЕННОЙ ЗА  
МИНИМУМ ВИЗУАЛЬНОГО БЛЕСКА

Параметр	Звезда	Экранирующая оболочка	Перманентная оболочка
Масса, в единицах массы Солнца $M_{\odot}$	0.7-0.9	$10^{-7}$	$10^{-6}$ [5]
Болометрическая светимость, $\log L_{st} / L_{\odot}$	4.2	$\leq 0.4 L_{st}$	$0.4 L_{st}$
Эффективная температура, К	6750-7250	700-900	700-900
Радиус, $R_{\odot}$	90	$(4 \div 10) \times 90$	$26 \times 90$ [34]
Темп потери массы, $M_{\odot}$ /год		$10^{-6}$	
Скорость звездного ветра, км/с	$0 \div 10$	$\sim 25 \div 250$	$\sim 25 \div 300$ [5,17,35,36]
Оптическая толщина		$< 9$	$< 0.07-0.16$ [37]

помещено представление о сферической оболочке.

Структура звезды вне и во время минимума представлена на рис.5. В состоянии максимума блеска звезда имеет зону "1", которая простирается от фотосферы звезды до основания перманентной оболочки. Во время минимума блеска появляется экранирующая оболочка, которая разбивает зону "1" на две части: "1" и "2". По мере развития минимума блеска экранирующая оболочка увеличивает свой радиус и таким образом зона "2" трансформируется в зону "1".

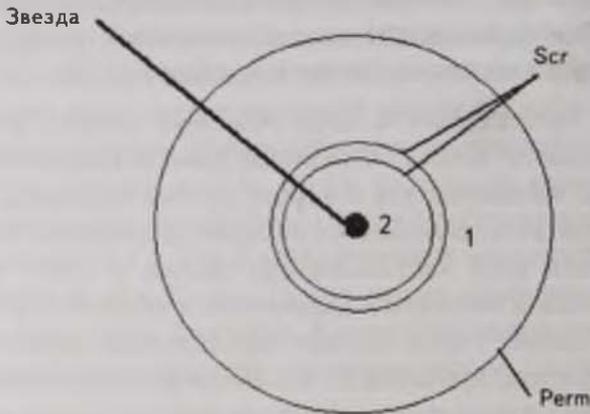


Рис.5. Схематическое представление структуры околзвездных окрестностей звезды (star) с переменностью типа RCB в спокойном состоянии и во время минимума блеска (см. текст). Scr - нижняя и верхняя границы экранирующей оболочки, Perm - нижняя граница перманентной оболочки, 1 и 2 - внутренние зоны перманентной и экранирующих оболочек, соответственно.

Наличие пульсаций [38] способствует потере массы [39, 40] с высоким темпом около  $10^{-6} M_{\odot}$  (см. для ссылок [2,17]). Скорость истечения вещества может достигать 10 км/с на уровне фотосферы и затем увеличивается до 25 км/с в основании перманентной оболочки, что обеспечивает уширение узких эмиссий, которые иногда наблюдаются вне минимума блеска и очень интенсивны в первой половине минимума блеска. В этом потоке вещества на расстоянии  $\geq 20$  радиусов звезды происходит конденсация пыли [41]: формируется перманентная оболочка. Последняя проявляет себя в ИК диапазоне спектра с 4342-суточной цикличностью [18]. Иногда пульсации звезды создают условия для конденсации пыли на уровне 1.5-3 радиусов звезды [42]. С этого момента собственно и начинается образование сферической экранирующей пылевой оболочки, т.е. начинается минимум визуального блеска.

Связь пульсаций звезды и двух основных фаз минимума блеска - (1) начала падения блеска или начала процесса конденсации пыли и (2)

начала восстановления блеска или прекращение процесса конденсации пыли - позволяет предложить следующее упрощенное описание развития минимума блеска. Минимум блеска - это конкуренция первого и второго процессов. Состояние минимального блеска - равновесие этих двух процессов. Начало процесса разрушения пылинок можно отнести к средней части ветви падения блеска, а завершение процесса конденсации пылинок с серединой ветви восстановления блеска.

Этот процесс конденсации пыли начинается за 10-20 суток до первых признаков падения визуального блеска, т.е. в фазе минимума пульсации блеска или при максимальном радиусе звезды. Зародыши пылинок с размерами менее 0.003 мкм практически не проявляют себя в визуальном диапазоне [43], но обнаруживают себя появлением ИК избытка [1]. Развитие этого избытка крайне сложно проследить ввиду первоначально низкой его светимости [44], которая только спустя сотню суток становится заметной на фоне ИК избытка от перманентной оболочки [5,6]. Механизм, создающий эти условия для конденсации пыли в экранирующей оболочке, имеет 4284-суточную цикличность. Близость двух значений, 4284 и 4342 суток, означает, что эти две цикличности являются фактически одной цикличностью, но которая проявляется на разных уровнях атмосферы и

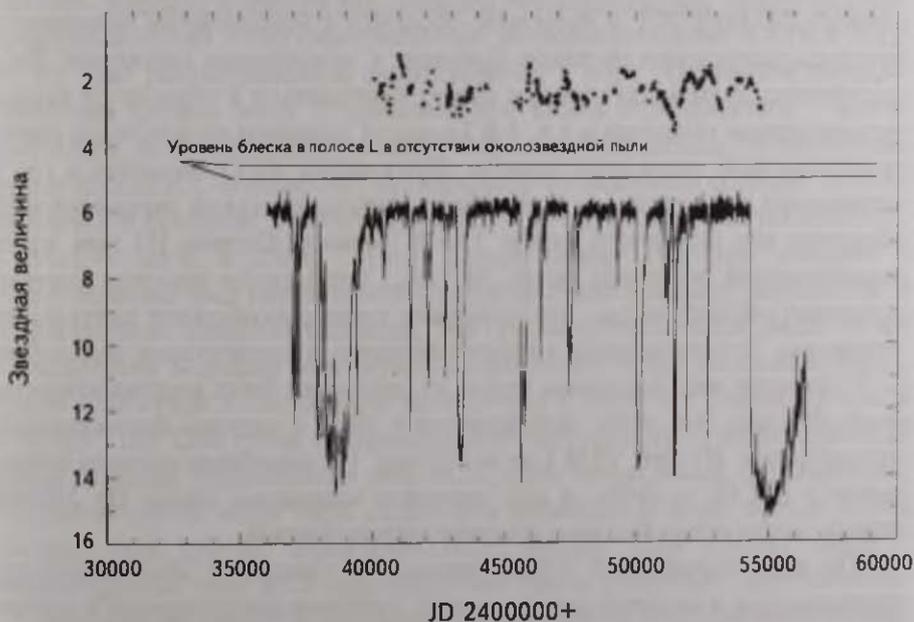


Рис.6. Кривая визуального и ИК блеска R CrB, охватывающая III-й и текущий IV-й 46-летние циклы. Визуальные данные из базы данных AAVSO и ИК (в полосе L) из публикаций [15,18,46]. Показан уровень L-блеска звезды без вклада околозвездного пылевого вещества (диапазон между двумя сплошными линиями) [5].

окрестностей звезды: 1.5-3 и  $\geq 20$  радиусов звезды, соответственно. Последнее обстоятельство выражается в наличии сдвига "фаз" между этими цикличностями. Если следовать нумерации 4284-суточных цикличностей, предложенной в [16], то I-й цикл отстает от эфемериды [18] на 2106 суток, II - 1316 суток, III - 1557<sup>d</sup>, IV - 1505<sup>d</sup>, V - 1647<sup>d</sup>, VI - 1554<sup>d</sup>, VII - 1601<sup>d</sup> или в среднем на 1573<sup>d</sup> ( $\pm 54^d$ ) по последним пяти значениям. Дальнейшая дискуссия в этом направлении выходит за рамки данного исследования, но можно указать на проблематичность сопоставления 4342-суточной ИК цикличности [18] с определенными деталями ИК кривой блеска, существующей с 1968г. (рис.6). На рис.6 видно также, что не представляется возможным уверенно выделить на длинах волн 3.5 мкм какую-либо определенную деталь, вызванную Большим минимумом 1962-1967гг., т.е. пыль ответственная за этот минимум уже удалась на достаточное расстояние и соответственно имеет более низкую температуру, чтобы не проявлять себя на этих длинах волн.

Следует отметить, что существующее исследование процесса конденсации пыли [41] дает некоторые числовые параметры меньше наблюдаемых: пылинки в реальных условиях достигают скоростей около 100 км/с и более за 30 суток [47] против расчетных 100 км/с за 150 суток.

За 40-50 суток вещество этой оболочки ускоряется до скоростей порядка 200 км/с [47], и рассеяние оболочки с дополнением возможного процесса разрушения пылинок приводит к завершению минимума. Но в следующую пульсацию процесс может повториться и образуется вторая экранирующая оболочка и т.д. 4-й Большой минимум можно представить суперпозицией последовательного образования 10-12 оболочек в год с оптической толщиной  $\tau = 2 \div 5$ . Массу отдельной такой экранирующей оболочки мы оценивали около  $1.4 \times 10^{-7}$  массы Солнца [5] при массе перманентной оболочки около  $10^{-6} M_{\odot}$ . Описанную простую картину усложняет обстоятельство, что пульсации также способствуют завершению минимума. Это выражается в неприемлемости аналитического выражения [1,31] на ветви восстановления блеска из минимума: блеск восстанавливается более быстро. Это четко наблюдается у звезд с хорошо выраженными пульсациями: RY Sgr, V854 Cen и FG Sge; 1-2 подобных эпизода можно найти у R CrB: в 1945г. и для текущего минимума около JD 2456600 (имело место очень быстрое восстановление блеска).

По мере ослабления блеска звезды ее спектр из абсорбционного превращается в богатый эмиссионный, наиболее интенсивный в ультрафиолетовой области, за счет чего показатели цвета ( $U - B$ ) и ( $B - V$ ) уменьшаются, т.е., звезда голубеет. В фазе минимального блеска состав эмиссионного спектра становится менее представленным и определяющее влияние на показатели цвета оказывает уже закон экстинкции в пылевой

среде экранирующей оболочки. Наиболее интенсивные широкие эмиссии, наблюдаемые во время минимума блеска (D Na I; He I  $\lambda$ 3889,  $\lambda$ 7065; H & K Ca II), возникают в экранирующей и перманентной оболочках. Перманентная оболочка может простираться на значительные расстояния от звезды: до 2".5 у V854 Cen [45]. Одноименные узкие эмиссии образуются в звездном ветре, который в зонах 1 и 2 имеет скорости до 25 км/с. В пределах экранирующей и перманентной оболочек звездный ветер из-за присутствия пылинок приобретает скорости 200-300 км/с. Подобный высокоскоростной звездный ветер наблюдается у многих звезд с переменностью типа RCB [36].

Наблюдаемое излучение звезды является суммой неполяризованного излучения звезды и поляризованного в перманентной оболочке рассеянного излучения звезды. В случае многокомпонентного минимума блеска экранирующие оболочки, по-видимому, нарушают ориентированную структуру околосредних окрестностей, поэтому поляризация регистрируемого излучения звезды вследствие этого значительно падает, даже при максимальном ослаблении блеска звезды [1].

5. *Заключение.* Два параметра, глубина ослабления блеска около 9<sup>m</sup> и продолжительность ослабления блеска более 8 лет, позволяют охарактеризовать текущий минимум как Большой минимум блеска. Исключительно продолжительный и глубокий минимум визуального блеска R CrB в 2007-2015 гг. стал подтверждением существования у этой уникальной звезды - прототипа группы звезд с одноименным типом переменности - долговременной 46-летней цикличности в переменности блеска. Историческая кривая блеска R CrB позволяет отождествить 4-е подобных события: в 1863 г. начался I-й Большой минимум, в 1908 г. - II-й (не столь впечатляющий), в 1962 г. - III-й, в 2007 г. - IV-й. Теперь можно уверенно говорить о существовании трех цикличностей, которые проявляются в визуальном и инфракрасном диапазонах спектра. Это циклы длительностью около 46 лет в следовании Больших минимумов визуального блеска (Большой цикл), около 4284 суток в следовании минимумов в пределах Большого цикла и около 1100-1200 суток в переменности визуального и инфракрасного блеска. В основе переменности типа RCB лежит потеря массы, следовательно, эти цикличности могут быть следствием вариаций в темпе потери массы звездой или других характеристиках звезды. Для других звезд с переменностью типа RCB еще предстоит поиск подобных цикличностей.

Хотелось бы привлечь внимание к возможности представления кривой блеска во второй половине минимума, ветви восстановления блеска из текущего Большого минимума как следствия медленного рассеяния уникального слоя, который становится одновременно источником последовательности экранирующих оболочек. Скорость его расширения, если

следовать [33], может быть порядка нескольких км/с, что сопоставимо со скоростью звездного ветра в верхних слоях фотосферы звезды.

Наличие цикличности вносит элемент предсказуемости в проявлении переменности у R CrB. Текущий минимум должен скоро закончиться, чтобы в апреле 2019г. ( $\pm 3 \times 140$  суток [17]) начался новый минимум блеска, а значит и новый VIII-й 4284-суточный цикл. Начавшееся в мае-июне 2015г. (на фазе 0.67 текущего 4284-суточного цикла) падение блеска R CrB с  $7^m$  до почти  $14^m$  в ноябре 2015г. подчеркивает уникальную продолжительность текущего минимума блеска и подтверждает правильность выбора термина "цикличность активности" перед термином "периодичность ...". Подобные повторные падения блеска на завершающей фазе любого минимума блеска мы в своих предыдущих исследованиях, например в [31], относили к этому незавершенному минимуму блеска, т.е., в данном случае, к IV-му Большому минимуму блеска.

Автор признателен наблюдателям переменных звезд за возможность использования международной базой данных AAVSO. При выполнении наблюдений большую помощь оказали данные международной сети VSNET, университет Киото, Япония. Это исследование было выполнено с использованием базы данных SIMBAD (Страсбург, Франция).

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

## IV-th GREAT VISUAL LIGHT MINIMUM OF R CrB. I. THE UBVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub> PHOTOMETRY

A.E.ROSENBUSH

Results of the UBVR<sub>c</sub>I<sub>c</sub> photometry of R CrB in the visual light minimum, 2007-2015, are presented. Unique duration (8 years) and the depth of the light drop ( $9^m$ ) did not change the behavior of a typical color indices: the decrease of the color indexes on stage of light fall and their increase during a temporal increase in the brightness at JD 2454500-2454600. The wavelength dependence of the amplitude increase brightness in this episode temporal increase in brightness is a typical view: the increase of the brightness on  $0^m.7$  in the photometrical  $i_c$  band corresponds to  $0^m.1$  in the  $b$  band. The current unique visual light minimum is the IV-th Great minimum and is interpreted as a manifestation of the 46-year regularity in an activity of R CrB, adding the

known 4284 and 1200-day cycles. This IV-th Great minimum, like any one of them, is interpreted as a consequence of the formation of a sequence of the screening shells.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. *A.E.Rosenbush*, *Astrophysics*, **39**, 78, 1996.
2. *G.C.Clayton*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **108**, 225, 1996.
3. *R.I.Goncharova*, *G.U.Kovalchuk*, *A.F.Pugach*, *Astrophysics*, **19**, 161, 1983.
4. *A.E.Rozenbush*, *Astrophysics*, **43**, 435, 2000.
5. *A.E.Rosenbush*, *Kinematics Phys. Celest. Bodies*, **14**, 262, 1998.
6. *А.Э.Розенбуш*, *Астрон. циркуляр*, **1343**, 6, 1984.
7. *M.W.Feast*, *Variable stars and stellar evolution*, *IAU Symp.*, **67**, Moscow, 129, 1975.
8. *M.W.Feast*, *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*, **96**, 3, 1996.
9. *L.Jacchia*, *Publ. Osserv. Astron. Univ. Bologna*, **2**, 173, 1933.
10. *A.F.Pugach*, *Inf. Bull. Var. Stars*, **1277**, 1, 1977.
11. *J.W.Menzies*, *M.W.Feast*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **285**, 358, 1997.
12. *T.E.Sterne*, *Harvard Bull.*, **896**, 17, 1934.
13. *Т.С.Хрузина*, *Астрон. циркуляр*, **1098**, 1, 1980.
14. *A.E.Rosenbush*, *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*, **96**, 91, 1996.
15. *A.E.Rozenbush*, *Kinematics Phys. Celest. Bodies*, **13**, 69, 1997.
16. *A.E.Rosenbush*, *Inf. Bull. Var. Stars*, **5025**, 1, 2001.
17. *A.Rosenbush*, *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*, **391**, 39, 2008.
18. *B.F.Yudin*, *J.D.Fernie*, *N.N.Ikhsanov et al.*, *Astron. Astrophys.*, **394**, 617, 2002.
19. *D.W.Strecker*, *Astron. J.*, **80**, 451, 1975.
20. *A.U.Landolt*, *J.L.Clem*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **122**, 541, 2010.
21. *M.S.Bessell*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **100**, 1181, 1990.
22. *A.E.Rozenbush*, *A.P.Vid'machenko*, *Kinematics Phys. Celest. Bodies*, **27**, 317, 2011.
23. *A.U.Landolt*, *Astron. J.*, **137**, 4186, 2009.
24. *N.Zacharias*, *C.T.Finch*, *T.M.Girard et al.*, *Astron. J.*, **145**, A44, 2013.
25. *А.Э.Розенбуш*, *Кинематика и физика небесных тел*, **2**, 29, 1986.
26. *L.Campbell*, *H.Shapley*, *Harvard Circ.*, **24**, 1, 1923.
27. *A.V.Raveendran*, *B.N.Ashoka*, *N.K.Rao*, *Astrophys. Space Sci. Library*, **128**, 191, 1986.
28. *M.W.Feast*, *Changing Trends in Variable Star Research*, *IAU Coll.*, **46**, Hamilton, New Zealand, 246, 1979.
29. *В.П.Архипова*, *Письма в Астрон. ж.*, **22**, 828, 1996.

30. *J.B.Alexander, P.J.Andrews, R.M.Catchpole et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **158**, 305, 1972.
31. *A.E.Rozenbush*, Sov. Astron. Lett., **18**, 65, 1992.
32. *J.Krelowski*, Variable stars and stellar evolution, IAU Symp., **67**, Moscow, 149, 1975.
33. *A.Goeres, E.Sedlmayr*, Astron. Astrophys., **265**, 216, 1992.
34. *A.E.Rosenbush*, Astron. Nachr., **316**, 281, 1995.
35. *A.E.Rozenbush*, Astrophysics, **50**, 514, 2007.
36. *G.C.Clayton, T.R.Geballe, W.Zhang*, Astron. J., **146**, A23, 2013.
37. *A.E.Rosenbush, A.V.Bondar'*, Baltic Astron., **12**, 369, 2003.
38. *W.A.Lawson, D.Kilkenny*, Astron. Soc. Pacif., Conf. Ser., **96**, 349, 1996.
39. *Yu.A.Fadeyev*, Astron. Soc. Pacif., Conf. Ser., **96**, 375, 1996.
40. *Yu.A.Fadeyev*, Astrophys. Space Sci., **86**, 143, 1982.
41. *Yu.A.Fadeyev*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **233**, 65, 1988.
42. *P.Woitke, A.Goeres, E.Sedlmayr*, Astron. Astrophys., **313**, 217, 1996.
43. *B.T.Draine, H.M.Lee*, Astrophys. J., **285**, 89, 1984.
44. *В.И.Шенаврин, О.Г.Таранова, В.И.Мороз, А.В.Григорьев*, Астрон. ж., **56**, 1007, 1979.
45. *G.C.Clayton, T.R.Ayres*, Astrophys. J., **560**, 986, 2001.
46. *В.И.Шенаврин, О.Г.Таранова, А.Э.Наджиб*, Астрон. ж., **88**, 34, 2011.
47. *A.E.Rozenbush*, Astrophysics, **44**, 78, 2001.