

УДК 524.338.7—54

## Переменные звезды типа R Северной Короны на диаграмме Герцшпрунга — Рассела

А. Э. Розенбуш

Обсуждается положение переменных звезд типа R Северной Короны (RCB) на диаграмме Герцшпрунга—Рассела. Высказывается предположение о разделении их на две группы, представляющие разные эволюционные последовательности, для которых характерна интенсивная потеря массы. Явление R Северной Короны — следствие такой потери массы. Рассматривается зависимость между светимостью звезды и максимальной глубиной ослабления ее блеска типа RCB, что позволило определить абсолютные звездные величины  $M_V$  ряда звезд с феноменом RCB: U Aqr (+2.5<sup>m</sup>), V CrA (—5.0<sup>m</sup>), R CrB (—5.0<sup>m</sup>) и RT Nor (+0.6<sup>m</sup>). Оценены радиусы и массы R CrB и RY Sgr:  $R_R = 1.6R_{RY} = 114 k^{-1} R_{\odot}$ ,  $M_R = 0.4M_{RY} = 0.9 k^{-1} M_{\odot}$ , где  $k$  — амплитуда пульсаций RY Sgr в долях ее радиуса.

*R CORONAE BOREALIS TYPE VARIABLES ON THE HERTZSPRUNG-RUSSELL DIAGRAM, by Rosenbush A. E.*— A position of R Coronae Borealis type variables on the Hertzsprung—Russell diagram is discussed. An assumption about a division of this small number of stars into two evolutionary groups with intensive mass loss is stated. R Coronae Borealis phenomenon is a result of such a mass loss. Possible relation between the luminosity of a star and the maximum depth of R CrB type minimum is considered. This relation has been used for determining absolute magnitudes  $M_V$  of several RCrB stars: U Aqr (+2.5<sup>m</sup>), V CrA (—5.0<sup>m</sup>), R CrB (—5.0<sup>m</sup>), RT Nor (+0.6<sup>m</sup>).

The radii and masses of R CrB and RY Sgr are estimated:  $R(R CrB) = 1.6 R(RY Sgr) = 114 k^{-1} R_{\odot}$ ,  $M(R CrB) = 0.4 M(RY Sgr) = 0.9 k^{-1} M_{\odot}$ , where  $k$  is an amplitude of RY Sgr pulsations (in units of its radius).

Переменная звезда R Северной Короны отличается необычным изменением блеска, резко выделяющим ее среди других переменных. Существование нескольких звезд с такими изменениями блеска послужило основанием для выделения их в отдельный тип переменных звезд. Согласно [4], их насчитывается 37 (включая звезды сомнительной классификации). Позже было установлено, что они характеризуются дефицитом водорода и избытком углерода в атмосфере, а также наличием избытка излучения в ИК-области спектра, обусловленного пылевой околосредной оболочкой. Спектральные классы этих звезд заключены в широком диапазоне — от B до R.

Первые оценки светимостей переменных типа RCB основаны на спектральных данных и приводили к классу светимости Ib. Это позволяло считать, что звезды типа RCB располагаются в верхней части диаграммы Герцшпрунга—Рассела (Г—Р). Впоследствии класс светимости подтвержден данными наблюдений пульсаций лучевой скорости RY Sgr [18] и поляриметрии SU Tau [2]. Этот вывод был распространен на все звезды данной группы. Положение звезд на диаграмме Г—Р связано с определенной эволюционной фазой, быстротечность которой для звезд типа RCB выводят из их малочисленности и непродолжительности (около 10<sup>5</sup> лет) существования холодной ( $T_{эф} \approx 25—30$  К) протяженной (диаметр около 18') пылевой оболочки вокруг R CrB [20].

Предпринимались попытки приписать переменность типа RCB определенной стадии эволюции — от красных гигантов к гелиевым звездам [33] — или объяснить необычный химический состав эволюцией двойной звезды [10, 23]. В настоящее время дефицит водорода обнаружен у более обширной группы углеродных звезд (HdC), в которую звезды типа RCB входят как холодные переменные звезды [14] и которая включает также постоянные звезды (например, HD 182 040).

Большинство авторов считают, что в процессе эволюции звезды произошла потеря богатых водородом поверхностных слоев [25], что подтверждается фактом существования недавно открытой реликтовой оболочки R CrB [20]. Дальнейшая эволюция связывается с белыми карликами [33, 35] и со Сверхновыми [36]. Среди предшественников звезд типа RCB называются переменные типа RV Tau [22], потеря массы у которых стимулируется, возможно, ударными волнами [12]. Оценки масс рассматриваемого типа переменных основаны на расчетах пульсаций гелиевых звезд или на расчетах эволюции и заключены в

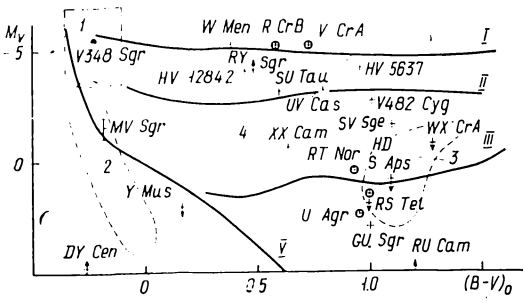


Рис. 1. Звезды типа R Северной Короны на диаграмме Герцшпрунга — Рессела. Сплошные линии — положения нормальных звезд разных классов светимости: 1 — область переменных Вольфа — Райе; 2 — экстремальные гелиевые звезды [34]; 3 — углеродные звезды R0 — R5 [16]; 4 — полоса нестабильности; крестики — звезды типа R Северной Короны; заключены в кружок звезды, положение которых уточнено по зависимости (1). Стрелками показано направление возможного смещения при уточнении  $M_V$ . HD — положение звезды HD 182 040

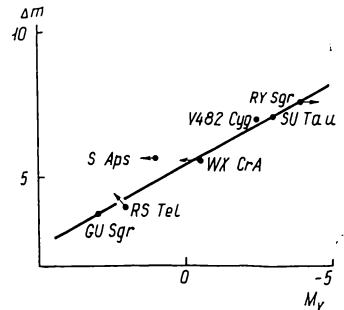


Рис. 2. Зависимость максимальной глубины визуальных минимумов блеска  $\Delta m$  [3, 8] от абсолютной визуальной звездной величины  $M_V$  [6]. Стрелками показано направление возможного смещения при уточнении  $M_V$

пределах  $0.9\text{--}3 M_{\odot}$  [32, 33]. При попытках построения единой эволюционной картины всегда полагают, что светимости этих звезд одного порядка (болометрическая абсолютная звездная величина  $M_{bol} \approx -4^m$ ), и обходится молчанием факт существования сравнительно холодных переменных, например WX CrA.

Для многих переменных типа RCB значения абсолютной звездной величины  $M_V$  оценены нами (см. [5, 6]). Диапазон светимостей расширился от Ib до III. Теперь на диаграмме Г—Р звезды типа RCB охватывают обширную область, как ни один другой тип переменных (рис. 1). Имеются две группы: I — UV Cas, V CrA, R CrB, RY Sgr, SU Tau; II — S Aps, U Aqr, WX CrA, RT Nor, SV Sge, GU Sgr, RS Tel. Резко выделяются Y Mus (принадлежность ее к типу RCB сомнительна (см. [3])) и две горячие звезды — MV Sgr (кривая блеска несколько отличается от типичной, наблюдается линия  $H_{\alpha}$  в эмиссии) и DY Cen.

Звезды I группы располагаются в области полосы нестабильности, по соседству с переменными типов  $\delta$  Cep, RV Tau и W Vir. Пульсации блеска ( $0.4^m$ ) и лучевой скорости (25 км/с) наблюдаются у RY Sgr. Они, по-видимому, имеются и у R CrB, но меньшей амплитуды (менее  $0.2^m$  и менее 10 км/с соответственно). Звезды II группы попадают в область ранних углеродных звезд (спектрального класса R) [16]. Они также характеризуются переменностью блеска вне активной фазы, которая менее изучена.

К двум горячим звездам MV Sgr и DY Cen можно добавить V348 Sgr, у которой отмечена переменность блеска с характерным временем до десятка суток, сходная с переменностью звезд типа RCB. Последнее и обуславливает двойственность ее классификации: холодная звезда Вольфа—Райе или горячая звезда типа RCB (историю иссле-

дования см. в [21]). Эти три переменные примыкают к большой группе горячих экстремальных гелиевых звезд [34] (составной части группы HdC [14]), так что не исключена возможность эволюционного перехода от V348 Sgr через MV Sgr и DY Cep к гелиевым звездам.

Если сопоставить абсолютные величины  $M_V$  с максимальным ослаблением блеска  $\Delta m$  (которое имеет определенное значение для конкретной звезды [8]), то обнаруживается зависимость между ними (рис. 2). Отметим следующие ограничения: мы исключили три звезды Большого Магелланова Облака (фотометрическая переменность которых не очень характерна для данного типа), MV Sgr (также мало активна) и Y Mus (наблюдался всего один минимум блеска). Из зависимости выпадает также UV Cas. Активная переменность этой звезды прекратилась в начале века, и с тех пор у нее не наблюдаются изменения блеска более  $1^m$ . В то же время она, по-видимому, не имеет и постоянной околозвездной оболочки [11], свидетельствующей о потере массы. Звезда V348 Sgr удовлетворяет этой зависимости, если принять во внимание яркость околозвездной туманности [21]. Используя аппроксимационную формулу [9], кривую блеска V348 Sgr за период J. D. 2 444 835—... 845 [21] можно представить как суммарное излучение постоянной туманности ( $m_v \approx 18.5^m$ ) и переменной звезды с блеском в минимуме около  $21^m$  (параметры аппроксимации: момент минимума J. D. 2 444 841, глубина минимума  $\Delta m = 8.5^m$ , время увеличения блеска на  $0.5\Delta m$  составляет  $5^d$ ).

Приведенная на рис. 2 зависимость описывается формулой

$$\Delta m = 5.32 - 0.53M_V, \quad (1)$$

или

$$\tau \approx 2.5 + 1.25 \lg(L/L_\odot) = 2.5 [\lg(10R/R_\odot) + 2 \lg(T/T_\odot)],$$

где  $\tau$  — оптическая толщина затмевающей пылевой оболочки,  $\Delta m = 1.086\tau$ ;  $R$ ,  $L$  и  $T$  — радиус, светимость и эффективная температура звезды. Из этого соотношения по известному значению  $\Delta m$  можно оценить абсолютную звездную величину  $M_V$ :  $+2.5^m$  для U Aqr;  $-5^m$  для V CrA и R CrB,  $+0.6^m$  для RT Nor, что и отражено на рис. 1. Звезды R CrB, RY Sgr и SU Tau располагаются рядом, что свидетельствует о близости многих характеристик переменных этой группы, в том числе и величины предельного интервала между последовательными минимумами визуального блеска [8].

Теоретические исследования условий конденсации пыли [17] и наблюдения звезд в минимумах блеска позволяют оценить массы R CrB и RY Sgr. Радиус RY Sgr в соответствии с [26] составляет  $R = k^{-1}\Delta R = k^{-1} \cdot 5 \cdot 10^7$  км, где  $k$  — амплитуда пульсаций звезды в долях радиуса (например, для цефеид  $k=1$ ). В [18] дана оценка  $R = 85R_\odot$ . Для R CrB пока нет надежных определений лучевых скоростей, так как амплитуда их изменений сравнима с точностью измерений. С помощью формулы (1), принимая  $\Delta m$  равными 8 и  $7.5^m$  [8] и эффективные температуры 6900 и 7100 К [3] для R CrB и RY Sgr соответственно, можно получить отношение радиусов  $R_R = 1.6R_{RY}$ . Конденсация пылинок возможна начиная с расстояний  $r > 12R$  [17]. Мы принимаем  $r = 15R$ . Считая, что наблюдаемое смещение узких эмиссионных линий в минимуме блеска соответствует скорости убегания для данной звезды, и учитывая, что происходит усреднение по диску звезды (коэффициент усреднения равен 24/17), оцениваем массы этих звезд:  $M_{RY} = 2.2k^{-1}M_\odot$  и  $M_R = 0.4M_{RY} = 0.9k^{-1}M_\odot$ .

Зная положение звезд типа R Северной Короны на диаграмме Г—Р, мы можем затронуть вопрос об их эволюционном статусе. В некоторых работах по фотометрии R CrB и RY Sgr выяснялся характер переменности в максимуме блеска [1, 28]. Отмечалось некоторое сходство переменности R CrB и классических цефеид, RY Sgr и цефеид

сферической составляющей. У последней сходство проявляется в наличии разрыва на кривой лучевых скоростей [26, 28].

Таким образом, это звезды, атмосферы которых пульсируют. Пульсации могут приводить к потере массы, как следует из теоретических расчетов и факта существования околозвездных оболочек у ряда цефеид [15]. Потеря массы звездами типа RCB в результате пульсаций подтверждается путем сопоставления кривых блеска RY Sgr в ИК-диапазоне в фотометрической полосе  $L$  ( $\lambda$  3.5 мкм), где в основном излучает околозвездная оболочка, и в оптическом диапазоне — уменьшение ИК-излучения сопровождается увеличением среднего значения визуального блеска. Амплитуда таких изменений достигает 1.4 и 0.15<sup>m</sup> соответственно. Исходные данные наблюдений или ссылки на них можно найти в [19, 27, 30]. Для R CgB столь выраженного явления нет, но есть изменения визуального и ИК-блеска с одинаковыми периодами 1170<sup>d</sup> [31]. В случае RY Sgr амплитуда визуального блеска слишком мала и возможно, что ИК-излучение определяется не только переизлучением поглощенного потока от звезды, а еще и дополнительным механизмом. Но можно, конечно, объяснить это и несферичностью околозвездной пылевой оболочки RY Sgr; тогда надо увязать ее со сферически-симметричной потерей массы в результате пульсаций (реликтовая оболочка R CgB — сферическая [20]; этот вывод мы распространяем на RY Sgr и другие звезды данного типа). Потеря верхних слоев ведет в конечном счете к уменьшению содержания водорода в атмосфере звезды и повышению содержания углерода. Существует несколько пульсирующих звезд с повышенным содержанием углерода, но, по-видимому, еще нормальным (солнечным) содержанием водорода (AC Her, RU Cam).

Если допустить, что во время минимума теряется около  $10^{-7}M_{\odot}$  [5, 7] и такова же потеря массы при пульсации, то за год теряется около  $10^{-6}M_{\odot}$ . Следовательно, за время существования реликтовой оболочки ( $10^9$  лет) звезда I группы вполне могла потерять около  $0.1M_{\odot}$ , что не противоречит оценке (до  $1M_{\odot}$ ), полученной в [20]. Такая интенсивная потеря массы сказывается на переменности звезд. Наблюдается уменьшение периода пульсаций RY Sgr [29]. Только недавно (не более 75 лет назад) прекратилась заметная потеря вещества у UV Cas. Также прошла стадию потери массы XX Cam, у которой нет околозвездной оболочки, но отмечен дефицит водорода в атмосфере. Среди членов II группы располагаются на диаграмме Г—Р постоянные углеродные звезды с дефицитом водорода, не имеющие околозвездных оболочек, например HD 182 040.

Среди объектов с повышенным содержанием углерода отметим планетарные туманности A30, A78, A58 [13, 24]. Последняя связана с уникальной переменной V605 Aql, спектр которой сходен со спектром HD 182 040 [4, 14]. Образование пылевой составляющей в результате интенсивной потери массы происходит при вспышке Новой. В этом случае на ИК-кривой блеска наблюдается вторичное поярчание и в случае ориентации плоскости орбиты двойной системы — предшественника Новой — по лучу зрения на визуальной кривой блеска отмечается минимум типа RCB [9].

Можно говорить об отсутствии единой эволюционной группы переменных типа R Северной Короны. Звезды I группы — это проэволюционировавшие звезды [33], которые пересекают полосу неустойчивости и в результате пульсаций постоянно теряют массу, что привело к утрате внешних водородных и обнажению внутренних углеродных слоев. Иногда создаются условия [17], при которых высокое содержание углерода способствует лавинообразному процессу образования углеродных пылинок в сферическом слое, при этом существенно ослабляется излучение центральной звезды, т. е. наблюдается явление R Северной Короны. Подобный процесс отмечается и у звезд II группы,

но происхождение этих объектов иное. Примером объекта, у которого отсутствует характерная для феномена RCB переменность блеска, может быть полуправильная звезда LR Sco, обладающая ИК-избытком (т. е. околосветной оболочкой) и пекулярным спектром, что позволило некоторым авторам причислить ее к типу RCB (см. [4]).

1. Гончарова Р. И. Цветовые изменения яркости звезды R Северной Короны в максимуме блеска // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел.— Киев: Наук. думка, 1985.— С. 102—104.
2. Дорошенко В. Т., Ефимов Ю. С., Розенбуш А. Э. и др. Оптические и инфракрасные наблюдения SU Tau // Астрофизика.— 1978.— 14, вып. 1.— С. 5—15.
3. Звезды типа R Северной Короны / Под ред. М. Я. Орлова.— Киев: Наук. думка, 1978.— 127 с.
4. Общий каталог переменных звезд / Под ред. П. Н. Холопова.— М.: Наука, 1985.— Т. 1.— 375 с.
5. Розенбуш А. Э. Особенности распределения энергии в спектрах звезд типа R Северной Короны: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.— Одесса, 1981.— 10 с.
6. Розенбуш А. Э. Нормальные показатели цвета и абсолютные звездные величины избранных переменных звезд типа R Северной Короны // Астрометрия и астрофизика.— 1982.— Вып. 47.— С. 17—21.
7. Розенбуш А. Э. Потеря массы звездами типа R Северной Короны // Астрон. циркуляр.— 1984.— № 1343.— С. 6—8.
8. Розенбуш А. Э. Частота минимумов блеска у звезд типа R Северной Короны // Кинематика и физика небес. тел.— 1985.— 1, № 5.— С. 10—12.
9. Розенбуш А. Э. Новые звезды и феномен R Северной Короны // Там же.— 1988.— 4, № 5.— С. 33—38.
10. Тутуков А. В., Юнгельсон Л. Р. Эволюционный сценарий для звезд малых и умеренных масс // Науч. информ. Астрон. совета АН СССР.— 1981.— 49.— С. 3—20.
11. Шенаврн В. И. Фотометрия четырех звезд типа R Северной Короны в оптическом и инфракрасном диапазонах // Перемен. звезды.— 1980.— 21, № 3.— С. 315—319.
12. Baird S. R. AS Herculis, a metal-poor, carbon enhanced RV Tauri star // Astrophys. J.— 1981.— 245, N 1.— P. 208—218.
13. Bidelman W. P. On the nature of V605 Aquilae // Bull. Amer. Astron. Soc.— 1973.— 5, N 4.— P. 442.
14. Bidelman W. P. Hydrogen deficiency and mass loss // IAU Symp. 83, Vancouver Island, 1978.— Dordrecht etc.: Reidel, 1979.— P. 305—308.
15. Deasy H., Butler C. J. Evidence for mass loss from IRAS observation of classical Cepheids // Nature.— 1986.— 320, N 6064.— P. 726—728.
16. Eggen O. J. The barium and R type stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1972.— 159, N 4.— P. 403—427.
17. Fadeyev Yu. A. Theory of dust formation in R Coronae Borealis stars // Astrophys. and Space Sci. Library.— 1986.— 128.— P. 441—451.
18. Feast M. W. The R Coronae Borealis type variables (Review paper) // IAU Symp. 67, Moscow, 1974.— Dordrecht etc.: Reidel, 1975.— P. 129—141.
19. Feast M. W. Recent work on the RCB stars // IAU Coll. 46, Hamilton, New Zealand, 1978.— Waikato: Univ. Waikato, 1979.— P. 246—263.
20. Gillett F. C., Backman D. E., Beichman C., Neugebauer G. IRAS observation of R Coronae Borealis—detection and study of a fossil shell // Astrophys. J.— 1986.— 310, N 2.— P. 842—852.
21. Heck A., Houziaux L., Manfroid J. et al. Photometric variations of the irregular variable V348 Sgr // Astron and Astrophys. Suppl. Ser.— 1985.— 61, N 3.— P. 375—385.
22. Howell S. B., Bopp B. W., Noah P. V. The remarkable spectrum of the RV Tauri star R Scuti at deep minimum // Publ. Astron. Soc. Pacif.— 1983.— 95, N 572.— P. 762—767.
23. Iben I., Jr., Tutukov A. V. On the evolution of close binaries with components of initial mass between  $3M_{\odot}$  and  $12M_{\odot}$  // Astrophys. J. Suppl. Ser.— 1985.— 58, N 4.— P. 661—710.
24. Jacoby G. H., Ford H. C. The hydrogen-depleted planetary nebulae Abell 30 and Abell 78 // Astrophys. J.— 1983.— 266, N 1.— P. 298—308.
25. Lambert D. L. The chemical composition of red giants // Astrophys. and Space Sci. Library.— 1980.— 88.— P. 115—134.
26. Lawson W. A., Cottrell P. L. The R Coronae Borealis star RY Sgr: shock-wave phenomenon // Observatory.— 1986.— 106, N 1074.— P. 169—171.
27. Lawson W. A., Kilmartin P. M., Gilmore A. C. et al. UVB photometry of the R Coronae Borealis star RY Sgr—1984 to 1986 // Inform. Bull. Var. Stars.— 1987.— N 3085.— P. 1—4.
28. Lloyd Evans T. The RCB star RY Sagittarii as a pulsating star // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1986.— 219, N 1.— P. 191—196.
29. Marraco H. G., Milesi G. E. The period shortening of RY Sagittarii // Astron. J.— 1982.— 87, N 12.— P. 1775—1782.

30. *Menzies J. W.* RY Sgr: can the time of the next deep minimum be predicted? // *Astrophys. and Space Sci. Library.*—1986.—128.—P. 207—210.
31. *Raveendran A. V., Ashoka B. N., Rao N. K.* Photometric and radial velocity of R CrB near maximum light // *Ibid.*—1986.—128.—P. 191—197.
32. *Saio H., Wheeler J. C.* Pulsational constraints on the mass and luminosity of R Coronae Borealis stars // *Astrophys. J.*—1983.—272, N 1.—P. L25—L28.
33. *Schoenberner D.* Post-giant evolution of helium stars // *Astron. and Astrophys.*—1977.—57, N 3.—P. 437—441.
34. *Schoenberner D., Drilling J. S., Lynas-Gray A. E. et al.* UV fluxes and effective temperatures of extreme helium stars // *Advances in ultraviolet astronomy: four years of IUE research: NASA conf. publ.*—1982.—N 2238.—P. 593—596.
35. *Sion E. M., Fragola J. L., O'Donnell W. C.* On the evolutionary status of the carbon-band white dwarfs // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1979.—91, N 542.—P. 460—464.
36. *Wheeler J. C.* Type I supernovae, R Coronae Borealis stars, and Crab nebula // *Astrophys. J.*—1978.—225, N 1.—P. 212—220.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,  
Киев

Поступила в редакцию 20.01.88,  
после доработки 18.04.88

Окончание. Начало с. 80.

15. *Piirola V.* Polarimetry of symbiotic stars // *Cataclysmic variables and related objects: Proc. IAU Colloq. N 72.*—1983.—P. 211—216.
16. *Tapia S.* CH Cygni / *IAU Circ.*—1978.—N 3243.—P. 2.
17. *Yamashita Y., Maehara H.* A binary model for CH Cygni // *Publs Astron. Soc. Jap.*—1979.—31, N 2.—P. 307—316.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,  
Киев

Поступила в редакцию 11.11.87,  
после доработки 18.12.87