

Предкатаклизмические двойные системы

Н.Ф. Войханская

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

Поступила в редакцию 27 июля 2004 г.; принята к печати 10 февраля 2005 г.

Составлен новый список предкатаклизмических двойных. Их характеристики и свойства описаны и сравнены с характеристиками катаклизмических переменных. Показано, что несмотря на идентичность многих параметров основное различие между этими двумя типами систем (аккреция или ее отсутствие) обусловлено процессом эволюции и свойствами прародителей. Их эволюционные пути расходятся после стадии красного гиганта. Большинство главных компонентов предкатаклизмических переменных становятся экстремальными объектами горизонтальной ветви и уходят на линию охлаждения белых карликов, минуя AGB, или уходят с нее раньше (не достигнув верха). Вторичные компоненты предкатаклизмических переменных отличаются высокой коронально-хромосферной активностью. Это указывает на наличие значительного магнитного поля, что тоже каким-то образом влияет на свойства этих систем. Сравнение расстояний между компонентами с пределом устойчивости показало, что катаклизмические переменные перешли этот предел, а предкатаклизмические сохранили устойчивость в процессе эволюции.

Ключевые слова: тесные двойные системы, предкатаклизмические двойные, свойства, эволюция

PRECATAclysmic BINARY SYSTEMS, by N.F. Voichanskaya. A new list of precataclysmic binaries is compiled. Their characteristics and properties are described and compared to those of cataclysmic variables. It is shown that although many parameters are the same for these two types of systems, the main difference between them (accretion or no accretion) stems from the process of evolution and progenitor properties. Evolutionary tracks of the two types of systems diverge at the red-giant stage. Most of the primaries in precataclysmic variables become extreme horizontal-branch objects, which move to the white-dwarf cooling line bypassing the AGB stage, or leave the AGB at an earlier stage than cataclysmic stars (without reaching the AGB tip). Secondary components in precataclysmic variables are characterized by high coronal and chromospheric activity. This is indicative of appreciable magnetic field, which affects in some way the properties of these systems. A comparison of the component separations and the stability limit shows that cataclysmic variables have passed this limit, whereas precataclysmic variables have maintained their stability in the process of evolution.

Key words: stars: binaries – stars: cataclysmic and precataclysmic variables – stars: evolution

1. Введение

Большой интерес для теории эволюции представляют двойные системы, компоненты которых находятся на различающихся стадиях эволюции. В своем развитии они должны были пройти фазу общей оболочки (СЕ-фазу). Примером таких систем являются предкатаклизмические двойные (РСВ). Они состоят из белого карлика или субкарлика и маломассивной звезды главной последовательности позднего спектрального класса. В подавляющем числе случаев это карлики класса М, но воз-

можны G и K. По аналогии с катаклизмическими переменными (CV) белый карлик будем называть главным компонентом, а красный — вторичным. Так как в этих системах нет аккреционных источников блеска, то это слабые, трудные для обнаружения объекты. Тем не менее в настоящее время группа быстро пополняется. Последний обзор свойств РСВ был сделан почти двадцать лет назад (Риттер, 1986). Назрела необходимость повторного рассмотрения и сравнения их со свойствами CV.

Хотя компоненты РСВ находятся на тесной орбите, переноса массы в виде аккреционного потока

между ними нет. Подобные системы являются результатом эволюции первоначально широкой пары (с периодом до нескольких лет) в общей оболочке. SE-фаза начинается, когда более массивный компонент широкой пары достигает стадии красного гиганта (RG) или асимптотической ветви гигантов (AGB) и заполняет свою полость Роша. Так как в это время звезда имеет глубокую конвективную оболочку, то в ответ на потерю массы звезда будет расширяться, и потеря массы становится динамическим процессом. Аккрецирующая звезда (вторичный компонент) имеет малую массу и, следовательно, большое время тепловой релаксации. С началом процесса аккреции она теряет тепловую устойчивость и дальнейшее зависит от ее массы. Если звезда имеет глубокую лучистую оболочку ($M_2 > 0.3M_\odot$), то ее радиус увеличится и станет много больше равновесного. Начнется потеря массы. Если же у нее конвективная оболочка ($M_2 \leq 0.3M_\odot$), то она расширяется медленно, а может даже сжаться. Потери массы не происходит.

Итак, общая оболочка возникает, когда главный (более массивный) компонент широкой пары начинает катастрофически терять массу, и вторичный компонент погружается в нее.

Оказавшись внутри оболочки, обе звезды испытывают гравитационное и гидродинамическое торможение от взаимодействия с окружающим их веществом и будут по спирали приближаться друг к другу. Диссипация орбитальной энергии (тормозная светимость) будет возрастать по мере сближения звезд и в конце концов может привести к сбросу оболочки. После окончания SE-фазы пара становится менее массивной и более тесной.

Во время катастрофической потери массы главным компонентом возможна ситуация, когда вещество будет уходить из системы через внешнюю точку Лагранжа L_2 . Это приведет к очень быстрой потере энергии системой и очень быстрому сжатию орбиты.

Итак, SE-фаза заканчивается или сбросом оболочки — будущей планетарной туманности, в результате чего образуется маломассивная тесная двойная система, или слиянием компонентов. Так как возникли переменные CV и РСВ, то мы знаем, что осуществился первый вариант.

Список РСВ и некоторые их характеристики приводятся в табл.1 (приведена в конце статьи).

2. Фотометрические свойства РСВ

Они изучены в основном в оптике. Только V471 Tau наблюдалась во многих диапазонах. Так как РСВ являются разделенными двойными системами, то у них отсутствуют явления, обусловленные аккрецией. В частности, ни у одной из них не

наблюдается быстрых флуктуаций блеска, характерных для всех CV; на их орбитальных кривых блеска нет горбов от горячего пятна, возникающего в месте столкновения струи с аккреционным диском; отсутствуют квазипериодические вспышки. Переменность блеска РСВ имеет другие причины: пятнистость поверхности красного карлика и его хромосферная активность, пульсации белого карлика, облучение одного компонента другим.

У некоторых РСВ наблюдается долговременная переменность блеска (например у V651 Mon, UU Sge, BD+26°2405, BD+50°2869 BD-12°1172, MT Ser). Все эти системы являются центральными звездами планетарных туманностей, и переменность блеска обусловлена движением облаков пыли и газа в туманности. Следует еще отметить, что большинство из них видны под малыми углами (Войханская, 2002), и это дополнительный аргумент в пользу предположения, что причиной переменности являются процессы в окружающей туманности. Другой причиной долговременной переменности блеска могут быть изменения активности красного карлика, которые подобны циклам солнечной активности. У V471 Tau обнаружены циклы продолжительностью 5 ± 0.5 лет (Ибаноглу и др., 1994). По-видимому, причиной переменности в подобных случаях является изменение площади поверхности, занятой пятнами.

Характерной чертой орбитальных кривых блеска большинства РСВ является четко выраженный эффект отражения. Он состоит в том, что сторона холодного компонента, обращенная к белому карлику, облучается им, поглощает его ультрафиолетовое излучение и переизлучает энергию в более длинноволновой области. Из-за этого ее температура и светимость больше, чем на неосвещенной противоположной стороне.

Кроме эффекта отражения причиной изменения блеска может быть нестационарность вторичного компонента, т.е. его хромосферная активность. Подобное наблюдается, например, у FF Aqr, BD-22°3467 и вышеупомянутой V471 Tau. Хромосферная активность красного карлика, кроме изменения площади пятен, проявляется также в изменениях силы эмиссионных линий, в частности, H_α , которые не коррелируют с фазой орбитального периода (Case I, HZ9, V471 Tau и др.). Эмиссия в линии H_α не исчезает даже на необлученной стороне вторичного компонента.

У некоторых РСВ наблюдались вспышки типа UV Cet. Например, у системы Case I по архивным пластинкам Шугаров (1984) обнаружил две вспышки в В-полосе амплитудой 0^m6-0^m9 , а Блич и др. (2000, 2002) наблюдали вспышки в R- и V-полосах. У RX 2130.6+4710 вспышки наблюдались неоднократно (Макстед и др., 2004) вне затмения,

что указывает на сильную магнитную активность М-карлика.

V471 Tau — одна из наиболее подробно изученных систем, наблюдавшаяся в широком интервале длин волн от рентгеновского до радиодиапазона. Кривые блеска ее во всех областях переменны, и эта переменность, несомненно, связана со вторичным компонентом. В пользу этого также говорят обнаруженные Биверсом и др. (1979) вспышки в U-полосе во время затмения белого карлика. Янг и др. (1991) отмечают, что сразу после вспышек появляются сильносмещенные компоненты H_{α} , которые возникают около холодного компонента. По-видимому, порождающая их материя была выброшена во время вспышки. Об обнаружении корональных выбросов массы у К-компонента системы сообщили Бонд и др. (2001). Особенно ярко выражена переменность V471 Tau в радиодиапазоне (медленная переменность и вспышки). Все данные указывают на взаимодействие компонентов системы. Но это не перетекание вещества с аккрецией, а взаимодействие магнитосфер, связанное с активностью вторичного компонента (Петерсон и др., 1993; Лим и др., 1996). Такие крупномасштабные магнитные структуры могут переносить массу, которая полностью или частично будет аккрецироваться белым карликом.

В работе Блич и др. (2002) изучались проявления хромосферной активности у двойных систем, прошедших фазу CE. Авторы отмечают, что вторичные компоненты в этих системах, имеющие, как правило, конвективные оболочки или глубокие конвективные зоны, способны генерировать магнитное поле динамо-эффектом. Индикатором наличия магнитного поля и магнитной активности позднего компонента является присутствие в его спектре линии $D_3 HeI(\lambda 5876\text{\AA})$. Эта линия присутствует в спектрах многих РСВ.

Имеется небольшая группа РСВ, главным компонентом в которых является горячий субкарлик sdB-типа. Такие субкарлики часто оказываются пульсаторами. В частности, у PG 1336-018 пульсации наблюдаются все время, кроме главного затмения, когда горячий компонент не виден. Периоды пульсаций 184 и 141 с, амплитуды — 0^m01 и 0^m005 (Килкенни и др., 1998). Возможно, что временами пульсации наблюдаются также у VE UMa.

3. Спектральные характеристики РСВ

Общий вид спектра зависит от спектральных классов обоих компонентов и от соотношения их блеска. В коротковолновой области преобладает излучение главного компонента. Там наблюдаются аб-

сорбционные линии водорода, как правило, с узкой центральной эмиссией, HeI и HeII тоже часто с эмиссией в центре, линии элементов C, N, O, Si в разных стадиях ионизации от III до V, иногда линии высокоионизованного Fe. Например, в спектре BD+50°2869 присутствуют линии FeVII, а в спектре HD 49798 — линии FeV. Длинноволновая область спектра по большей части формируется красным компонентом. Здесь присутствуют линии водорода, многочисленные абсорбционные линии нейтральных и однократно ионизованных металлов (Fe, Ti, Ni, V, Mg, Co, Na, Ca, Y, La), полосы поглощения молекул TiO (чаще всего), CaH, FeH. Часто видны эмиссионные линии элементов C, N, O от II до V стадии ионизации, CaII, HeI и HeII, эмиссия в центре водородных линий, а также эмиссионные линии металлов в разной степени ионизации.

Спектр конкретной системы зависит не только от соотношения блеска компонентов, но также от соотношения и разности температур между ними, хромосферной активности вторичного компонента. Как отмечалось ранее, у многих РСВ сильно выражен эффект облучения. Вследствие этого в спектре вторичного компонента появляются разнообразные эмиссионные линии, не соответствующие его спектральному классу.

Кроме эффекта облучения, причиной появления эмиссионных линий может быть хромосферная активность вторичного компонента. Различить эти эффекты довольно просто: при облучении сила эмиссий меняется с фазой орбитального периода, достигая максимума в верхнем соединении красного карлика, когда к наблюдателю обращена его перегретая сторона. При хромосферной активности сила эмиссий не меняется с фазой, но может меняться со временем. Примеры ярко выраженной активности можно наблюдать у FF Aqr, Case I, HZ9, BD+26°2405, RE 1629+780, PG 1026+002, BPM 71214, EC 13471-1258. У последней наблюдалась даже вспышка в H_{α} (Кафка и др., 2002). У некоторых систем проявляется и хромосферная активность вторичного компонента и эффект его облучения (F24, VE UMa, V471 Tau, UU Sge, V477 Lyr, BD-22°3467, RE 2013+400, RE 1016-053, GD 245, FF Aqr, PG 1026+002, BPM 71214).

В 18-ти случаях из 50-ти (36%) вторичный компонент является активным красным карликом. Если же принимать во внимание только те системы, для которых что-то известно о вторичном компоненте, то эта доля возрастет до 56%. Следовательно, можно утверждать, что не менее чем у половины РСВ-систем вторичный компонент представляет собой хромосферно-активный красный карлик.

В спектрах некоторых РСВ заметны следы око-

лозвездного вещества. Возможно, что это проявление остатков СЕ или начала аккреции. Например, у F24 временами наблюдается широкая раздвоенная эмиссия H_α (Веннес, Торстенсен, 1994). Центральное обращение слишком велико, поэтому не может возникнуть в результате поглощения в атмосфере. В ультрафиолетовом спектре этой же системы у линий CIV, SiIV, NV наблюдается компонент, соответствующий скорости ~ 1 км/с. Он возникает внутри системы в газе, возбуждаемом белым карликом. Что-то вроде стремгеновской зоны (Дюпре, Раймонд, 1982). У системы EC 11575-1845 в некоторых фазах водородные линии раздвоены, взаимное положение эмиссии и абсорбции меняется (Экстер и др., 2005). Вокруг системы VE UMa обнаружены остатки туманности, которая видна в линиях H_α и $\lambda 5007\text{\AA}$ [OIII] (Либерт и др., 1995; Бонд, 1999). В ее спектре временами появляется раздвоенная H_α с расстоянием между пиками 140 км/с (Крэмpton и др., 1983). Торстенсен и др. (1996) по форме профилей линий $\lambda 1550\text{\AA}$ CIV и $\lambda 1640\text{\AA}$ HeII в спектре RE 1016-053 предположили существование околозвездной материи в системе. В спектре RE 0720-318 у этих же линий имеется компонент, смещенный от ядра основной линии на +50 км/с (Добби и др., 1999). Авторы считают, что эти компоненты возникают в межзвездных облаках. Однако Берли и др. (1997) и Дьюруис и др. (1997) утверждают, что это проявление остатков СЕ, возможен также небольшой перенос массы.

У многих РСВ-систем имеются признаки выброса вещества обоими компонентами. V651 Mop беспорядочно меняет блеск из-за того, что субкарлик sdO временами выбрасывает вещество (Аккер, Ясниевич, 1986). В ультрафиолетовом спектре системы HD 49798 линии NV имеют профиль типа РСуг. При этом абсорбция так сильна, что указывает на отток материи $\dot{M} \approx 10^{-9.3} M_\odot/\text{год}$ со скоростью 1350 км/с, что много больше скорости убегания (Хейман и др., 1981). В системе V471 Tau красный карлик активно теряет вещество в виде холодного ветра. В результате этого у многих абсорбционных линий временами появляется смещенный компонент. Смещение сравнимо, а иногда больше скорости убегания. Потеря массы составляет при этом $\dot{M} \geq 2 \cdot 10^{-11} M_\odot/\text{год}$ (Бравейлер, Сион, 1986; Маллан и др., 1989). Кроме ветра, Янг и др. (1991) обнаружили вещество вокруг красного компонента, которое существует, по-видимому, как околозвездный диск. Это вещество проявляется смещенными эмиссионными компонентами линии H_α . Они сохраняются несколько дней и затем исчезают. Белый карлик в V471 Tau аккрецирует лишь небольшую часть вещества, теряемого вторичным компонентом, $\sim 4 \cdot 10^{-18} M_\odot/\text{год}$ (Сион и

др., 1998).

Можно привести еще немало примеров, косвенно указывающих на то, что РСВ-системы содержат материю, оставшуюся от СЕ-фазы или теряемую компонентами системы.

4. Главные компоненты РСВ

В табл.1 приведена 51 система, из них 20 имеют главным компонентом субкарлики: sdO (12 систем), sdB (6 систем) и sdOB (2 системы), 26 систем содержат белые карлики, причем 6 из них горячие — типа DAO. 12 из 14 центров планетарных туманностей являются звездами типа O (sdO или O_f), одна sdOB и одна DAO. Особняком стоят V664 Cas, VE UMa и VW Pux. Они окружены туманностями, но имеют эмиссионные спектры. К обсуждению этих систем мы вернемся при сравнении РСВ и CV.

Понять многие особенности главных компонентов может помочь рассмотрение их эволюции. Более массивный компонент широкой пары заполняет свою полость Роша после достижения стадии красного гиганта (RG) или асимптотической ветви гигантов (AGB). В результате образуется общая оболочка (СЕ). В первом случае, как показали Бонд и Ливио (1990), вероятно слияние ядра RG со вторичным компонентом, так как выбрасываемая материя будет концентрироваться в основном в экваториальной плоскости. Существуют, однако, обстоятельства и процессы, которые могут воспрепятствовать слиянию, например, большая масса вторичного компонента, локальные выбросы вещества с большой скоростью, эффективная передача энергии в оболочку, большой наклон оси вращения главного компонента к плоскости орбиты и др. Если СЕ будет сброшена, и вновь образовавшаяся система всплывет, то ее разделение и период будут значительно уменьшены.

Во втором случае, когда образование СЕ происходит на стадии AGB, слияние также вероятно, так как выброс массы хотя и происходит симметрично, но ее количество значительно больше, чем на стадии RGB. Разделение всплывшей из СЕ системы и ее период будут также значительно уменьшены.

Вопрос о том, когда сбрасывается СЕ, не всегда может быть решен однозначно. Проведенное нами исследование форм и параметров планетарных туманностей, в центре которых находится тесная двойная система типа РСВ, привело к заключению, что, вероятнее всего, это происходило на стадии RG (Войханская, 2002). Формирование и эволюцию двойных ядер планетарных туманностей рассмотрели Ибен и Титуков (1993). Они продемонстрировали большое разнообразие вариантов

эволюции в зависимости от начальных условий. В частности, они показали, что горячий главный компонент может сохранять высокую светимость намного дольше, чем видна планетарная туманность, в некоторых случаях до 10^8 лет.

После сброса SE главный компонент отделен от своей полости Роша и эволюционирует как одиночная звезда. На вершине RGB в его ядре происходит гелиевая вспышка — начало горения гелия в ядре, после чего он перемещается на горизонтальную ветвь (HB) диаграммы Герцшпрунга-Рассела (H-R). Где именно на HB окажется звезда — зависит от количества потерянной массы на стадии RG. Дальнейшая эволюция от HB нулевого возраста (ZAHB) до выхода на кривую охлаждения белых карликов зависит от многих параметров, но ключевой среди них — масса оболочки. Именно она определяет свойства звезды с горящим гелиевым ядром. Дорман и др. (1993) рассчитали большое количество моделей, описывающих эволюцию от ZAHB до белого карлика и учитывающих многие параметры. Очень упрощенно ситуацию можно охарактеризовать так: более массивные звезды, сохранившие достаточно мощную оболочку, будут эволюционировать до верха AGB, непрерывно теряя вещество, пройдут стадию тепловых пульсаций и затем при почти постоянной высокой светимости ($\lg(L/L_\odot) \geq 3.5$) дойдут до линии охлаждения белых карликов. Где-то в начале пост-AGB-трека они пройдут фазу общей оболочки, сбросят ее и образуют планетарную туманность. Звезды средних масс проэволюционируют до AGB, но уйдут с нее раньше. Это объекты ранней пост-AGB последовательности (P-EAGB). И наконец, маломассивные звезды с пренебрежимо малой оболочкой проэволюционируют сразу в белые карлики. Это объекты AGB-manque, т.е. несостоявшиеся AGB.

Объекты P-EAGB и AGB-manque называются экстремальными объектами горизонтальной ветви (ЕНВ). Они имеют высокую температуру и поэтому являются источниками ультрафиолета и мягкого рентгена. Кроме того, если в процессе эволюции у объектов P-EAGB и AGB-manque разовьется углеродно-кислородное ядро массой $0.56-0.61M_\odot$ и выше, то над ним загорится основание гелиевой оболочки. Такие объекты становятся яркими источниками мягкого рентгена. Все это объясняет существование большого количества горячих субкарликов левее главной последовательности на диаграмме H-R. Макстед и др. (2001) показали, что доля двойных систем на ЕНВ велика и составляет $\sim 70\%$. Основной вывод из их работы: именно эволюция двойных систем является фундаментальным процессом, который приводит к образованию ЕНВ-звезд.

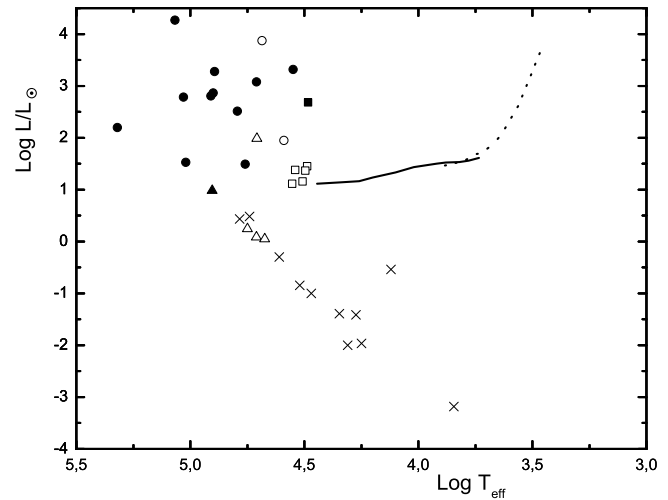


Рис. 1: Диаграмма светимость-температура для главных компонентов PCB (кружки — sdO , квадратики — sdB , треугольники — DAO , крестики — DA). Сплошная линия — ZAHB, штриховая — AGB из работы Дормана и др. (1993). Заполненными значками обозначены центры планетарных туманностей.

На рис.1 показано расположение главных компонентов PCB на диаграмме светимость-эффективная температура. Там же указано среднее положение горизонтальной ветви нулевого возраста (сплошная линия) и AGB (штриховая линия) из работы Дормана и др. (1993). Заполненными значками отмечены центральные звезды планетарных туманностей. Видно, что в среднем они ярче объектов, туманности вокруг которых уже рассеялись. Это естественно объясняется их меньшим возрастом. Хорошо заметна линия охлаждения белых карликов. Обращает на себя внимание то, что почти все объекты расположены в области ЕНВ и далеко от AGB. Возможное объяснение этому в том, что во время SE-фазы на стадии AGB более вероятно слияние компонентов системы. О такой возможности говорят Ибен и Тутуков (1993). А основная масса PCB, пройдя фазу SE на стадии RG, становится экстремальными объектами ЕНВ и эволюционирует как AGB-manque или P-EAGB. В пользу этого говорит малая масса главных компонентов в PCB и то, что многие PCB оказались заметными источниками ультрафиолета и мягкого рентгена, когда соответствующие наблюдения проводились. Тем не менее часть объектов высокой светимости, $\lg(L/L_\odot) \geq 3$, вероятно, эволюционировала до верха AGB.

Сравнение с одиночными белыми карликами показало, что в большинстве случаев они похожи, т. е. на эволюционных диаграммах их положения близки. Однако имеется большая группа РСВ, главные компоненты которых характеризуются малой величиной $\log g$. На рис.1 они расположены в верхней части диаграммы и еще не дошли до линии охлаждения, а некоторые находятся на EZАНВ. Все они являются субкарликами О или В. Объекты с высокой температурой $T_{eff} > 60000 K$ оказались центральными звездами планетарных туманностей, а с $T_{eff} \leq 50000 K$ являются, по-видимому, гелиевыми ядрами с горячей водородной оболочкой. Соответственно их радиусы одни из самых больших. Сравнение распределения масс одиночных белых карликов в различных выборках (Берджерон и др., 1992) с распределением масс белых карликов в РСВ показало их похожесть: максимум распределения приходится на область $0.5-0.6 M_{\odot}$.

Для некоторых РСВ получены кривые лучевых скоростей обоих компонентов. Оказалось, что их систематические скорости (γ -скорости) всегда различны. Обычно это объясняется гравитационным красным смещением излучения от белого карлика. Если это так, то по разнице $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_2$ можно вычислить гравитационный потенциал белого карлика и напрямую оценить его массу и радиус. Величины $\log g$ взяты из табл.1. Полученные оценки подтверждают результат из уже упоминавшейся работы Берджерона и др. (1992), что массы и радиусы, определенные спектроскопически (по моделям) и по гравитационному красному смещению, хорошо согласуются между собой. Оказалось, однако, что метод гравитационных красных смещений применим не всегда. Для трех систем — центров планетарных туманностей (V477 Lyr, UU Sge, KV Vel) — этот метод дал нереальные массы, а иногда их нельзя вычислить, так как $\Delta\gamma < 0$. Такая же ситуация для систем BPM 6502 (нереально большая масса), RG 1224+309 (нереально малая масса) и EC 11575-1845 ($\Delta\gamma < 0$). Кроме того, у некоторых систем обнаружилась переменность величины $\Delta\gamma$, уверенно превышающая указанные ошибки измерений (HZ9, GD448, RE 1016-053, RE 0720-318, V 664 Cas). Выяснилось, что во всех случаях изменения $\Delta\gamma$ менялась скорость вторичного компонента γ_2 , а изменения γ_1 были в пределах ошибок. Это указывает на существование каких-то движений вещества, влияющих на величину лучевой скорости вторичного компонента. Скорее всего, это движения, обусловленные его хромосферно-корональной активностью.

По наблюдениям в ультрафиолете и мягком рентгене количество белых карликов оказалось примерно на порядок меньше, чем ожидалось.

Причиной этого является дополнительная непрозрачность, которую создают гелий и тяжелые элементы, присутствующие в атмосферах в очень небольших количествах. Изучение химического состава атмосфер одиночных белых карликов типа DA (Барстоу и др., 2003) показало, что при $T_{eff} > 50000 K$ тяжелые элементы присутствуют всегда. При $T_{eff} \leq 50000 K$ наблюдается разделение на звезды с чисто водородной оболочкой и звезды с обнаружимым количеством тяжелых элементов. К сожалению, данных о химсоставе главных компонентов РСВ очень немного и сделать полноценное сравнение с одиночными белыми карликами трудно. У системы F24 с нормальным белым карликом типа DA во всех случаях величины $[X/H]$ были такие же, как у одиночных звезд (Уэсмейл и др., 1984; Веннес и др., 1992, 2000; Барстоу и др., 2003). У четырех систем (RE J0720-318, RE J1016-053, REJ2013+400, BD-22°3467) главным компонентом являются карлики типа DAO. В их атмосферах наблюдается повышенное содержание углерода, а у BD-22°3467 повышено также содержание элементов O, Si, Fe, Ni по сравнению с одиночными белыми карликами (Добби и др., 1999; Торстенсен и др., 1994; Хералд и Бианши, 2002). Наконец, у системы UX CVn главный компонент — субкарлик sdV и в его атмосфере повышенное содержание C и O (Шиманский, 2002).

Таким образом, можно предположить, что химсостав атмосфер главных компонентов РСВ может отличаться большим разнообразием в зависимости от их эволюционного состояния. Более поздние белые карлики типа DA, вероятно, будут похожи на одиночные звезды.

Как известно, элементы тяжелее гелия начинают синтезироваться после полного выгорания водорода в ядре. При этом в маломассивных звездах ($M \leq 10 M_{\odot}$) гелий превращается главным образом в углерод. Избыток его в атмосферах 5-ти из 6-ти исследованных главных компонентов РСВ является дополнительным аргументом в пользу утверждения, что большинство из них являются экстремальными объектами горизонтальной ветви.

Вопрос о способах попадания тяжелых элементов в атмосферу и поддержания в ней, несмотря на активную дискуссию, пока не ясен. В работе Барстоу и др. (2003) доказывается, что таким механизмом может быть радиативная левитация. Расчеты Веннеса и др. (1988), напротив, показывают, что левитация не может поддержать в атмосфере даже гелий в нужном количестве. Вместо нее предлагается диффузия. Кроме того, возможна аккреция из межзвездной среды, а в случае двойных систем — аккреция слабого звездного ветра от вторичного компонента или остатков выброшенной ранее

материи. Еще одну возможность указали Лим и др. (1996): крупномасштабная магнитная структура красного карлика может переносить массу, которая полностью или частично аккрецируется белым карликом. Возможно слабое истечение вещества (Берджерон и др., 1994) с поверхности белого карлика, что может объяснять, в частности, повышенное содержание гелия в атмосфере и его равномерное распределение по высоте. В пользу истечения говорит обнаружение абсорбционных линий FeVII в спектрах некоторых ядер планетарных туманностей, горячих субкарликов и вырожденных объектов (Файбелман и Бравейлер, 1990). Они сопровождаются сильными линиями Si III λ 1206 и NiI1200 (триплет). Лучевые скорости SiIII, NI и FeVII сильно коррелируют, а в некоторых случаях линии SiIII и NI имеют профиль типа P Cug. Из РСВ линии FeVII обнаружены у KV Vel и BD+50°2869. Очевидно, что в разных случаях действуют разные механизмы появления в атмосфере тяжелых элементов или их комбинация.

В заключение можно сказать, что главные компоненты РСВ, по-видимому, представляют собой довольно однородную группу объектов на разной стадии эволюции: одни уже вышли на линию охлаждения белых карликов и движутся в низ HR-диаграммы, другие еще не дошли до этой линии. Это может частично объяснить разницу их свойств.

5. Вторичные компоненты

Точный спектральный класс вторичного компонента известен примерно у половины РСВ. В подавляющем числе случаев — это М-карлики. Специальный поиск пар WD-М-карлик, предпринятый по результатам слоновского (SDSS) обзора неба, позволил составить выборку из 109 пар (Рэймонд и др., 2003). Предварительное изучение показало, что большинство вторичных компонентов имеет спектральный класс М3–М5 с максимумом на М4. Этот результат подтверждается данными табл.1.

Ранее, при описании фотометрических и спектральных свойств РСВ, отмечалось, что вторичные компоненты многих систем отличаются повышенной активностью. Она проявляется во вспышках блеска и других явлениях, указывающих на хромосферную и корональную активность: эмиссионных линиях, выбросе вещества, пятнах на поверхности (Блич и др., 2002). Активность может быть как собственная, так и спровоцированная облучением от горячего главного компонента. Если вторичный компонент достаточно позднего спектрального класса и низкой светимости, то поток жесткого излучения от главного компонента мо-

жет заметно повлиять на его блеск и спектр. Признаками облучения в двойной системе являются синхронные изменения блеска и интенсивности некоторых спектральных линий, а также изменение спектра и цвета облучаемой звезды с изменением фазы орбитального периода. Кроме того, потемнение к краю будет сильнее, чем у обычных звезд. Все эти признаки наблюдаются у РСВ.

Процесс облучения атмосферы нормальной звезды жестким излучением рассмотрен Баско и Сюняевым (1973), Баско и др. (1974), Сахибулиным и Шимановским (1997). В первых двух работах показано, что результат облучения зависит от глубины проникновения жесткого излучения в атмосферу нормальной звезды, т. е. от энергии квантов. В нашем случае энергия квантов невелика (ультрафиолет и мягкий рентген) и процесс их поглощения будет очень эффективен. Это приведет к изменениям в линейчатом спектре (появятся эмиссии He и тяжелых элементов), а изменения блеска перегретого бока будут невелики. В третьей работе рассмотрены изменения линейчатого спектра с применением метода моделей атмосфер. Ее результаты не противоречат первым двум и позволили определить параметры облучаемой звезды. Избыток блеска перегретой стороны вторичного компонента должен зависеть от величины $T_1^4 R_2^2 / a^2$, где T_1 — эффективная температура горячего компонента, R_2 — радиус вторичного компонента, a — расстояние между ними. Действительно, положительная корреляция между этими величинами существует, но коэффициент корреляции мал, что отражает разнообразие условий в конкретных системах.

Одним из проявлений собственной активности красного карлика является эмиссия в линиях и континууме от горячего газа в хромосфере и короне. Количественно активность характеризуется величинами L_α / L_{bol} и L_x / L_{bol} , где L_α — светимость в линии H_α , L_x — в рентгене. Для одиночных активных dM_e -звезд $L_x / L_{bol} \simeq 1-3 \cdot 10^{-3}$. Для Солнца, даже на пике активности, это отношение не более 10^{-5} . Величина $L_\alpha / L_{bol} \simeq 10^{-4}$ для dM_e -звезд, что на 2–3 порядка больше, чем для Солнца. Таким образом, dM_e -звезды намного эффективнее прогревают свои хромосферы и короны до температур выше фотосферных, чем обычные красные карлики, что обусловлено их магнитной активностью.

Радионаблюдения показали, что корональные арки и петли простираются на расстояния до нескольких радиусов звезды (до 2–4) и могут взаимодействовать с магнитным полем белого карлика. Т. е. радиокороны dM_e -звезд намного протяженнее, чем у Солнца и, кроме того, они более плотные и горячие — до 10^8 К (Бенц и др., 1998; Песталоцци

и др., 2000; Калли и др., 1995).

Собственная хромосферно-корональная активность является самым общим проявлением присутствия магнитных полей в холодных звездах. Предполагается, что магнитное поле в них генерируется динамо-процессом. Эмпирическим проявлением этого считается четко выраженная положительная корреляция между магнитными и угловыми моментами звезд (Аржди и др., 1995). Многочисленные исследования показали, что уровень активности холодных карликов не зависит ни от скорости их вращения, ни от светимости. Объясняется это тем, что связь между характеристиками активности и самим магнитным полем весьма опосредствована.

Измерение магнитных полей у красных карликов — очень трудная задача. Тем не менее поля до 3–5 кГс у них обнаружены (см., например, Джанз-Крал и Вейленти, 1996). Возможно, что у неактивных dM-карликов поля несколько меньше.

В работе Маллана и МакДональда (2001) рассмотрены модифицированные модели, учитывающие магнитные поля, чтобы выяснить их влияние на структуру маломассивных звезд. Показано, что магнитоактивные dM_e -звезды статистически отличаются от неактивных dM по своим глобальным свойствам. На диаграмме $T_{eff} - R$ карлики dM_e и dM располагаются по-разному: при одинаковой T_{eff} и светимости dM_e имеют большие радиусы (в 2–3 раза) и более красный цвет.

Многие системы, приведенные в табл.1, обладают заметной, но небольшой собственной активностью. К сожалению, данных о них не хватает. На диаграмме $T_{eff} - R$ M-карлики РСВ располагаются между dM_e и dM, но в основном ближе к первым. О заметном влиянии магнитного поля на глобальные характеристики звезд говорят также результаты расчетов Кука и др. (2003).

Рэймонд и др. (2003) попытались сравнить активность красных карликов в РСВ с активностью карликов поля. В качестве мерил активности использовалась величина L_x/L_{bol} . В результате получили, что доля активных карликов и величина активности в интервале M0–M4 как будто выше у РСВ, чем среди звезд поля.

Хотя большинство вторичных компонентов РСВ имеет спектральный класс M, встречаются и другие: A5V (V651 Mon), G5-8 IV-V, K0-5V. Об их собственной активности сведений нет, кроме хорошо изученной системы V471 Tau. Вторичный компонент в ней (K2V) демонстрирует сильную хромосферно-корональную активность: вспышки блеска, темные пятна, покрывающие до 25% поверхности, выбросы корональных масс до $\geq 2 \cdot 10^{-11} M_{\odot}/\text{год}$, ветер со скоростью, сравнимой и большей скорости убегания. Корональные петли

K-звезды, которые находятся между звездами, взаимодействуют с магнитным полем белого карлика (Калли и др., 1995). Кроме того, ее радиус больше радиуса звезд главной последовательности такого же спектрального класса, что типично для активных красных карликов (Рамзиер и др., 1995; Маллан и др., 1989; Бравейлер и Сион, 1986; Бонд и др., 2001).

Таким образом, вторичные компоненты РСВ — карлики позднего спектрального класса. Для многих из них, а может быть, для всех, характерна сильная хромосферно-корональная активность. Это придает системам РСВ большое своеобразие и разнообразие.

6. Сравнение РСВ и CV

При сравнении характеристик этих систем, определяемых непосредственно из наблюдений (P , M_1 и M_2 , $q = \frac{M_1}{M_2}$, a), для большей выразительности использовались гистограммы, нормированные на свой максимум. Характеристики CV брались из каталогов Риттера (1990) и Черепашука и др. (1996). Далее период P измеряется в днях, массы компонентов M_1 и M_2 — в долях массы Солнца, расстояние между ними a — в радиусах Солнца.

Распределение периодов показано на рис.2. У CV это хорошо известное бимодальное распределение. Интересно, что у отдельных типов CV бимодальность не наблюдается. Она проявляется при объединении всех объектов. Пик коротких периодов ($P < 2^h$) создается звездами типа SU UMa и полярами, все остальные типы CV и немногие поляры дают пик длинных периодов ($P > 3^h$). В распределении периодов РСВ бимодальность также заметна, хотя выражена не так четко, как у CV. Замечательно, что экстремумы обеих гистограмм находятся в противофазе: максимум одной совпадает с минимумом другой. Имеет ли эта антифазность физический смысл, сказать пока трудно. Но ясно, что бимодальность обусловлена эволюцией систем, возможно, отчасти свойствами прародителей.

Распределение масс компонентов, их отношения и общей массы системы показано на рис.3. Хотя интервал масс у обеих групп звезд примерно одинаков, хорошо видно, что РСВ в среднем менее массивны, особенно вторичные компоненты. Очень хорошо это заметно при сравнении полных масс систем. В интервал от 0.4 до 1 попадает 76% РСВ и 55% CV.

Распределение отношения масс $q = M_1/M_2$ у CV более крутое: в максимум распределения (от 1 до 2) попадает 42% CV и 30% РСВ. В обеих группах звезд менее 10% систем (7–8%) имеют $q < 1$. Как правило, $M_1 > M_2$ и $q > 1$.

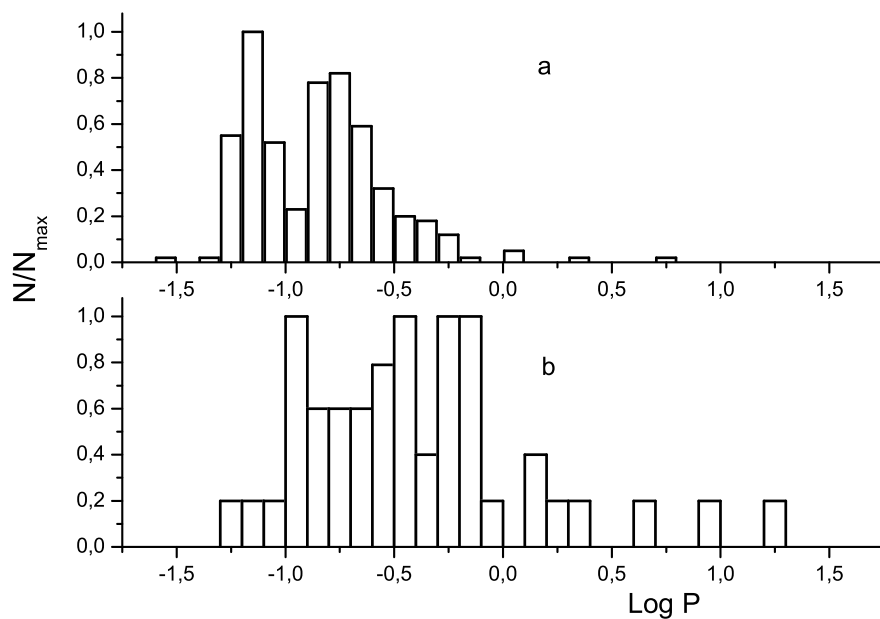


Рис. 2: Сравнение распределения орбитальных периодов CV (a) и PCV (b).

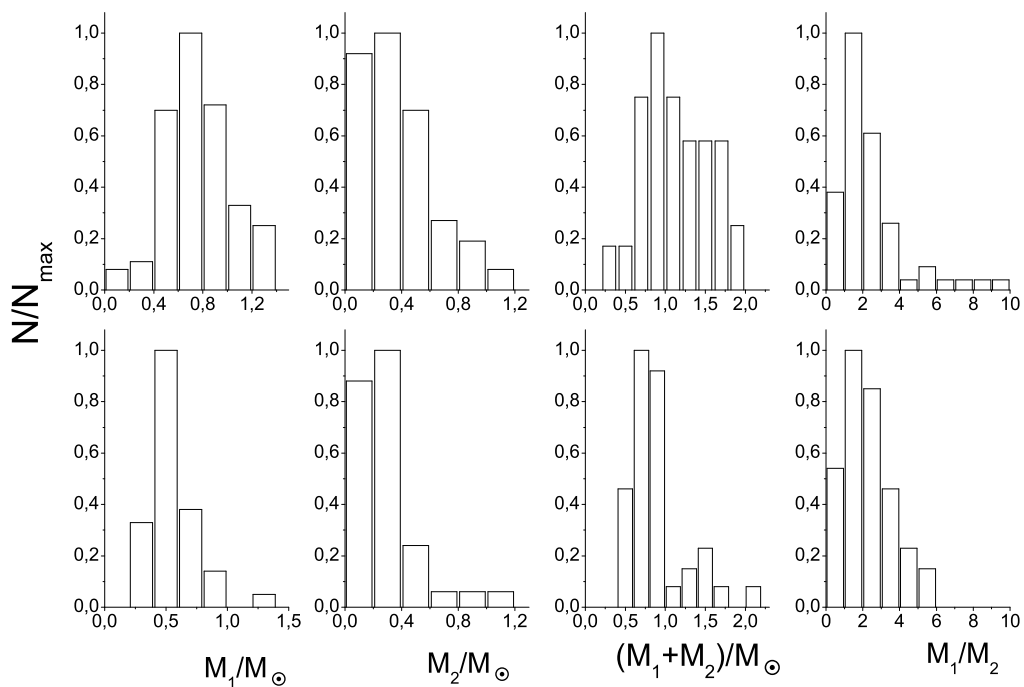


Рис. 3: Сравнение распределения масс компонентов, их отношения $q=M_1/M_2$ и полной массы системы CV (вверху) и PCV (внизу).

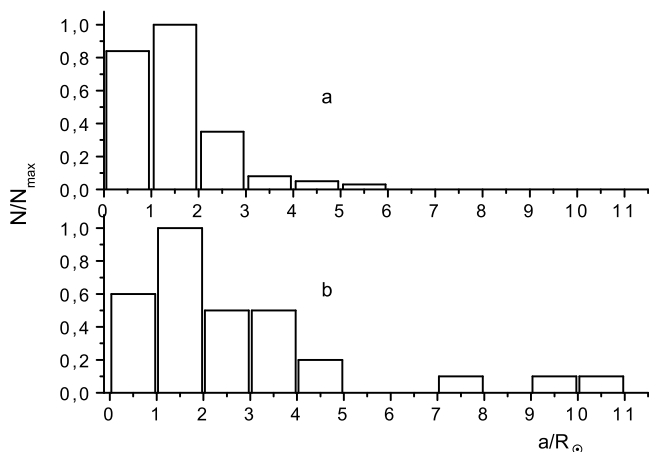


Рис. 4: Распределение расстояний между компонентами систем CV (a) и РСВ (b).

Сравнение распределения расстояний между компонентами (рис.4) показало, что у CV оно в среднем меньше. Кроме того, в распределении РСВ заметен длинный “хвост” в сторону больших расстояний. Значимой разницы между системами, окруженными планетарными туманностями, и без них, не наблюдается.

Таким образом, РСВ в среднем представляют собой менее массивные и более широкие пары. Ни одна из характеристик обеих групп систем не показала бимодального распределения, аналогичного распределению периодов.

Далее была сделана попытка найти соотношения между основными характеристиками CV и РСВ и сравнить их между собой.

Соотношение между M_1 и M_2 у CV не обнаруживается ни для отдельных типов систем, ни при обобщении всех данных. На диаграмме $M_1 - M_2$ CV занимают область, ограниченную осью и прямой $M_2 = 1.52M_1 - 0.12$ (или $M_1 = 0.66M_2 + 0.08$). Это значит, что величина M_2 ограничена сверху, и это же дает предельное отношение масс. РСВ попадают в ту же область диаграммы. Разницы в положении систем — центров планетарных туманностей и систем без туманностей — практически нет. В отличие от CV, для РСВ как будто бы есть корреляция между M_1 и M_2 , которую можно записать как $M_2 = 0.9M_1 - 0.28$, но точек мало и разброс их велик.

Известно, что красные карлики малых масс (≤ 0.3) полностью конвективны. Оказалось, что относительное количество систем с $M_2 \leq 0.3$ среди РСВ примерно в 4 раза больше, чем среди CV. У CV маломассивный вторичный компонент имеют

все системы, образующие пик коротких периодов.

Соотношения $P - M_1$ нет ни для CV, ни для РСВ. На диаграмме $P - M_1$ CV занимают сектор, ограниченный осью абсцисс и прямой $P = 0.757M_1$ (или $M_1 = 1.32P$). Провал периодов никак не выделен.

Соотношение $P - M_2$ выражено четко у обоих типов систем. Для CV оно может быть описано прямой $M_2 = 2.53P - 0.02$ для $M_2 \geq 0.1$. Для $M_2 < 0.1$ $P = 0.05$ или 72 минуты, что близко к теоретическому пределу периодов для CV. Провал периодов заметен как почти полное отсутствие вторичных компонентов в интервале масс 0.24–0.29. Именно в этом интервале масс происходит переход от лучистых конфигураций к полностью конвективным. Можно отметить еще две области малого количества систем: $M_2 \simeq 0.45$ и 0.65. Они приходятся на второй максимум в распределении периодов и, возможно, объясняются наблюдательной селекцией.

У РСВ период очень быстро убывает с уменьшением M_2 . Для величины $M_2 < 1$ уменьшение можно описать как $P = 2.22M_2 - 0.02$. Но разброс точек гораздо больше, чем в случае CV. Разницы между системами, окруженными туманностями и без них, не наблюдается.

Таким образом, на величину периода влияет масса вторичного компонента и практически не влияет масса главного.

Соотношение $a - M_1$ заметно различается для CV и РСВ. У первых a возрастает с увеличением M_1 и может быть описано как $a = 1.41M_1 + 0.3$. Создается впечатление, что для разных типов CV связь между a и M_1 несколько разная, но разброс точек слишком велик, чтобы можно было утверждать это уверенно. Тем не менее, для звезд типа SU UMa можно получить $a = 0.293M_1 + 0.527$, т. е. гораздо более пологую зависимость.

Возрастание a с M_1 , возможно, является следствием переноса массы: от менее массивного вторичного компонента к более массивному главному. Величина a , возможно, обусловлена особенностями эволюции в фазах SE.

У РСВ никакой связи между a и M_1 нет.

Соотношение $a - M_2$ у CV очень четкое. Все типы CV образуют общую зависимость $a = 2.29M_2 + 0.35$. Исключение составляет GK Per (N Per 1901 г.). Возможно, аномалия связана со взрывом новой, во время которого могло возрасти расстояние между компонентами, а их массы могли уменьшиться.

В случае РСВ можно уверенно сказать, что a растет с увеличением M_2 . Однако разброс точек так велик, что о функциональной зависимости можно осторожно говорить только в случае малых

масс $M_2 \leq 0.4$

$$a = 11.36M_2 - 0.23.$$

Соотношение a – P . Для обоих типов систем P уменьшается с уменьшением a . В случае CV изменение P можно описать как $P=0.127a$. У РСВ при больших a величина P очень быстро убывает, по-видимому, по нелинейному закону. При $a < 8$ уменьшение P замедляется и для $1 < a < 5$ изменение может быть описано как $P=0.245a - 0.095$. Интересно, что при $a \leq 1$ кривая выходит на асимптоту 0.1 , т.е. 2.4 часа. Это область провала периодов.

Итак, соотношения между характеристиками систем обоих типов при некотором их различии в целом похожи. Исключение составляет соотношение между a и M_1 . У РСВ между этими величинами связи нет, у CV величина a растет с увеличением M_1 . Вероятнее всего, что это изменение обусловлено длительным процессом аккреции, который идет в CV и отсутствует у РСВ.

На рис.5 показано распределение полных моментов вращения μ у РСВ, систем типа SU UMa и U Gem. Чтобы числа, указанные на оси абсцисс, перевести в единицы MKS [г·см²/с], их надо умножить на $7 \cdot 10^{50}$. Видно, что системы типа U Gem имеют в среднем большие моменты, чем два других типа. Системы, окруженные планетарными туманностями, не отличаются от прочих РСВ. На рис.6 показано распределение собственного момента вращения компонентов в процентах от полного момента системы. Как и в предыдущем случае (рис.5), компоненты систем типа U Gem обладают большим моментом, чем компоненты РСВ и систем типа SU UMa. Но во всех случаях основная часть момента вращения заключена в орбитальном движении: $\mu_{orb} \gg \mu_1 + \mu_2$.

При вычислении величин μ вращение компонентов считалось синхронным с орбитальным. Для РСВ это утверждение не очевидно. К сожалению, данных о скоростях вращения компонент РСВ в литературе очень мало. На рис.7 сопоставлены периоды осевого вращения вторичных компонентов P_2 и орбитального периода P с величиной массы вторичного компонента. Видно, что $P \geq P_2$. С уменьшением величины M_2 разница между ними уменьшается и при $M_2 \leq 0.3$ наступает синхронизм. Такое изменение P_2 хорошо понятно в рамках представлений о торможении в SE. Данных о вращении главных компонентов еще меньше, но похоже, что тенденция такая же: с уменьшением P разница между P_1 и P_2 уменьшается до синхронизации вращения.

Из вышесказанного ясно, что ни одна из характеристик РСВ, наблюдаемая или вычисленная, не

отличается существенно от соответствующей характеристики CV. Ни одна из характеристик не обнаружила бимодального распределения, подобного распределению периодов. Значит, причину разницы между системами надо искать в их эволюции.

Расчеты моделей двойных систем показывают, что при очень больших расстояниях a между компонентами система устойчива. По мере их сближения устойчивость сохраняется, пока величина μ убывает. Когда при продолжающемся сближении компонент μ начинает возрастать, конфигурация становится неустойчивой. Если отношение M_1/M_2 велико, то при сближении компонент меняться будет в основном скорость вращения вторичного компонента. Минимальная величина момента μ_{min} будет достигнута при максимальной скорости вращения. Это условие позволяет оценить предельное расстояние l_0 , при котором система остается еще устойчивой:

$$l_0 = 2.4554 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/3} R_2, \quad (*)$$

где ρ — плотность компонентов.

Если $a < l_0$, система становится неустойчивой. Во всех случаях, когда соотношение (*) можно было применить к системам CV, условие $a < l_0$ выполнялось. В случае, когда величины M_1 и M_2 одного порядка, вычисление момента затруднено тем, что радиусы компонент будут изменяться со скоростью вращения. Однако основная (орбитальная) часть момента будет $\sim \sqrt{a}$. И в этом случае также должно существовать некоторое расстояние, аналогичное пределу Роша. При $a < l_0$ никаких равновесных устойчивых конфигураций существовать не будет. Вычисления показали, что состояние “ μ_{min} ” наступает до контакта фигур, т.е. до момента наибольшего возможного сближения. Поэтому контактные конфигурации моделей Роша будут неустойчивы. Сравнение величин a с вычисленным пределом устойчивости (Крат, 1950) показало, что всегда для CV $a < l_0$, для РСВ $a > l_0$. В справочнике Черепашука и др. (1996) приведены радиусы Роша R_0 для вторичных компонентов РСВ. Во всех случаях $R_0 < a$ в несколько раз. Таким образом, РСВ можно считать системами, которые сохранили устойчивость в процессе эволюции, в то время как CV перешли предел устойчивости.

В разделе 4 отмечалось, что большинство главных компонентов РСВ после ухода с ветви красных гигантов, по-видимому, становятся экстремальными объектами НВ. Их дальнейшая эволюция проходит по пути “manque” или P–EAGB (уход с AGB раньше). В то время как будущие CV доходят до верха AGB, где повторно проходят стадию

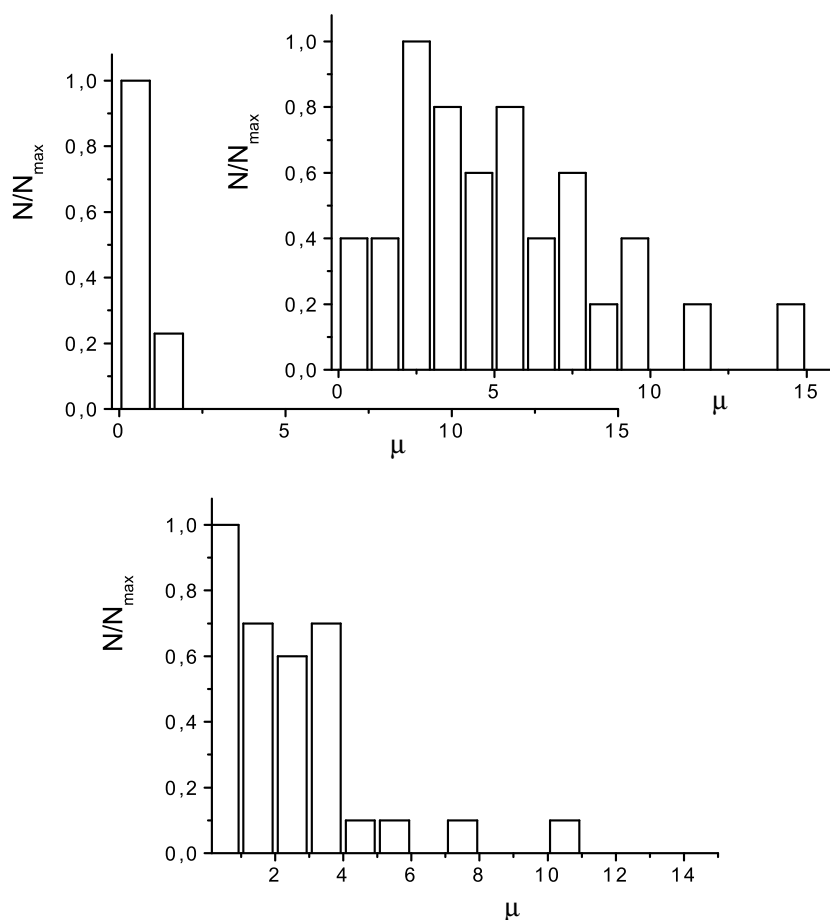


Рис. 5: Распределение полных моментов вращения систем типа *SU UMa* (слева сверху), *U Gem* (справа сверху), *PSV* (внизу).

СЕ, в результате которой, по-видимому, переходят предел устойчивости. В пользу этого утверждения можно указать на малые массы главных компонентов РСВ, большинство из которых — гелиевые белые карлики.

Среди РСВ особняком стоят три системы: *V664 Cas*, *BE UMa* и *VW Puh*. Все они — центры слабых планетарных туманностей и имеют большие орбитальные периоды ($P > 0^d.5$). Температуры их главных компонентов очень высоки, поэтому изменение блеска, обусловленное эффектом отражения, велико — более 1^m . Спектры отличаются рядом особенностей.

V664 Cas — центральная звезда туманности HFG1. Интересно, что туманность не видна в линиях H_α и $\lambda 6584 \text{ \AA}$ [NII], но яркая в $\lambda 5007 \text{ \AA}$ [OIII]. В спектре звезды очень сильны эмиссионные линии CIII и NIII, а линии HeI и HeII слабы. Дру-

гой интересной особенностью является инверсный бальмеровский декремент, что характерно для CV (Аккер, Стенхолм, 1990). Такая форма декремента указывает на то, что водородные линии формируются в плотных слоях атмосферы вторичного компонента. И, наконец, еще одна особенность — водородные линии раздвоены (Шиманский и др., 2004). Раздвоение соответствует скорости 300–340 км/с и не меняется в течение орбитального периода. Оно примерно в 2–3 раза меньше раздвоения линий в аккреционных дисках CV. Наклон системы $\approx 30^\circ$, что, возможно, уменьшает наблюдаемую величину раздвоения водородных линий. Наблюдения Экстер и др. (2005) показали, что абсорбция в центре водородных линий меняется по глубине и положению в течение орбитального периода.

BE UMa — центральная звезда туманности Twedy 1. Туманность видна в линиях H_α и $\lambda 5007$

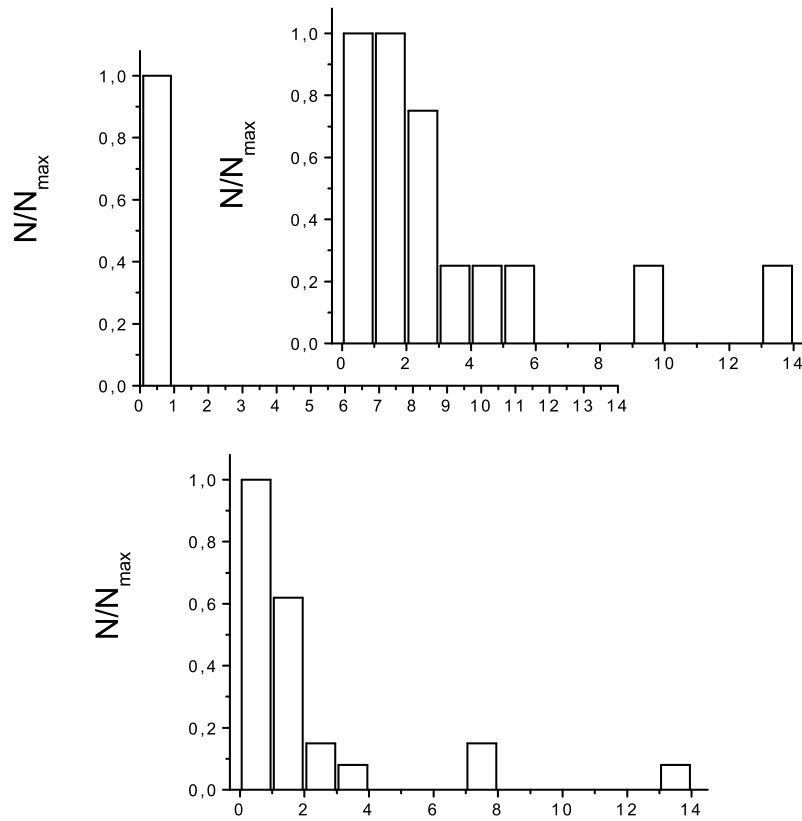


Рис. 6: Распределение собственного момента вращения компонент $\mu_1 + \mu_2$ в процентах от полного момента системы μ : сверху *SUUMa* (слева), *U Gem* (справа), внизу *PCB*.

$\text{\AA}[\text{OIII}]$, а в $\lambda 6584 \text{\AA}[\text{NII}]$ не видна. В спектре самой звезды континуум быстро растет в коротковолновую сторону. Линейчатый спектр представлен многочисленными линиями высокого возбуждения. Их интенсивность сильно меняется в течение орбитального периода вплоть до исчезновения сразу после затмения. Водородные эмиссии раздвоены. Величина раздвоения 140 км/с и не меняется с фазой периода (Крэмpton и др., 1983). Так как наклон системы $\approx 80^\circ$, то величина раздвоения не может быть существенно уменьшена за счет эффектов проекции. То обстоятельство, что эмиссии видны очень близко к фазе затмения, указывает, что область их формирования как-то возвышается над краем вторичного компонента.

VW Pux — центральная звезда планетарной туманности K1-2. Спектр системы изучен мало. В нем много эмиссионных линий H, HeI и II, элементов C, N, O во II и III стадиях ионизации. Линии водорода широки и раздвоены. Их большая полуширина $\approx 680 \text{ км/с}$ указывает на

возможность штарковского уширения. Раздвоение $\approx 200 \text{ км/с}$ при наклоне системы $\approx 40^\circ$ (Экстер и др., 2003). Особый интерес вызывают джетоподобные структуры, расположенные по обе стороны от центральной звезды. Корради и др. (1999) показали, что джеты состоят из отдельных узлов, которые движутся со скоростью расширения туманности. Но некоторые узлы в северо-западной области движутся со скоростью примерно в два раза большей. Механизм возникновения джетоподобной структуры пока не ясен.

Итак, все три системы характеризуются очень высокой температурой главного компонента $T_{eff} \geq 10^5 \text{ K}$ и, как следствие, большой амплитудой эффекта отражения, а также большой шириной и раздвоенностью водородных линий. Их вторичные компоненты имеют радиусы большие, чем звезды Главной последовательности той же массы. Как видно из рис.8, радиусы вторичных компонентов РСВ в среднем больше радиусов звезд ГП, но особенно велика разница

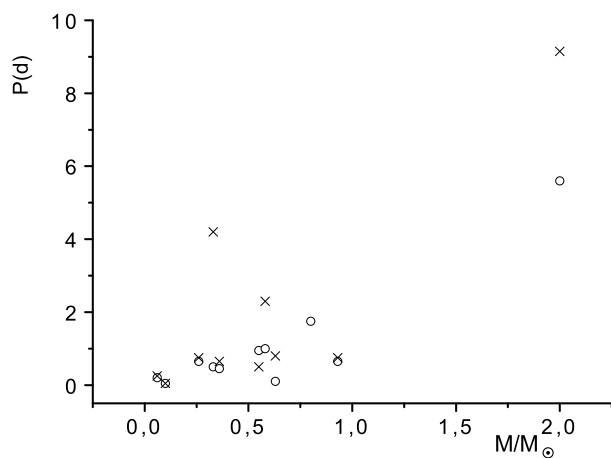


Рис. 7: Изменение периодов вращения: орбитального P_{orb} (крестики) и вторичного компонента P_2 (точки) с изменением массы вторичного компонента.

у центральных звезд планетарных туманностей. Это обусловлено тем, что при аккреции вещества во время фазы СЕ звезда выходит из состояния теплового равновесия, так как аккрецируемое вещество имеет большую энтропию, чем поверхностные слои звезды.

Описанные системы интересно сравнить с необычной катаклизмической переменной VZ Cam, которая относится к типу новоподобных. Эта система также окружена небольшой туманностью и ее главный компонент имеет очень высокую температуру ($> 10^5$). Экстремумы кривых лучевых скоростей и блеска не совпадают (Петерсон и др., 1996). Однако на этом сходство заканчивается. Орбитальный период VZ Cam небольшой, $\approx 0^d.154$. Орбитальная кривая блеска переменна, ее средняя амплитуда всего $0^m.003$, а средний блеск меняется от ночи к ночи в пределах $0^m.3$. У системы наблюдается высокое ($V \sim 12^m.5$) и низкое ($V \sim 14^m$) состояние, что характерно для новоподобных. Кроме основного периода, определенного по лучевым скоростям, изменения блеска характеризуются еще несколькими периодами, которые приписываются сверхгорбам. Все это совсем не похоже на РСВ, в изменении блеска которых главную роль играет эффект отражения. Кроме того, на кривых блеска VZ Cam наблюдается сильный фликкеринг, чего нет у РСВ.

Линейчатый спектр VZ Cam сильно меняется с изменением блеска, но четких изменений в течение орбитального периода не наблюдается. Раздвоенности водородных линий не отмечено. При

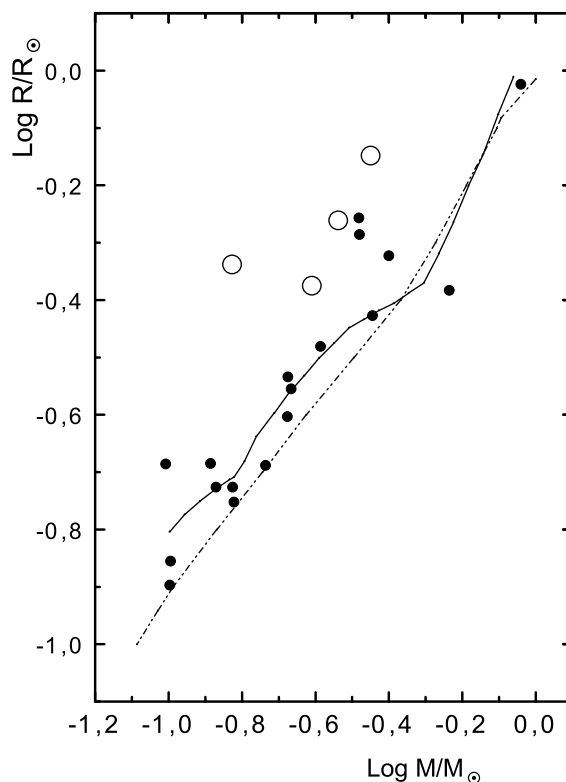


Рис. 8: Диаграмма $M-R$ для вторичных компонентов РСВ. Кружками отмечены центры планетарных туманностей. Штрих-пунктирная линия — модель (Бараф, Чабриер, 1996), сплошная линия — эмпирическое соотношение (Рид и Гизис, 1997).

возрастании блеска линии становятся асимметричными, эмиссия ослабевает и появляются профили типа P Cyg. Особенно сильно это проявляется в ультрафиолетовом участке спектра. Холлиз и др. (1992) оценили скорость потери массы системой, $\dot{M} \approx 1.4 \cdot 10^{-11} M_{\odot}/\text{год}$, а массу туманности как $\sim 2.4 \cdot 10^{-3} M_{\odot}$, что примерно в 100 раз меньше средней массы планетарной туманности. С этими двумя величинами можно оценить возраст туманности $\sim 10^8$ лет. Такой большой возраст не согласуется с высокой температурой главного компонента и высокой активностью системы. Скорее всего VZ Cam образовалась сразу как катаклизмическая переменная, а туманность — остаток общей оболочки, значительную часть которой она потеряла при движении со сверхзвуковой скоростью сквозь межзвездную среду.

По-видимому, нынешние катаклизмические переменные после фазы СЕ сразу стали полураз-

деленными. Оценки времени эволюции при учете разных механизмов потери углового момента показывают, что часть нынешних РСВ станет CV, но очень не скоро. А большинство не успеет стать ими за время существования нашей Галактики.

7. Заключение

Рассмотрены характеристики РСВ и свойства составляющих их компонентов. Они оказались во многом схожими с характеристиками CV. Это позволило сделать вывод, что основное различие между этими двумя типами систем (аккреция или ее отсутствие) обусловлено процессом эволюции и свойствами прародителей.

Большинство главных компонентов РСВ после фазы SE на стадии красного гиганта становятся экстремальными объектами HB и уходят на линию охлаждения либо минуя AGB, либо не доходя до ее верха. По-видимому, главные компоненты представляют собой довольно однородную группу объектов на разной стадии эволюции. Это объясняет разницу их свойств.

Вторичные компоненты РСВ — карлики позднего спектрального класса. Большинство из них, а может быть все, характеризуются сильной коронально-хромосферной активностью. Это указывает на существование значительных поверхностных магнитных полей, которые влияют на свойства систем.

Распределение наблюдаемых и вычисленных характеристик и попытка найти соотношение между ними подтвердили вывод об эволюционном различии между РСВ и CV. Оказалось, что распределение периодов у РСВ бимодальное, хотя это выражено не так четко, как у CV. Замечательно, что экстремумы обеих гистограмм находятся в противофазе: максимум одной совпадает с минимумом другой. Провал периодов у CV заметен как почти полное отсутствие вторичных компонентов с массами 0.24–0.29. Именно в этом интервале масс происходит переход от лучистых конфигураций к полностью конвективным.

Различны соотношения $a - M_1$. У CV a возрастает с ростом M_1 . Это, вероятно, следствие переноса массы в системе: от менее массивного вторичного компонента к более массивному главному. У РСВ связи между этими величинами нет, так как нет переноса массы.

Сравнение расстояний a между компонентами с пределом устойчивости показало, что в процессе эволюции CV перешли этот предел, а РСВ устойчивость сохранили. Нынешние CV стали полуразделенными сразу после фазы SE. Большинство нынешних РСВ, по-видимому, не успеет стать CV за время существования нашей Галактики.

Список литературы

- Аккер, Стенхолм (Acker A., Stenholm B.), 1990, A&A, **233**, L21
 Аккер, Ясниевич (Acker A., Jasiewicz G.), 1986, A&A, **160**, L1
 Арджи и др. (Arge C.N., Mullan D.J., Dolginov A.Z.), 1995, ApJ, **443**, 795
 Бараф и Чабриер (Baraffe I., Chabrier G.), 1996, ApJ, **461**, L51
 Барстоу и др. (Barstow M.A., Good S.A., Holberg J.B. et al.), 2003, MNRAS, **341**, 870
 Баско М.М., Сюняев Р.А., 1973, Препринт ИПМ N8
 Баско и др. (Basko M.M., Sunyaev R.A., Titarchuk L.G.), 1974, A&A, **31**, 249
 Бенц и др. (Benz A.O., Conway J., Güdel M.), 1998, A&A, **331**, 596
 Берджерон и др. (Bergeron P., Saffer R.A., Liebert J.), 1992, ApJ, **394**, 228
 Берджерон и др. (Bergeron P., Wesemael F., Beauchamp A., Wood M.A., Lamontagne R., Fontaine G., Liebert J.), 1994, ApJ, **432**, 305
 Берли и др. (Burleigh M.R., Barstow M.A., Dobbie P.D.), 1997, A&A, **317**, L21
 Биверс и др. (Beavers W.I., Oesper D.A., Pieree J.N.), 1979, ApJ, **230**, L187
 Блич и др. (Bleach J.N., Wood J.H., Catalan M.C., Welsh W.F., Robinson E.L., Skidmore W.), 2000, MNRAS, **312**, 70
 Блич и др. (Bleach J.N., Wood J.H., Smalley B., Catalan M.C.), 2002, MNRAS, **335**, 593
 Бонд, Ливьо (Bond H.E., Livio M.), 1990, ApJ, **355**, 568
 Бонд (Bond H.E.), 1999, preprint STSI N1386
 Бонд и др. (Bond H.E., Mullan D.J., O'Brein M.S., Sion E.M.), 2001, ApJ, **560**, 919
 Бравейлер, Сион (Bruhweiler F.S., Sion E.M.), 1986, ApJ, **304**, L21
 Веннес и др. (Vennes S., Pelletier C., Fontaine G., Wesemael F.), 1988, ApJ, **331**, 876
 Веннес и др. (Vennes S., Chayer P., Thorstensen J.R., Bowyer S., Shipman H.L.), 1992, ApJ, **392**, L27
 Веннес, Торстенсен (Vennes S., Thorstensen J.R.), 1994, AJ, **108**, 1881
 Веннес и др. (Vennes S., Polomski E.F., Lanz T., Thorstensen J.R., Chayer P., Gull T.R.), 2000, ApJ, **544**, 423
 Войханская Н.Ф., 2002, Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв., **53**, 25
 Джанз-Кралл и Вейленти (Jons-Krull C.M., Valenti J.A.), 1996, ApJ, **459**, L95
 Добби и др. (Dobbie P.D., Barstow M.A., Burleigh M.R., Hubeny I.), 1999, A&A, **346**, 163
 Дорман и др. (Dorman B., Rood R.T., O'Connell R.W.), 1993, ApJ, **419**, 596
 Дьюпуис и др. (Dupuis J., Vennes S., Bowyer S.), 1997, in: White Dwarfs, eds.: Isern J., Hernanz M., Garcia-Berro E., Kluwer acad. publ.
 Дюпре, Раймонд (Dupree A.K., Raymond J.S.), 1982, ApJ, **263**, L63
 Ибаноглу и др. (İbanoğlu C., Keskin V., Akan M.C., Evren S., Tunca Z.), 1994, A&A, **281**, 811

- Ибен, Тутуков (Iben I., Tutukov A.V.), 1993, *ApJ*, **418**, 343
- Калли и др. (Cully S.L., Dupuis J., Rodriguez-Bell T. et al.), 1995, *Astrophysics in the Extreme Ultraviolet*, eds.: S.Bowyer, R.F.Malina, Cluwer Acad. Publ., 349
- Кафка и др. (Kawka A., Vennes S., Koch R., Williams A.), 2002, *AJ*, **124**, 2853
- Килкени и др. (Kilkenny D., O'donoghue D., Koen C., Lynas-Gray A.E., van Wuk F.), 1998, *MNRAS*, **296**, 329
- Корради и др. (Corradi R.L.M., Perinotto M., Villaver E., Mampaso A., Goncalves D.R.), 1999, *ApJ*, **523**, 721
- Крат В.А., 1950, *Фигуры равновесия небесных тел*, изд. тех.-теор. лит-ры, М.-Л.
- Крэмптон и др. (Crampton D., Cowley A.P., Hutchings J.V.), 1983, *ApJ*, **272**, 202
- Кук и др. (Cook J.N., Shapiro S.L., Stephens B.S.), 2003, *ApJ*, **599**, 1272
- Лейн и др. (Lane B.F., Boden A.F., Kulkarni S.R.), 2001, *ApJ*, **551**, L81
- Либерт и др. (Liebert J., Tweedy R.W., Napiwotzki R., Fulbright M.C.), 1995, *ApJ*, **441**, 424
- Лим и др. (Lim J., White S.M., Cully S.L.), 1996, *ApJ*, **461**, 1009
- Маллан и др. (Mullan D.J., Sion E.M., Bruhweiler F.S., Carpenter K.G.), 1989, *ApJ*, **399**, L33
- Маллан, МакДональд (Mullan D.J., MacDonald J.), 2001, *ApJ*, **559**, 353
- Макстед и др. (Maxted P.F.L., Heber U., Marsh T.R., North R.C.), 2001, *MNRAS*, **326**, 1391
- Макстед и др. (Maxted P.F.L., Marsh T.R., Morales-Rueda L. et al.), 2004, *MNRAS*, **355**, 1143
- Песталоцци и др. (Pestalozzi M.R., Benz A.O., Conway J.E., Grudel M.), 2000, *A&A*, **353**, 569
- Петерсон и др. (Patterson J., Caillault J.-P., Skillman D.P.), 1993, *PASP*, **105**, 848
- Петерсон и др. (Patterson J., Patino R., Thorstensen J.R. et al.), 1996, *AJ*, **111**, 2422
- Рамзейер и др. (Ramseyer T.F., Hatzes P., Jablonski F.), 1995, *AJ*, **110**, 1364
- Рид и Гизис (Reid I.N., Gizis J.E.), 1997, *AJ*, **113**, 2246
- Риттер (Ritter H.), 1986, *A&A*, **169**, 139
- Риттер (Ritter H.), 1990, *ApJS*, **85**, 1179
- Рэймонд и др. (Raymond S.N., Szkody P., Hawley S. et al.), 2003, *AJ*, **125**, 2621
- Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В., 1997, *Астрон. журн.*, **74**, 432
- Сион и др. (Sion E.M., Schaefer K.G., Bond H.E., Saffer R.A., Cheng F.H.), 1998, *ApJ*, **496**, L29
- Торстенсен и др. (Thorstensen J.R., Vennes S., Shambrook A.), 1994, *AJ*, **108**, 1924
- Торстенсен и др. (Thorstensen J.R., Vennes S., Bowyer S.), 1996, *ApJ*, **457**, 390
- Уэсемейл и др. (Wesemael F., Henry R.B.S., Shpman H.L.), 1984, *ApJ*, **287**, 868
- Файбельман, Бравейлер (Fiebelman W.A., Bruhweiler F.G.), 1990, *ApJ*, **357**, 548
- Хейман и др. (Hamann W.-R., Gruschinske J., Kudritzki R.P., Simon K.P.), 1981, *A&A*, **104**, 249
- Хералд и Бианши (Herald J.E., Bianshi L.), 2002, *ApJ*, **580**, 434
- Холлиз и др. (Hollis J.M., Oliverson R.J., Wagner R.M., Feibelman W.A.), 1992, *ApJ*, **393**, 217
- Черепашук и др. (Chereshchuk A.M., Katysheva N.A., Khruzina T.S., Shugarov S.U.), 1996, *Advances in Astronomy and Astrophysics*, Gordon and Breach Publ.
- Шиманский В.В., 2002, *Астрон. журн.*, **79**, 145
- Шиманский В.В., Борисов Н.В., Сахибуллин Н.А., Сурков А.Е., 2004, *Астрон. журн.*, **81**, 620
- Шугаров С.Ю., 1984, *IBVS*, N2612
- Экстер и др. (Exter K.M., Pollacco D.L., Bell S.A.), 2003, *MNRAS*, **341**, 1349
- Экстер и др. (Exter K.M., Pollacco D.L., Maxted P.F.L., Napiwotzki R., Bell S.A.), 2005, *MNRAS*, **359**, 315
- Янг и др. (Young A., Rottler L., Skumanich A.), 1991, *ApJ*, **378**, L25

Таблица 1: Некоторые характеристики предкагаклизмических переменных (окончание)

N	Название	Др. названия	Координаты(2000.0)	Спектры компонентов	P(d)	T ₁	T ₂	$\frac{M_1}{M_\odot}$	$\frac{M_2}{M_\odot}$	$\frac{R_1}{R_\odot}$	$\frac{R_2}{R_\odot}$	lg g	$\frac{a}{R_\odot}$
ш/п			α δ										
31	BD +50°2869	HD 186924	19 44 48.2 50 24 11	O6 _f	0.23768	35000		0.77	0.4		0.49	8.25	1.5
32	ВРМ 71214		03 32 43.4 -08 55 40	DA+M2.5V	0.20162	17200	3800						
33	BD-12°1172	HD 35914	05 27 28.3 -12 41 49	O7 _f	~0.2;	33200							
34	CD 245	MS Peg, WD 2256+249	22 58 47.4 25 15 47	DA2+M4V	0.173661	22170	3600	0.48	0.22	0.015	0.27	7.77	1.17
35	HS 2333+3927		23 35 54.7 39 44 26	sdB+M4	0.1718023	36500		0.38	0.28			5.7	
36	SDSS 112909.50+ +663704.4		11 29 09.5 66 37 04	wd+dM	0.17063			0.6	0.2				
37	EC13471-1258		13 49 52.0 -13 13 38	DA+M3V7	0.15074	14100		0.77	0.58		0.42	8.25	1.32
38	NN Ser	PG 1550+131	15 52 56.1 12 54 44	DAO1+M4.75V	0.1300801195	57000	2900	0.54	0.15	0.019	0.174	7.6	0.95
39	HS 2237+8154		22 37 15.8 82 10 28	DA+M3.5V	0.12368	11500		0.57	0.3			8.0	
40	BD-7°3477	HW Vir, PG 1241-084	12 44 20.2 -08 40 15	sdB+M	0.11671962	31000	3900	0.37	0.13	0.195	0.2	5.64	0.2
41	MT Ser		17 29 01.9 -15 13 04	sdO+MV	0.1132269	50000	3000	0.6	0.2	0.13		6.00	0.9
42	GD 448	WD 0710+741	07 17 12.7 74 00 55	DA+M6V	0.103064	19000		0.4	0.1	0.018	0.125	7.45	0.75
43	PG 1336-018	NY Vir	13 38 47.8 -02 01 51	sdB+M5V	0.1010174	33000	3000	0.5	0.15	0.18	0.19	5.7	1.0
44	HS 0705+6700		07 05 00.0 67 00 00	sdB+MV	0.09564665	29600	2900	0.48	0.13	0.230	0.186	5.40	0.81
45	PG 1017-086		10 20 14.5 -08 53 46	sdB+k/k	0.0729938	30300		0.5	0.07	0.19	0.08	5.61	
46	BD+66°1066	HD 164963	17 58 33.4 66 37 59	O7+WR	0.0604								
47	BD-22°3467	LW Hya	12 53 32.9 -22 52 22	DAO+G8IV	0.7653:	80000	5000	0.5	0.8	0.017	2.63	7.7	
48	RE 1629+780		16 29 11.1 78 04 41	DA1+M4V		41000		0.65	0.21	0.015	0.25	7.73	
49	GD 123	WD 1033+464, PG 1033+464	10 36 25.7 46 08 36	DA4+KV									
50	WD 0752-146	LTT 2980	07 55 39.5 -14 45 42										

Примечания:

Ниже черты приведены кандидаты в РСВ.

Жирным шрифтом выделены центральные звезды планетарных туманностей.