

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
Государственный астрономический институт
имени П. К. Штернберга

На правах рукописи



Татарников Андрей Михайлович

**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СИМБИОТИЧЕСКИХ ЗВЕЗД: BF CYG, PU VUL, V407 CYG И
V1413 AQL**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в отделе радиоастрономии Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Таранова Ольга Георгиевна,
отдел радиоастрономии ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Самусь Николай Николаевич,
Институт астрономии РАН

кандидат физико-математических наук
Архипова Вера Петровна,
отдел физики эмиссионных звезд и галактик
ГАИШ МГУ

Ведущая организация: НИИ "Крымская астрофизическая
обсерватория"
(Украина, Крым, пгт. Научный)

Защита состоится 6 декабря 2012 г. в 14⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д501.001.86 при МГУ имени М.В.Ломоносова, расположенном по адресу: 119991, Москва, Университетский проспект, д.13, ГАИШ МГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М.В.Ломоносова (119991, Москва, Ломоносовский проспект, д.27, Фундаментальная библиотека).

Автореферат разослан "02" ноября 2012 года.

Заверенные отзывы и замечания по автореферату просьба высылать на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

д.ф.-м.н.



Алексеев С.О.

Симбиотические звезды это особый класс взаимодействующих двойных систем, в спектрах которых наряду с линиями и полосами поглощения, характерными для холодных звезд, наблюдаются эмиссионные линии, характерные для спектров планетарных туманностей.

Присутствие в одной системе таких разных объектов, как холодный гигант и горячий карлик, активный обмен веществом, газовая (а в некоторых системах и газопылевая) туманность с сильно различающейся плотностью вещества и степенью ионизации, все это вместе дает возможность изучения целого ряда явлений. Симбиотические звезды выступают в роли своеобразных физических лабораторий, позволяющих изучить различные аспекты эволюции звезд в двойных системах.

Симбиотические звезды делятся на ряд подгрупп. Существует несколько критериев такого деления. Основной (и первый исторически сложившийся) – характер активности горячего компонента. По этому признаку симбиотические звезды делятся на 1) классические симбиотические звезды (время от времени наблюдаются вспышки с амплитудой до 3 звездных величин), 2) симбиотические новые (за всю историю наблюдений наблюдалась одна сильная новоподобная вспышка, период возвращения к исходному уровню блеска – сотни лет), 3) повторные (рекуррентные) симбиотические новые (наблюдалось несколько сильных новоподобных вспышек), 4) пекулярные симбиотические звезды, 5) симбиотические звезды с неактивным горячим компонентом (отсутствие каких бы то ни было вспышек).

Еще один критерий связан с наличием (D-тип от "dusty") или отсутствием (S-тип от "stellar") признаков избытка излучения в ИК-диапазоне, вызванного излучением околозвездной пылевой оболочки. К первому типу принадлежат ~20%, а ко второму – около 80% известных симбиотических звезд.

В последние десятилетия вышло несколько каталогов симбиотических звезд: каталог Аллена (1984), каталог Кениона (1986) и каталог Бельчински и др. (2000). Первый из них содержит сведения о 129 симбиотических звездах и 15 кандидатах в этот класс переменных звезд, второй – о 133 симбиотических звездах и 20 кандидатах, третий - о 188 симбиотических звездах и 30 кандидатах в них. Таким образом, в настоящее время известно около 200 симбиотических звезд (небольшая часть из них находится в Магеллановых облаках).

Для выделения симбиотических звезд были выработаны следующие наблюдательные критерии (Кенион, 1986): 1) присутствие абсорбционного спектра, характерного для гигантов поздних спектральных классов; 2) присутствие ярких эмиссионных линий водорода и гелия; 3) присутствие либо ярких линий ионов с потенциалом ионизации больше 20 эВ, либо (в случае симбиотических звезд во время вспышки) – континуума спектрального класса А-F.

Попытки выяснить природу симбиотических звезд и их эволюционный статус предпринимались на протяжении нескольких десятков лет. В настоящее время двойственность симбиотических звезд не вызывает сомнений. Впервые модель двойной звездной системы для описания наблюдавшихся особенностей у звезд с комбинационным спектром предложил Берман (1932). Это была первая модель, предложенная для описания звезд данного типа, и именно она оказалась верной. Подробно эта модель была описана в работах Боярчука (1967, 1970). Он получил хорошее согласие между теоретическим и наблюдаемым распределением энергии в спектрах нескольких симбиотических звезд в модели, состоящей из красного гиганта, компактной горячей звезды с $T_{\text{eff}}=100000\text{K}$ и ионизованной туманности с электронной концентрацией $>10^6\text{ см}^{-3}$. Тутуков и Юнгельсон (1976) предположили, что горячим компонентом симбиотической звезды может быть углеродно-кислородный карлик, вспышки которого связаны с возгоранием на его поверхности водородной оболочки, собранной им из звездного ветра холодного компонента. Модель Боярчука была развита в работе Кениона и Веббинка (1984). Они расширили модель, рассмотрев другие возможные типы горячего компонента, например, пограничный слой аккреционного диска при аккреции на звезду главной последовательности.

В настоящее время можно выделить три основные проблемы, решение которых значительно расширит наши представления о строении и эволюции симбиотических звезд: 1) степень заполнения холодным компонентом своей полости Роша у симбиотических звезд разных типов; 2) причина вспышек классических симбиотических звезд (наиболее многочисленной группы); 3) место симбиотических звезд в общем сценарии эволюции двойных систем. Эти проблемы усугубляются большими ошибками в оценках основных параметров симбиотических систем – массах и светимостях компонентов, вызванными отсутствием надежных оценок расстояний до этих объектов и сложностью определения орбитальных скоростей горячих компонентов.

Степень заполнения холодным компонентом полости Роша ключевым образом влияет на поведение двойной системы в целом. От нее зависит, каким именно образом будет терять вещество холодный компонент – через звездный ветер (темп потери вещества зависит от параметров холодного компонента и составляет для большинства звезд в среднем $10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$) или через внутреннюю точку Лагранжа (темп потери вещества может превышать $10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$). При этом второй вариант не исключает и потери вещества в виде ветра. До последнего времени большинство исследователей считало, что холодные компоненты классических симбиотических звезд не заполняют свои полости Роша (см., например, Фекел и др. (2001, 2003, 2008) и Шилд и др. (2001)). Однако в последнее время, начинает появляться все больше свидетельств в пользу обратного (см., например, Миколаевска (2004), Юдин и др. (2005), Рутковски и др. (2007)).

Гипотез о причинах возникновения вспышек у классических симбиотических звезд за все годы их исследования было выдвинуто немало. В настоящее время считается, что в спокойном состоянии на поверхности белого карлика идет постоянное термоядерное горение аккрецируемого вещества холодного компонента. И вспышка происходит из-за небольших вариаций темпа потери вещества холодным компонентом или из-за неустойчивости переноса вещества в аккреционном диске.

Одна из основных проблем, связанных с таким сценарием развития циклов активности классических симбиотических звезд – слишком узкий диапазон допустимого темпа аккреции вещества в спокойном состоянии. Например, для белого карлика массой $0.6 M_{\odot}$ (горячий компонент Z And) допустимый темп аккреции лежит в пределах от $\approx 2 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ до $\approx 4.5 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ (Пачински и Рудак, 1980). Получается, что самый населенный класс симбиотических звезд должен был бы быть самым редко встречающимся.

Один из выходов в сложившейся ситуации – образование своеобразного буфера между холодным и горячим компонентом, который будет накапливать вещество из ветра гиганта, выдавая его с необходимой скоростью горячему компоненту. Таким буфером является аккреционный диск, образующийся вокруг горячего компонента. При этом вспышки могут вызываться либо возникновением неустойчивости в диске и выпадением части накопленного вещества на поверхность белого карлика (см., например, Соколоски и др. 2006), либо полным разрушением диска с выпадением всего вещества (см. работу Бисикало и др. (2006) и ссылки в ней).

Модельные расчеты, проведенные Бисикало и др. (2006), подтверждают, что разрушение аккреционного диска способно объяснить как временные, так и энергетические особенности, наблюдаемые при вспышках классических симбиотических звезд. Более того, учет взаимодействия ветров от горячего и холодного компонентов (модель взаимодействующих ветров), позволил Бисикало и др. объяснить наблюдающиеся особенности на кривых блеска вспышки Z And.

Тем не менее, приведенная модель пока не нашла окончательного подтверждения, т. к. при спектральных наблюдениях классических симбиотических звезд во время спокойного состояния аккреционный диск практически не заметен (см. для Z And Тарасова и Скопал, 2012).

Помимо этого, существуют звезды, по всем параметрам относящиеся к классическим симбиотическим звездам, но не показывающие характерной для них вспышечной активности на протяжении всего периода наблюдений (например, V443 Her).

И, наконец, одним из самых интригующих вопросов эволюции симбиотических звезд является вопрос об их месте в звездной эволюции. Еще в работе Тутукова и Юнгельсона (1976) была рассмотрена эта проблема, определена "область существования" феномена симбиотической звезды и получены оценки количества этих звезд в Галактике (~1000 систем). Однако результаты численного моделирования эволюции двойных звезд не дают, например, удовлетворительного объяснения распределения систем по орбитальным периодам. Увеличение числа систем с известным орбитальным периодом (Миколаевска, 2012) лишь усугубляет расхождение.

О важности места симбиотических звезд в общем сценарии эволюции двойных говорит и тот факт, что в последнее время симбиотические звезды с массивным белым карликом в качестве горячего компонента, как пример – повторная новая T CrB, все чаще рассматриваются в качестве кандидатов на роль предшественников сверхновых звезд типа Ia (одними из первых на такую возможность указали Тутуков и Юнгельсон, 1976).

Как видно из вышеприведенного, симбиотические звезды в настоящее время привлекают к себе внимание в связи с самыми разными вопросами звездной эволюции. Это сложные и привлекательные объекты исследования, как для наблюдателей, так и для теоретиков.

Актуальность проблемы

Актуальность всестороннего изучения симбиотических звезд связана с тем, что они представляют собой своего рода уникальную лабораторию для исследования в совокупности и во взаимодействии многих сложных астрофизических явлений (некоторые из них не наблюдаются больше ни у какого другого класса астрономических объектов), важную и скоротечную фазу в эволюции определенного класса взаимодействующих двойных звездных систем. По своему составу этот класс неоднороден, и включает в себя несколько типов симбиотических звезд, выделяемых по характеру вспышечной активности, эволюционному статусу холодного компонента, наличию или отсутствию пылевой материи в околозвездной оболочке.

Актуальность данной работы связана с необходимостью определения основных физических параметров компонентов симбиотических звезд (холодного и горячего компонентов и околозвездной туманности) на разных фазах вспышечной активности. Важным является увеличение числа хорошо изученных симбиотических звезд, что позволит в дальнейшем провести обобщения и выявить новые закономерности.

Актуальность проведения исследований в УФ-диапазоне связана с наличием в симбиотических системах горячего компонента, излучение которого часто видно только в этом диапазоне. В этом же диапазоне находится ряд важных спектральных линий, используемых для оценки параметров туманности. Наиболее точные оценки величины межзвездного поглощения также делаются на основе УФ-наблюдений.

Актуальность фотометрических исследований симбиотических звезд в ИК-диапазоне обусловлена прежде всего тем, что одним из компонентов систем является красный гигант или мирида, а часть звезд имеет избыток в ИК-области, вызванный наличием пылевой оболочки. В ряде случаев именно в этой области спектра наиболее удобно вести исследование собственной переменности холодных компонентов. Результаты модельных расчетов излучения холодных компонентов поздних спектральных классов в оптическом диапазоне длин волн из-за наличия большого количества линий и полос поглощения плохо соответствуют наблюдениям. При этом в ближней ИК-области эта проблема не стоит столь остро и, например, моделирование кривых блеска в ИК-диапазоне в рамках эффекта эллипсоидальности, позволяет получить такие важные параметры, как угол

наклона плоскости орбиты к лучу зрения, степень заполнения холодным компонентом своей полости Роша и отношение масс компонент.

Цели и задачи исследования

Целью работы является исследование двух классических симбиотических звезд BF Cyg и V1413 Aql, симбиотической новой PU Vul и повторной симбиотической новой V407 Cyg.

В диссертационной работе решаются следующие задачи:

- 1) обработка данных фотометрических и спектральных наблюдений в широком диапазоне длин волн;
- 2) определение и уточнение параметров колебаний блеска, связанных, как с орбитальным движением в системе, так и с физической переменностью звезд;
- 3) моделирование распределения энергии в спектрах исследуемых звезд в широком диапазоне длин волн (от дальнего УФ до ближнего ИК) в рамках трехкомпонентной модели (горячий компонент, холодный компонент, газовая туманность);
- 4) моделирование кривой блеска классической симбиотической звезды BF Cyg в ИК-диапазоне в рамках классической модели эффекта эллипсоидальности;
- 5) определение спектральных классов и болометрических потоков от холодных компонентов; определение эффективных температур и болометрических потоков от горячих компонентов на разных фазах вспышечной активности; сравнение полученных эволюционных треков на диаграмме температура-светимость с данными теоретического моделирования вспышек;

Научная новизна

В ходе выполнения работы получен ряд новых результатов:

- 1) По данным многолетних наблюдений классической симбиотической звезды BF Cyg в ИК-диапазоне проведено моделирование ее кривой блеска в рамках классической модели эффекта эллипсоидальности с учетом вклада излучения горячего компонента и туманности. На основе большого наблюдательного

материала определены параметры системы $i=70\div 90^\circ$ и $q=M_{\text{giant}}/M_{\text{hot}}=2\div 4$. Установлено, что холодный компонент заполняет свою полость Роша и является ярким гигантом II класса светимости. Вопрос о степени заполнения холодными компонентами своей полости Роша является одним из ключевых при моделировании вспышечной активности в симбиотических системах.

- 2) Показано, что классическая симбиотическая звезда BF Cyg перешла в активное состояние в 1987 г., а не в 1989 г, как считалось ранее. При этом в ближнем УФ-диапазоне спектра звезды появился избыток излучения, связанный с аккреционным диском, а в дальнем УФ-диапазоне на орбитальных фазах, не характерных ранее для этого, наблюдался эффект рэлеевского рассеяния излучения горячего компонента на атомарном водороде. Это говорит об увеличении в это время темпа потери вещества холодным компонентом, что могло привести к вспышке этой звезды в 1989-1992 гг.
- 3) По результатам *UBV* фотометрии классической симбиотической звезды BF Cyg во время первого после вспышки 1989 г. затменного минимума блеска определены размеры компонентов $R_{\text{giant}}=0.513A$, $R_{\text{hot}}\leq 0.024A$, где A – большая полуось системы (при условии $e=0$, $i=90^\circ$). При такой оценке размеров холодного компонента он должен заполнять свою полость Роша, а параметр $q\approx 4$.
- 4) По результатам анализа малоизученных архивных УФ-спектров (период 1991-1996 гг.), спектроскопических и фотометрических наблюдений (в период 2001-2008 гг.) симбиотической новой PU Vul проведено моделирование распределения энергии в рамках стандартной трехкомпонентной модели (горячий компонент, холодный компонент, туманность). Показано, что в период 1991-1996 гг. эта модель хорошо описывает наблюдения. В период 2001-2008 гг. в спектре заметно излучение дополнительного источника, который может являться аккреционным диском. Эффективная температура горячего компонента увеличивалась от 74000 К (1991 г.) до 100000 К (1996 г.) при постоянной светимости, равной светимости горячего компонента, наблюдавшейся ранее на стадии А-F сверхгиганта (что соответствует теоретически рассчитанной

модели, описывающей эволюцию термоядерной вспышки в оболочке белого карлика). К 2008 г. температура выросла до 194000 К, а светимость упала на порядок величины (и поведение звезды на диаграмме температура-светимость не соответствует теории).

- 5) По результатам многолетних спектральных наблюдений PU Vul выявлены периодические вариации потока в непрерывном спектре, связанные с переменностью холодного компонента, с амплитудой не менее 2^m на длине волны 7000 Å. На основе анализа наблюдений затмения 1993-1994 гг. в УФ-диапазоне определен размер холодного компонента, составляющий, как минимум, $285 R_{\odot}$. Таким образом, холодный компонент PU Vul является звездой II или даже I класса светимости (в сочетании с большой амплитудой переменности, возможно – миридой).
- 6) По результатам спектральных наблюдений сделан вывод о значительной переменности (до 2^m) холодного компонента V1413 Aql в красной области спектра (на длине волны 7500 Å). Впервые сделан вывод об избыточном в сравнении со среднекосмическим содержанием неона (по отношению к кислороду) в туманности симбиотической звезды V1413 Aql. Схожая аномалия химического состава была выявлена и у PU Vul.
- 7) Несмотря на единственную наблюдавшуюся вспышку типа классической Новой, симбиотическая звезда V407 Cyg классифицирована как повторная симбиотическая новая. Выделено четыре состояния, в которых может находиться горячий компонент этой системы. По результатам ИК-фотометрии V407 Cyg оценено расстояние до системы, светимость холодного компонента, сделан вывод о том, что вспышка Новой 2010 г. не оказала на холодный компонент системы заметного влияния. Показано, что вспышка V407 Cyg в 1936 г. не является вспышкой Новой, а имеет ту же природу, что и вспышка 1998 г.

Практическая значимость

Результаты, полученные в диссертации, способствуют пониманию механизмов вспышек симбиотических звезд разных типов. Проанализированные многоцветные инфракрасные фотометрические

наблюдения представляют ценный материал, который содержит большой объем информации по переменности исследуемых симбиотических звезд. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в дальнейшем для сравнения с новыми данными для поиска долгопериодических изменений у программных симбиотических звезд. Полученные в работе физические параметры компонентов симбиотических звезд разных типов могут быть использованы для проверки теорий строения и эволюции симбиотических звезд. Результаты спектральных и фотометрических наблюдений могут быть использованы для постановки задач при дальнейшем изучении свойств данного класса двойных звездных систем.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты обработки многолетних фотометрических и спектральных наблюдений симбиотических звезд BF Cyg, V407 Cyg, V1413 Aql и PU Vul, а также основные физические параметры этих систем, полученные при интерпретации наблюдений на основе модельных расчетов.
2. Установлено, что холодный компонент BF Cyg заполняет свою полость Роша и является ярким гигантом II класса светимости.
3. У BF Cyg и V1413 Aql вспышки горячих компонентов сопровождались повышенным темпом потери вещества холодными компонентами.
4. Показано, что наблюдаемая на диаграмме температура-светимость эволюция горячего компонента симбиотической новой PU Vul в 1979 – 2001 гг. соответствует теоретически рассчитанному сценарию эволюции термоядерной вспышки на поверхности белого карлика. Дальнейшая стадия (падение светимости) плохо описывается современными теоретическими моделями.
5. Показано, что холодный компонент V1413 Aql является полуправильной переменной с амплитудой изменения блеска 2^m в красной области спектра

6. Классификация симбиотической звезды V407 Cyg как повторной симбиотической новой, сделанная на основе анализа кривой блеска звезды и спектральной эволюции после сильной вспышки 2010 г.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Колотилов Е.А., Мунари У., Юдин Б.Ф., Татарников А.М. *AS 501 – новый тип симбиотической звезды с сильно проэволюционировавшим холодным компонентом. Астрон. журн.*, т. 73, с. 894, 1996.
2. Колотилов Е.А., Мунари У., Попова А.А., Татарников А.М., Шенаврин В.И., Юдин Б.Ф. *UBVJHKLM-фотометрия и оптическая спектрофотометрия симбиотической мириды V407 Лебеда. Письма в АЖ*, т. 24, с. 526, 1998.
3. Есипов В.Ф., Колотилов Е.А., Миколаевска И., Мунари У., Татарникова А.А., Татарников А.М., Томов Т., Юдин Б.Ф. *Эволюция симбиотической звезды AS 338 после сильной вспышки в 1983 г. Письма в АЖ*, т. 26, с. 200-216, 2000.
4. Юдин Б.Ф., Шенаврин В.И., Колотилов Е.А., Татарникова А.А., Татарников А.М. *ИК-фотометрия симбиотической звезды VF Cyg: открытие эллипсоидальной переменности блеска красного гиганта. Астрон. журн.*, т.82, с.262, 2005.
5. Татарникова А.А., Колотилов Е.А., Татарников А.М. *Предвспышка классической симбиотической звезды VF Cyg в 1987-1989 г. Астрон. журн.*, т.85, №2, с.151, 2008.
6. Татарникова А.А., Татарников А.М., Есипов В.Ф., Колотилов Е.А. *Спектральные наблюдения классической симбиотической звезды V1413 Aql на стадии перехода к спокойному состоянию. Письма в АЖ*, т. 35, №3, с.206, 2009.
7. Татарникова А.А., Татарников А.М. *Анализ архивных УФ-наблюдений симбиотической новой PU Vul во время небулярной стадии и минимума блеска 1993-1999 гг. Астрон. журн.*, т.86, №11, с.1095, 2009.
8. Abdo A. A., Ackermann M., Ajello M., et al. *Gamma-Ray Emission Concurrent with the Nova in the Symbiotic Binary V407 Cygni. Science*, v.329, p.817, 2010.

9. Татарникова А.А., Татарников А.М., Есипов В.Ф., Тарасова Т.Н., Шенаврин В.И., Колотилов Е.А., Наджип А.Э. *Спектральные и фотометрические наблюдения симбиотической новой PU Vul во время небулярной фазы и минимума 2007 г.* **Астрон. журн.**, т.88, №10, с. 973, 2011.
10. Колотилов Е.А., Комиссарова Г.В., Татарникова А.А., Татарников А.М., Шенаврин В.И. *Новый цикл активности классической симбиотической звезды V1413 Aql*, **Письма в АЖ**, т.38, №7, с. 530-536, 2012
11. Yudin, B. F., Kolotilov, E. A., Shenavrin, V. I., Tatarnikova, A. A., Tatarnikov, A. M. *UBV photometry of the classical symbiotic star BF Cygni.* **Astron. and Astroph. Trans.**, v.24, p.447, 2005.
12. Kolotilov E.A., Popova A.A., Tatarnikov A.M., Yudin B.F. *Optical and IR photometry of V627 Cas (AS 501) over the period 1988 – 1995.* **Astron. and Astrophys. Transactions**, v. 14, p. 195, 1997.
13. Esipov V. F., Kolotilov E. A., Komissarova G. V., Shenavrin V. I., Tarasova T. N., Tatarnikov A. M., Tatarnikova A. A. *Spectroscopic Observations of the Recurrent Symbiotic Nova V407 Cyg during 2001—2009*, **Baltic Astronomy**, Vol. 21, p. 47-53, 2012

Все работы написаны в соавторстве. В публикациях автор участвовал на равноправной основе на всех этапах работы (кроме работы №10, в которой автором была проведена интерпретация ИК-наблюдений и получены оценки параметров холодного компонента).

Апробация результатов

Результаты диссертации представлены

- на семинарах:
 - по звездной астрономии ГАИШ МГУ
 - отдела радиоастрономии ГАИШ МГУ
 - отдела физики звезд и галактики КрАО
- на конференциях
 - Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Киев, 2009)

- B.V. Kukarkin Centenary Conference: Variable Stars, the Galactic Halo and Galaxy formation" (Звенигород, 2009)
- Современная звёздная астрономия (Москва, 2011)
- IAU Symposium 281 "Binary Paths to the Explosions of type Ia Supernovae" (Padova, 2011)
- Asiago Workshop on Symbiotic Stars (Asiago, 2011)

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Полный объем диссертации – 149 страниц; в ней содержится 50 рисунков и 17 таблиц; список литературы насчитывает 190 ссылок.

Содержание работы по главам

Во введении дается краткое описание проблем, затронутых в диссертации, показана актуальность темы диссертации и сформулированы цели работы, приведены основные полученные результаты, сформулированы положения, выносимые на защиту, показаны их научная новизна и практическая ценность.

Глава 1. Наблюдения и методы исследования

В первой главе кратко описаны проведенные наблюдения, методика их обработки и некоторые методы теоретических расчетов, которые использовались в ходе исследования. В первом параграфе приведены ссылки на опубликованные результаты наблюдений, списки стандартов, использовавшихся при фотометрических (отдельно для *UBVRI* и *JHKLM* фильтров) и спектральных наблюдениях (для телескопов ЗТЭ и ЗТШ); перечислены телескопы, на которых проводились наблюдения и использованное оборудование. Во втором параграфе приведены формулы, позволяющие вычислять распределение энергии в непрерывном спектре в коротковолновой части УФ-диапазона в рамках модели рэлеевского рассеяния излучения горячего компонента на атомарном водороде. Такой случай возникает при наблюдениях на фазах близких к затмению горячего компонента из-за прохождения его излучения через внешние слои протяженной нейтральной атмосферы холодного компонента. При этом в дальнем УФ-диапазоне появляется характерный "завал" в спектре объекта,

величина которого зависит от числа атомов водорода на луче зрения. В третьем параграфе рассматривается модификация метода Занстра для определения температуры горячего компонента симбиотической системы. В четвертом параграфе приведены формулы для определения электронной концентрации и температуры в области формирования небулярных линий по отношению потоков в линиях [O III] и [Ne III]. Т.к. существует ограничение на концентрацию n_e , т.е. некоторая критическая величина, выше которой интенсивность запрещенных линий резко падает, то можно использовать отношения данных линий для оценок отличий содержания O/Ne от среднекосмического.

Глава 2. Классическая симбиотическая звезда BF Cyg

Во второй главе приведены результаты анализа фотометрических и спектральных наблюдений классической симбиотической звезды BF Cyg в широком диапазоне длин волн.

В параграфе 2.1 рассматриваются характеристики фотометрического поведения BF Cyg за период 1978 – 2003 гг. По результатам периодограммного анализа получены уточненные эфемериды колебаний блеска системы: $\text{Min}(U) = 2449135 + 758.40E$, связанных с затмением холодным компонентом системы горячего компонента и части туманности. Показано, что холодный компонент системы сам является переменной звездой, сделана оценка его спектрального класса (M4-M6).

В параграфе 2.2 проведено моделирование кривой блеска BF Cyg в рамках эффекта эллипсоидальности. Показана необходимость учета влияния различного вклада излучения туманности при разных орбитальных фазах. Моделирование показало, что холодный компонент системы полностью заполняет свою полость Роша и является, таким образом, гигантом II класса светимости. Получены оценки допустимых диапазонов для величины отношения масс компонентов $q = M_{\text{giant}}/M_{\text{hot}} = 2.5 \div 4$ и угла наклона плоскости орбиты $i = 70 \div 90^\circ$.

В параграфе 2.3 по результатам наблюдений первого после вспышки 1989 г. глубокого затменного минимума блеска (1991 г.) с высокой точностью сделана оценка размеров компонентов системы: $R_{\text{cool}} = 0.513 \pm 0.001 A$, $R_{\text{hot}} \leq 0.024 A$ (где A – большая полуось системы). Полученная величина R_{cool} хорошо согласуется с выводом о заполнении холодным компонентом полости Роша.

В параграфе 2.4 рассмотрен период, предшествовавший вспышке BF Cyg в 1989 г. Показано, что период перед вспышкой нельзя считать спокойным состоянием звезды. В это время наблюдался эффект рэлеевского рассеяния на орбитальных фазах далеких от затмения (вплоть до фазы 0.35, при которой горячий компонент расположен ближе к наблюдателю, чем холодный), что свидетельствует о существенном возрастании темпа потери вещества с поверхности холодного компонента перед вспышкой. Если до 1986 г. распределение энергии в спектре звезды хорошо описывается в рамках стандартной модели, то в 1987 – 1989 гг. для объяснения наблюдавшегося распределения энергии в УФ- и оптическом диапазонах необходимо ввести дополнительный источник излучения с температурой 10^4 К и светимостью $\sim 50\%$ светимости горячего компонента, который может быть аккреционным диском.

Глава 3. Симбиотическая новая PU Vul

В третьей главе приведены результаты анализа спектральных и фотометрических наблюдений симбиотической новой PU Vul в широком диапазоне длин волн на разных стадиях развития вспышки. Эта звезда была открыта во время вспышки 1979 г. (Новая Лисички 1979). Дальнейшие наблюдения показали, что вспышка развивается очень медленно, а звезду необходимо классифицировать как симбиотическую новую.

В параграфе 3.1 проводится анализ архивных УФ-наблюдений PU Vul, полученных космической обсерваторией IUE в 1991 – 1996 гг. Показано, что в этот период времени распределение энергии в спектре PU Vul может быть представлено в рамках стандартной модели. Температура горячего компонента изменялась от 74000 К (в 1991 г.) до 100000 К (в 1996 г.). Эволюция горячего компонента системы, отраженная на диаграмме температура-светимость, с момента максимума вспышки соответствует теоретическому сценарию развития термоядерной вспышки в оболочке белого карлика. На основе анализа УФ-наблюдений затмения, наблюдавшегося в 1993-1994 гг., оценен снизу размер холодного компонента $R_{\text{cool}} \geq 285R_{\odot}$ (в предположении, что сумма масс компонентов системы $\sim 2M_{\odot}$) и сделан вывод о том, что он является звездой I класса светимости. По результатам анализа величины эффекта рэлеевского рассеяния излучения горячего компонента сделан вывод о переменности темпа потери вещества холодным компонентом.

В параграфе 3.2 представлены результаты анализа спектральных и фотометрических наблюдений PU Vul, полученных в 2001-2008 гг. Определена температура горячего компонента в 2008 г. – $T_h=194000$ К. При этом светимость его упала в 10 раз по сравнению с 1991 г. Показано, что в это время эволюция горячего компонента перестала соответствовать теоретической модели эволюции термоядерной вспышки в оболочке белого карлика. Оценена масса горячего компонента PU Vul – $M_h=0.5 M_\odot$. По результатам спектральных наблюдений выявлены периодические вариации потока в непрерывном спектре с амплитудой не менее 2^m на длине волны 7000 \AA , связанные с переменностью холодного компонента. Спектральный класс его в 2008 г. составлял M6.3. Анализ спектральных наблюдений PU Vul в синей области спектра во время третьего со времени вспышки 1979 г. затменного минимума показал, что глубина минимума в непрерывном спектре на длине волны 4400 \AA превысила 1^m , тогда как согласно фотометрическим наблюдениям, в фильтре В глубина минимума не превышала $0.^m2$.

Глава 4. Повторная симбиотическая новая V407 Cyg

В четвертой главе приводятся результаты анализа фотометрических и спектральных наблюдений уникальной симбиотической звезды V407 Cyg. Она была открыта как Новая Лебедя 1936, затем считалась миридой. Почти 50 лет после открытия не удавалось подтвердить ее симбиотическую природу. Затем с середины 90-ых годов прошлого века она считалась симбиотической миридой. В 2010 г. наблюдалась новоподобная вспышка V407 Cyg, во время которой от системы было зафиксировано гамма-излучение в диапазоне 0.1-10 ГэВ.

В параграфе 4.1 исследуется переменность звезды в ИК-диапазоне. Представлены уточненные эфемериды V407 Cyg ($P=772^d$). По зависимости период – абсолютная звездная величина для мирид сделана оценка расстояния до системы $D \approx 2.4$ кпк и средней светимости ее холодного компонента $L_{cool}=2 \times 10^4 L_\odot$. Показано, что сильная новоподобная вспышка 2010 г. была практически не заметна в ИК-диапазоне (вклад вспыхнувшего компонента в суммарное излучение $<15\%$) и она не оказала влияния на холодный компонент системы. Несмотря на то, что до настоящего времени у V407 Cyg наблюдалась лишь одна вспышка типа RS Oph, по ее особенностям можно сделать вывод, что V407 Cyg – повторная симбиотическая новая. Сравнение фотометрических проявлений вспышек

1936 г. и 1998 г. показало, что вспышка Новой Лебеда 1936 (=V407 Cyg) не являлась таковой, а была аналогична вспышке 1998 г. Обе эти вспышки похожи на вспышки классических симбиотических звезд.

В параграфе 4.2 на основе анализа многочисленных спектров звезды делается вывод о том, что горячий компонент V407 Cyg может находиться в четырех различных состояниях: пассивное (система похожа на одиночную, не симбиотическую, мириду), спокойное (система выглядит как классическая симбиотическая звезда), вспышка типа Z And, вспышка типа RS Oph.

Глава 5. Классическая симбиотическая звезда V1413 Aql

В пятой главе приводятся результаты анализа наблюдений классической симбиотической звезды V1413 Aql, отличающейся аномальным соотношением длительностей спокойного и активного состояний.

В параграфе 5.1 рассматривается период 2003 – 2007 гг., охватывающий этап перехода горячего компонента системы из активного в спокойное состояние. Проанализированы различные критерии спокойного состояния горячего компонента. Показано, что по фотометрическим характеристикам система к 2007 г. еще не вернулась в спокойное состояние. Проведено моделирование распределения энергии в спектре звезды в рамках стандартной трехкомпонентной модели и с аккреционным диском. Сделаны оценки параметров компонентов системы в 2007 г.: $T_{\text{hot}}=72000$ К, $F_{\text{bol,hot}}=5.4 \times 10^{-9}$ эрг/см²с, $T_e=15000$ К, $Sp_{\text{cool}}=M3III$. Анализ запрещенных линий [O III] и [Ne III] показывает, что у V1413 Aql содержание неона, возможно, было повышено от отношению к содержанию кислорода. По результатам обработки спектральных наблюдений V1413 Aql выявлено, что холодный компонент является переменным красным гигантом с амплитудой пульсаций как минимум 2^m на длине волны 7500 Å.

В параграфе 5.2 рассмотрены результаты *UBVJHKL* наблюдений V1314 Aql, полученных в 2008-2011 гг. В конце 2008 г. горячий компонент V1413 Aql испытал очередную сильную ($\Delta V > 2.^m5$) вспышку. В 2010 г. и в 2011 г. у звезды наблюдались два затменных минимума одинаковой амплитуды ($\Delta V \approx 1.^m6$). Анализ наблюдений минимума 2011 г. позволил оценить размеры компонентов системы: $R_{\text{cool}}=0.28$ A, $R_{\text{hot}}=0.17$ A, где A – большая полуось системы. Сделано предположение о том, что, возможно, затмение V1413 Aql не является полным.

В заключении приводятся основные выводы, полученные в ходе работы над диссертацией.

Список литературы

1. Аллен (Allen D.A.) // Proc. Astron. Soc. Aust., v.5, p.369, 1984
2. Бельчински и др. (Belczynski K., Mikolaewska J., Munari U., Ivison R.J., Friedjung M) // Astron. Astrophys. Suppl. Ser., v.146, p.407, 2000
3. Берман (Berman L.) // PASP, v.44, p.318. 1932
4. Бисикало и др. (Бисикало Д.В., Боярчук А.А., Кильпио Е.Ю., Томов Н.А. и Томова М.Т.) // Астрон. журн., т.83, с.809, 2006
5. Боярчук (Боярчук А.А.) // Симбиотические звезды. В книге: Эруптивные звезды, с.113, 1970
6. Боярчук А.А. // Астрон. журн., т.44, с.1016, 1967
7. Кенион (Kenyon J.S.) // The symbiotic stars. Cambridge University Press. 1986
8. Кенион и Веббинк (Kenyon S.J. and Webbink R.F.) // Astrophys J., v.279, p.252, 1984
9. Миколаевска (Mikolajewska J.) // Baltic Astronomy, v.21, p.5, 2012
10. Миколаевска (Mikolajewska J.) // RevMexAA, v.20, p. 33, 2004
11. Пачински и Рудак (Paczynski B. and Rudak B.) // Astron. and Astrophys., v.82, p.349, 1980
12. Рутковски и др. (Rutkowski A., Mikołajewska J. and Whitelock P.) // Balt. Astron., v. 16, p. 49, 2007
13. Соколоски и др. (Sokoloski J. L., Kenyon S. J., Espey B. R., et al) // Astrophys. J., v.636, p.1002, 2006.
14. Тарасова и Скопал (Тарасова Т.Н., Скопал А.) // Астрон. журн., т.89, №3, с.249, 2012
15. Тутуков и Юнгельсон (Тутуков А.В., Юнгельсон Л.Р.) // Астрофизика, т.12, с.521, 1976

16. Фекел и др. (Fekel F.C., Hinkle K.H., Joyce R.R., Skrutskie M.F.) // Astron. J., v.121, p.2219, 2001
17. Фекел и др. (Fekel F.C., Hinkle K.H. and Joyce R.R.) // ASP Conference Proceedings, v.303, p.113, 2003
18. Фекел и др. (Fekel F.C., Hinkle K.H., Joyce R.R., Wood P.R., Howarth I.D.) // Astron. J., v.136, p. 146, 2008
19. Шилд и др. (Schild H., Dumm T. et al) // Astron. and Astrophys., v.366, p.972, 2001
20. Юдин и др. (Юдин Б.Ф., Шенаврин В.И., Колотилов Е.А., Татарникова А.А., Татарников А.М.) // Астрон. журн., т.82, с.262, 2005

Благодарности

Прежде всего, автор хотел бы поблагодарить своего отца Михаила Прохоровича Татарникова, директора детской обсерватории "Вега" города Железнодорожного, который привил ему любовь к астрономии, и свою жену Анну Александровну Татарникову за неоценимую помощь в работе над диссертацией.

Автор благодарен научному руководителю Тарановой О. Г. и коллегам Архиповой В. П., Есипову В. Ф., Колотилову Е. А., Ламзину С. А., Наджипу А. Э., Шенаврину В. И. за помощь в работе.

Отдельно автор хотел бы вспомнить своего первого научного руководителя – д.ф.-м.н. Бориса Федоровича Юдина, умершего в 2004 г. Именно он начал большую часть работ, легших в основу диссертации.