

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 524.33, 524.38

МИТРОФАНОВА Арина Алексеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ РАЗНЫХ
ТИПОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ОПТИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Казанском (Приволжском) федеральном университете.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры астрономии и космической
геодезии КФУ

Шиманский Владислав Владимирович

Официальные оппоненты: **Павленко Елена Петровна**

доктор физико-математических наук, с.н.с.,
КрАО РАН

Буренин Родион Анатольевич

кандидат физико-математических наук,
с.н.с., ИКИ РАН

Ведущая организация: Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), г. Москва

Защита состоится 3 ноября 2017 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 002.203.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории РАН по адресу: 369167, Карачаево-Черкесская республика, Зеленчукский р-н, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " ____ ". _____ 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 002.203.01,
кандидат физ.-мат. наук

Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

Исследование излучения двойных систем на поздних стадиях эволюции и происходящих в них физических процессов является актуальной задачей современной астрофизики. Компоненты таких систем находятся на разных стадиях эволюции, а максимум их излучения приходится на различные части спектра. К этому классу объектов относятся исследуемые в рамках диссертационной работы предкатаклизмические и катаклизмические переменные. Предкатаклизмические переменные [1, 2, 3] представляют собой группу разделенных короткопериодических систем, прошедших стадию общей оболочки [4] и образованных из широких двойных с периодами несколько лет. В процессе эволюции предкатаклизмические переменные становятся полуразделенными с аккрецией вещества на вырожденную компоненту, т.е. переходят в стадию катаклизмической переменной [5]. Главными компонентами этих систем являются белые карлики или горячие субкарлики низкой светимости, вторичными - звезды Главной последовательности поздних спектральных классов (переполняющие свою полость Роша в случае катаклизмических переменных).

Несмотря на повышение интереса к изучению тесных двойных систем на поздних стадиях эволюции в начале 21 века, в частности предкатаклизмических и катаклизмических переменных, значительная часть объектов до сих пор малоизучена или не изучена вовсе. Также для некоторых уже изученных объектов оценки параметров, приведенные в разных работах, имеют большие различия и низкую точность, которая значительно ниже требуемой для выполнения проверки и уточнения теории эволюции звезд. На протяжении нескольких десятилетий при исследовании подобных систем использовались традиционные методы: анализ кривых лучевых скоростей, чернотельное моделирование кривых блеска, анализ спектров с применением эквивалентных ширин линий, их кривых роста или упрощенных аналитических моделей атмосфер. Однако оставалась проблема учета различных взаимодействий (лучистых, гравитационных, аккреционных)

между компонентами систем и физических процессов, протекающих в звездах, через корректное теоретическое моделирование оптического и жесткого излучения. Для преодоления названных трудностей с конца прошлого столетия проводились целенаправленные разработки методик численного моделирования излучения с качественным и количественным описанием физических условий существования вещества этих объектов. Практической реализацией этих методик являются универсальные программные комплексы для расчета кривых блеска и спектров на основе моделей атмосфер и доплеровское картирование. Отметим, что немаловажным стимулом к развитию методик численного моделирования стал резкий рост точности и качества наблюдательных данных, а также расширение списков объектов исследования, открытых с помощью масштабных обзоров неба в различных спектральных диапазонах. В результате сформировалась задача разработки единых подходов к исследованию объектов каждой группы, обеспечивающих, по возможности, максимальную полноту и корректность получаемых результатов. Современные методики численного анализа позволяют эффективно решать эту задачу, т.к. обеспечивают получение полных наборов параметров объектов и выявляют тонкие механизмы взаимодействия их компонент (квазипериодические осцилляции блеска, струи в аккреционных дисках, общие газовые оболочки, эффекты отражения, несферичность компонент).

Актуальность

В связи с улучшением качества наблюдательных данных появилась возможность корректного учета разных механизмов взаимодействия компонент тесных двойных систем на поздних стадиях эволюции (гравитационного, механического, и лучистого) в современных методиках численного моделирования. Актуальность работы определяется интенсивным развитием методов численного моделирования излучения сложных астрофизических систем с взаимодействующими компонентами, в том числе

вырожденными. Данные методики к настоящему времени достигли точности, обеспечивающей количественный анализ всех типов наблюдательных данных с определением фундаментальных характеристик систем и протекающих в них процессов и механизмов излучения.

Цели и задачи исследования

Цель работы: уточнение эволюционного статуса, определение фундаментальных параметров, механизмов взаимодействия и физического состояния компонент тесных двойных систем на основе численного моделирования их оптического излучения.

Для достижения данной цели в рамках диссертации решались следующие задачи:

1. Обработка наборов спектроскопических и фотометрических данных, полученных с помощью телескопов САО РАН и КФУ, для избранных тесных двойных систем;
2. Разработка методики определения параметров молодых предкатаклизмических переменных на основе теоретического моделирования их кривых блеска и спектров с использованием эволюционных треков ядер планетарных туманностей;
3. Разработка методики анализа карликовой Новой GSC 02197-00886 с применением доплеровской томографии и теоретического моделирования ее спектров в низком состоянии. Определение параметров карликовой Новой типа WZ Sge;
4. Анализ соответствия характеристик предкатаклизмических переменных соответствующим теориям их эволюционного и физического состояния. Определение избытков светимости вторичных компонент систем.

Научная новизна работы

Результаты диссертационной работы получены на основе уникальных фотометрических и спектроскопических данных с использованием

современной методики численного моделирования спектров и атмосфер облучаемых звезд, что обуславливает научную новизну работы.

1. Разработана методика анализа ограниченного набора наблюдательных данных предкатаклизмических переменных с совместным применением моделирования их оптического излучения и эволюционных треков ядер планетарных туманностей.

2. Впервые рассчитаны и согласованы с наблюдаемыми кривые блеска и спектры 3 предкатаклизмических переменных с учетом эффектов отражения, несферичности компонент и отклонений от ЛТР.

3. Впервые определен полный набор параметров новой предкатаклизмической переменной PN G068.1+11.0.

4. Расширена зависимость "возраст"- "избыток светимости" для вторичных компонент предкатаклизмических переменных на 12 молодых предкатаклизмических переменных.

5. Предложен метод определения параметров карликовых Новых на основе моделирования их оптических спектров в фазах релаксации и в спокойном состоянии.

Впервые построены доплеровские карты и получен набор параметров карликовой Новой GSC 02197-00886.

Научная, методическая и практическая значимость работы

Научную значимость представляют:

1. Наборы фундаментальных параметров PN G068.1+11.0, TW Crv, RE J2013+4002 и GSC 02197-00886;

2. Вывод о наличии избытков светимости вторичных компонент PN G068.1+11.0 и TW Crv;

3. Вывод об отсутствии избытков светимости вторичной компоненты RE J2013+4002 и принадлежности системы к группе предкатаклизмических переменных промежуточного возраста;

4. Вывод о переходе аккреционного диска карликовой Новой GSC 02197-00886 в оптически тонкое состояние в фазах ее поздней релаксации.

Методическую значимость представляют:

1. Методика определения параметров молодых предкатаклизмических переменных на основе моделирования их оптического излучения с применением эволюционных треков ядер планетарных туманностей;
2. Метод определения параметров карликовых Новых типа WZ Sge путем моделирования их оптических спектров в низком состоянии.

Практическую значимость представляют:

1. Кривые блеска, наборы спектров и лучевых скоростей 3 предкатаклизмических переменных и карликовой Новой типа WZ Sge;
2. Эфемериды RE J2013+4002 и PN G068.1+11.0;
3. Доплеровские томограммы GSC 02197-00886 в фазах релаксации и спокойного состояния системы.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты обработки и первичного анализа фотометрических и спектроскопических наблюдений предкатаклизмических переменных PN G068.1+11.0, TW Crv и RE J2013+4002. Классификация предкатаклизмических переменных PN G068.1+11.0 и RE J2013+4002 с построением их эфемериды.
2. Методика анализа молодых предкатаклизмических переменных с ограниченным наблюдательным рядом на основе моделирования их излучения с применением эволюционных треков ядер планетарных туманностей. Фундаментальные параметры PN G068.1+11.0 и TW Crv. Зависимость "возраст"- "избыток светимости", расширенная на 12 молодых предкатаклизмических переменных. Вывод о наличии избытков светимости вторичных компонент PN G068.1+11.0 и TW Crv, характерных для систем этого типа.

3. Фундаментальные параметры предкатаклизмической переменной RE J2013+4002. Выводы об отсутствии избытка светимости вторичной компоненты, отсутствии у нее проявлений сильного магнитного поля и ее принадлежности к группе предкатаклизмических переменных промежуточного возраста.

4. Результаты обработки и первичного анализа фотометрических и спектроскопических наблюдений GSC 02197-00886. Доплеровские карты, модель формирования излучения GSC 02197-00886. Вывод о доминировании белого карлика в оптическом излучении системы в низком состоянии. Фундаментальные параметры GSC 02197-00886.

Достоверность полученных в рамках диссертационной работы результатов подтверждается:

1. Согласием теоретических и наблюдаемых кривых блеска (TW Crv, PN G068.1+11.0, RE J2013+4002) и спектров всех систем.
2. Соответствием определенных наборов параметров объектов средним значениям для уже изученных систем.
3. Использование методик моделирования излучения тесных двойных систем, ранее неоднократно протестированных при исследовании аналогичных астрофизических систем.

Аппробация результатов

Основные результаты были представлены на 8 российских и международных конференциях:

1. Научная конференция "Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы", г. Москва, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова и Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, 28 мая – 1 июня 2012г.;

2. Всероссийская молодежная астрономическая конференция "Наблюдаемые проявления эволюции звезд", п. Нижний Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 15-19 октября 2012г.;
3. Международная астрономическая школа-конференция "Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radio-astronomy and astrobiology", Украина, г. Одесса, Одесский национальный университет им. И.И.Мечникова, 19-25 августа 2013г.;
4. Международная конференция "Звездные атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля", г. Санкт-Петербург, Главная астрономическая обсерватория РАН (Пулково), 23-27 июля 2014г.;
5. Научная конференция "Астрономия от ближнего космоса до космологических далей", г. Москва, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова и Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, 25-30 мая 2015г.;
6. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2015)", г. Москва, Институт космических исследований РАН, 21-24 декабря 2015г.;
7. Международная астрономическая конференция "Физика звезд: от коллапса до коллапса", п. Нижний Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 3-7 октября 2016г.;
8. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2016)", г. Москва, Институт космических исследований РАН, 20-23 декабря 2016г.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых зарубежных и отечественных журналах, а также в 8 публикациях в сборниках трудов научных конференций:

1. Шиманский, В.В. Предкатаклизмические переменные промежуточного возраста SDSS J172406+562003 и RE J2013+4002 / В.В. Шиманский, Н.В.

- Борисов, Д.Н. Нуртдинова, А.А. Митрофанова, В.В. Власюк, О.И. Спиридонова // *Астрономический Журнал*. - 2012. – Т. 89 - № 6. - С. 492-507.
2. Митрофанова, А.А. Анализ эволюции катаклизмической переменной GSC 02197-00886 / А.А. Митрофанова, Н.В. Борисов, В.В. Шиманский // *Астрофизический Бюллетень*. - 2014. - Т. 69 - № 1- С. 88-105.
3. Митрофанова, А.А. PN G068.1+11.0 – молодая предкатаклизмическая переменная с экстремально горячей главной компонентой / А.А. Митрофанова, Н.В. Борисов, В.В. Шиманский, О.И. Спиридонова, М.М. Габдеев // *Астрономический Журнал*. - 2016. - Т. 93 - № 2. - С. 210-223.
4. Шиманский, В.В. О формировании оптического излучения TW Crv / В.В. Шиманский, А.А. Митрофанова, Н.В. Борисов, С.Н. Фабрика, А.И. Галеев // *Астрофизический Бюллетень*. - 2016. - Т. 71. - № 4. - с. 497-509.
5. Shimansky, V.V. Analysis of observations of the Dwarf Novae Pegasi 2010 / V.V. Shimansky, A.A. Mitrofanova, N.V. Borisov, M.M. Gabdeev // *Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory*. - 2013. - V. 109. - P. 16-22.
6. Mitrofanova, A.A. The study of pre-cataclysmic binaries through the theoretic modeling of light curves and spectra / A.A. Mitrofanova, V.V. Shimansky, N.V. Borisov // *ASP Conference Series*. – 2017. - V. 510. - P. 426-430.
7. Шиманский В.В. Две новых ТДС на поздних стадиях эволюции / В.В. Шиманский, Н.В. Борисов, И.Ф. Бикмаев, А.А. Митрофанова, Д.Г. Якин, М.М. Габдеев // *Международная научная конференция «Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы» г. Москва, 28 мая – 1 июня 2012 г.* - С. 42.
8. Митрофанова, А.А. Параметры и эволюция звезд с компактными компонентами / А.А. Митрофанова, В.В. Шиманский, Н.В. Борисов, Габдеев М.М., Якин Д.Г. // *Тезисы международной конференции "Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radio-astronomy and astrobiology"*. - 19-25 августа 2013. - С. 45.
9. Митрофанова, А.А. Физика предкатаклизмических переменных с sdO- и sdB-субкарликами / А.А. Митрофанова, В.В. Шиманский, Н.В. Борисов,

Деминова Н.Р., Нуртдинова Д.Н., Спиридонова О.И. // Тезисы международной конференции "Звездные атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля". - 23-27 июня 2014. - С. 24.

10. Митрофанова, А.А. Исследование двух предкатаклизмических переменных / А.А. Митрофанова, В.В. Шиманский, Н.В. Борисов // Тезисы международной конференции "Астрономия от ближнего космоса до космологических далей". - 25-30 мая 2015. - С.65.

11. Шиманский, В.В. Двойные системы с жестким УФ-излучением / В.В. Шиманский // Тезисы всероссийской конференции "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2015)". - 21-24 декабря 2015. - С. 27.

12. Митрофанова, А.А. Исследование предкатаклизмических переменных с помощью теоретического моделирования кривых блеска и спектров/ А.А. Митрофанова, В.В. Шиманский, Н.В. Борисов // Тезисы международной конференции "Физика звезд: от коллапса до коллапса". - 3-7 октября 2016. - С. 46.

13. Митрофанова, А.А. Исследование тесных двойных систем разных типов на основе моделирования их оптического излучения / А.А. Митрофанова, В.В. Шиманский, Н.В. Борисов // Тезисы всероссийской конференции "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2016)". - 20-23 декабря 2016. - С. 44-45.

Личный вклад автора

Автор диссертации принимал участие в формулировании тематики исследований, проведении наблюдений на телескопах Цейсс-1000 и БТА САО РАН. Автором выполнены обработка фотометрических (RE J2013+4002, TW Crv, GSC 02197-00886) и спектроскопических (RE J2013+4002, TW Crv, PN G068.1+11.0, GSC 02197-00886) данных и доплеровское картирование GSC 02197-00886. Наравне с соавторами автор участвовал в разработке и реализации методов анализа всех систем,

моделировании их излучения, определении наборов параметров, обобщении и анализе полученных результатов и написании текстов всех статей. В работах 1 и 7 из списка публикаций по теме диссертации вклад автора относится только к системе RE J2013+4002.

Структура диссертации

Диссертация общим объемом 169 страниц состоит из 5 глав, введения, заключения и списка литературы. Работа содержит 53 рисунка, 15 таблиц и 33 формулы. Список литературы включает в себя 186 источников.

Во **Введении** обосновывается актуальность тематики диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, научная новизна, научная, методическая и практическая значимости работы, достоверность полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора в исследование. Приводятся список конференций, на которых докладывались основные результаты, и список статей и тезисов конференций, в которых эти результаты были опубликованы. Кроме того введение содержит краткое описание диссертации по главам.

Первая глава состоит из общей части и двух выделенных пунктов, описывающих современное понимание физики процессов, происходящих в предкатаклизмических и катаклизмических переменных. В пункте 1.1 представлена информация об эволюционном состоянии, внутренней классификации, фундаментальных параметрах, спектральных и фотометрических характеристиках предкатаклизмических переменных в зависимости от их принадлежности к одной из трех групп. Пункт 1.2 посвящен краткому описанию типов катаклизмических переменных в зависимости от характера аккреционных процессов и величины магнитного поля, с более подробным рассмотрением карликовых Новых (в частности объектов типа WZ Sge) и проявлений их вспышечной активности. В заключении первой главы формулируются основные проблемы,

существующие при изучении предкатаклизмических и катаклизмических переменных и пути их решения в рамках данной диссертации.

Вторая глава содержит два пункта, в которых обобщена информация о фотометрических и спектроскопических наблюдениях исследуемых объектов с указанием особенностей их получения (применяемая аппаратура и погодные условия) и первичной редукции данных (применяемые методы).

В **третьей главе** приведено описание используемой в диссертации методики моделирования облучаемых атмосфер и их оптического излучения, а также реализующего ее программного комплекса SPECTR. Применяемая методика моделирования учитывает эффекты отражения и несферичности при получении структуры компонент разделенных тесных двойных систем, а в расчетах синтетических спектров - бланкетирование в основных молекулярных полосах и более полумиллиона линий и отклонения от ЛТР для избранных элементов. Подробно описаны особенности работы метода моделирования атмосфер облучаемых звезд и использованное в нем приближение баланса функций нагрева и охлаждения звездного газа.

Четвертая глава посвящена исследованию трех предкатаклизмических переменных (PN G068.1+11.0, TW Crv и RE J2013+4002) и состоит из трех пунктов. В пунктах 4.1 и 4.2 изложен комплексный анализ спектроскопических и фотометрических данных всех систем с подробным описанием построения кривых блеска и кривых лучевых скоростей с применением метода кросс-корреляции спектров. Предварительно для каждого объекта дан обзор основных результатов их изучения, опубликованных в литературе. Показано, что для объектов PN G068.1+11.0 и TW Crv возможно определение амплитуды лучевых скоростей только вторичной компоненты, в то время как для RE J2013+4002 - суммарной амплитуды лучевых скоростей двух компонент. Здесь же приведены результаты теоретического моделирования кривых блеска и спектров и согласования их с наблюдаемыми данными, рассмотрены температурные структуры облучаемых атмосфер холодных звезд для зон горячего пятна и

вне его. Выдвинуто предположение, что в атмосфере вторичной компоненты TW Crv существуют избытки азота и кислорода, а в атмосфере вторичной компоненты PN G068.1+11.0 - углерода (возможно, и азота), что ранее было обнаружено при изучении ряда молодых предкатаклизмических переменных. Установлено, что химический состав атмосферы холодной звезды в RE J2013+4002 характеризуется пониженным содержанием металлов, а линии HeI и частично H β в спектрах объекта формируются под воздействием эффектов флуоресценции в лаймановской хромосфере в условиях небулярного приближения. Представлены таблицы с итоговыми наборами фундаментальных параметров исследованных объектов. Показано, что параметры PN G068.1+11.0 могут быть рассчитаны только с использованием эволюционных треков ядер планетарных туманностей разных масс. В пункте 4.3 представлены общие выводы об эволюционном статусе систем. Показано полное соответствие физических характеристик главных компонент молодых предкатаклизмических переменных эволюционным трекам одиночных ядер планетарных туманностей. Для наиболее полной в настоящий момент выборки исследованных объектов подтвержден вывод о завершении процесса релаксации холодных звезд в предкатаклизмических переменных за время не более $t=2 \times 10^6$ лет.

В **пятой главе** представлен анализ карликовой Новой GSC 02197-00886 с определением набора фундаментальных параметров системы. Начало главы содержит обзор основных результатов исследования объекта, опубликованных в литературе. Далее описаны построение и особенности кривых блеска и кривых лучевых скоростей. Подробно изложены использованные методики определения лучевых скоростей компонент системы методом кросс-корреляции и методом Шафтера, построения доплеровских томограмм и моделирования спектров объекта во вспышке, в фазе промежуточного падения блеска и в спокойном состоянии. На основе выполненного анализа показано, что аккреционный диск GSC 02197-00886 перешел из оптически толстого состояния во время вспышки в оптически

тонкое в спокойном состоянии системы. На основе моделирования оптических спектров в спокойном состоянии получен полный набор фундаментальных параметров системы и произведено их сравнение с средними характерными значениями для систем типа WZ Sge и SU UMa.

В Заключении сформулированы общие результаты и выводы диссертационной работы.

Список литературы

1. Ritter, H. Precataclysmic binaries / H. Ritter // *Astronomy and Astrophysics*. - 1986. - V. 169. - № 1-2. - P. 139-148.
2. Marsh, T.R. Detached white-dwarf close-binary stars - CV's extended family / T.R. Marsh // *New Astronomy Review*. -2000. - V. 44. - I. 1-2. - P. 119-124.
3. Hillwig, T.C. Post-common-envelope binary stars and the precataclysmic binary PG 1114-187 / T.C. Hillwig, R.K. Honeycutt, J.W. Robertson // *The Astronomical Journal*. - 2000. - I. 2. - P. 1113-1119.
4. Paczynski, B. Evolution of close binaries / B. Paczynski // *Sixth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*. - 1973. - V. 224. - P. 233.
5. Smith, R.C. Cataclysmic variables / R.C. Smith // *arXiv:astro-ph/0701654v1*.
6. Wawrzyn, A.C. Structure and spectra of irradiated secondaries in close binaries. A model calculation of the pre-cataclysmic variable UU Saggiatae / A.C. Wawrzyn, T.S Barman, H.M. Hunther, P.H. Hauschildt, K.M. Exter // *Astronomy and Astrophysics*. - 2009. - V. 505. - I. 1. - P. 227-237.
7. Шиманский, В.В. Анализ фундаментальных параметров V477 Lyr / В. В. Шиманский, С.А. Позднякова, Н. В. Борисов, И. Ф. Бикмаев, А. И. Галеев, Н. А. Сахибуллин, О. И. Спиридонова // *Письма в Астрон. Журн.* - 2008. - Т. 34. - № 6. - С. 465-480.
8. Шиманский, В.В. О природе уникальной предкатаклизмической переменной V664 Cas с двухпиковыми профилями бальмеровских линий в спектрах / В.В. Шиманский, Н.В. Борисов, Н.А. Сахибуллин, А.Е. Сурков // *Астрон. журн.* - 2004. - Т. 81. - № 7. - С. 620-634.
9. Ferguson, D.H. The spectacular emission-line reflection effect of BE Ursae Majoris / D.H. Ferguson and T.A. James // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. - 1994. - V. 94. - № 2. - P. 723-747.

10. Blocker, T. Stellar evolution of low- and intermediate-mass stars. II. Post-AGB evolution / T. Blocker // *Astronomy and Astrophysics*. - 1995. - V. 299. - P. 755-769.