

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Государственный астрономический институт  
имени П.К. Штернберга

На правах рукописи

Зубарева Александра Михайловна

**Фотометрические и спектральные исследования  
катаклизмических переменных звезд с сильным и слабым  
магнитным полем**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2011

Работа выполнена в отделе нестационарных звезд и звездной спектроскопии Института астрономии Российской академии наук

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук  
Самусь Николай Николаевич  
(Институт астрономии РАН)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук  
Фабрика Сергей Николаевич  
(Специальная астрофизическая обсерватория РАН)  
кандидат физико-математических наук  
Катышева Наталья Андреевна  
(Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга)

**Ведущая организация:**

Уральский Государственный Университет

Защита диссертации состоится 2 июня 2011 года в 14:00 на заседании Диссертационного совета по астрономии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, шифр Д 501.001.86.

Адрес: 119992, Москва, Университетский проспект, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ (Москва, Университетский проспект, 13).

Автореферат разослан 28 апреля 2011 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета

доктор физико-математических наук

С.О. Алексеев

## Общая характеристика работы

Катаклизмические переменные звезды (CVs) представляют собой тесные двойные системы (ТДС) на поздней стадии эволюции, которые состоят из белого карлика, маломассивной звезды-донора, находящейся на главной последовательности, и аккреционного диска или аккреционных колонн, образованных веществом звезды-донора. Свое название эта группа объектов получила из-за того, что протекающие в них физические процессы приводят к катаклизмам.

Катаклизмические переменные подразделяются на две большие группы в зависимости от характеристик главного компонента системы – белого карлика. Если магнитное поле белого карлика невелико, вещество красного карлика покидает полость Роша через внутреннюю точку Лагранжа  $L_1$  и образует вокруг белого карлика аккреционный диск. Такие системы принято называть дисковыми. В случае, если магнитное поле главного компонента близко к 1 МГс, его магнитосфера будет столь велика, что аккреционный диск либо не формируется вообще (поляры), либо будет менее протяженным, чем у дисковых систем (промежуточные поляры).

Дисковые CVs типа SU UMa показывают два типа вспышек с амплитудой от  $3^m$  до  $8^m$ . “Нормальные” вспышки обычно продолжаются несколько суток и повторяются более или менее регулярно через десятки суток. “Сверхвспышки” продолжаются не менее двух недель и разделены интервалами в десятки дней. Во время сверхвспышек у звезд типа SU UMa наблюдаются колебания блеска с амплитудой в десятые доли звездной величины, которые принято называть “сверхгорбами”.

Сверхгорбы называют положительными, если их период на несколько процентов превышает орбитальный период системы. Причиной их возникновения является приливно-тепловая неустойчивость. Тепловая неустойчивость запускает нормальные вспышки, которые уменьшают массу диска. Однако до следующей нормальной вспышки диск накапливает больше вещества, чем успеет впоследствии сбросить на поверхность белого карлика. При достижении критического радиуса диск становится эксцентрическим из-за действия приливной неустойчивости. Возрастающее приливное трение заставляет диск прецессировать в направлении орбитального движения. В результате блеск системы будет изменяться

с периодом биений между орбитальным периодом системы и периодом прецессии аккреционного диска.

Отрицательные сверхгорбы, период которых на несколько процентов меньше орбитального периода системы, возникают в том случае, когда аккреционный диск в системе наклонен к плоскости орбиты. Линия узлов диска прецессирует в направлении, обратном орбитальному движению системы. Механизмы, ответственные за образование наклонных аккреционных дисков, неизвестны до сих пор. В диссертации представлены результаты фотометрических и спектральных наблюдений катаклизмических переменных звезд различных типов, выполненных с 2005 по 2010 год.

## Актуальность проблемы

Исследования катаклизмических переменных звезд имеют большое значение для различных областей астрофизики. Эти системы дают возможность детально изучать равновесные и неравновесные аккреционные диски, термоядерные взрывы на поверхности белых карликов (во время вспышек Новых звезд). Представления о процессах аккреции вещества, как дисковой, так и принимающей иные формы, позволяют разобраться в физике более экзотических объектов: рентгеновских двойных звезд, черных дыр и активных ядер галактик. Катаклизмические переменные представляют собой физические лаборатории, в которых вещество находится в условиях, невозможных в земных лабораториях. Напряженность магнитного поля белых карликов в составе магнитных CVs превышает значение напряженности магнитного поля Земли в сотни тысяч раз. Магнитное поле такой напряженности полностью определяет поведение вещества, поставляемого красным карликом. Двойственность катаклизмических переменных позволяет получить значения масс и радиусов компонентов системы. Эти значения отличаются от параметров, свойственных одиночным белым и красным карликам, поскольку звезды в ТДС эволюционируют иначе, чем одиночные.

В рамках одной работы едва ли можно отразить все многообразие процессов, протекающих в CVs. Для исследования были выбраны звезды различных подтипов переменности, что позволило затронуть несколько наиболее актуальных аспектов физики катаклизмических переменных.

Только в 1995 году у одной из катаклизмических переменных звезд были обнаружены и положительные, и отрицательные сверхгорбы, то есть в ее аккреционном диске действуют несколько различных физических процессов. К 2011 году достоверно известно всего четыре таких CVs, одна из которых, MT Dra, исследуется в этой работе.

К 2006 году было известно почти 90 поляров, однако наибольшее количество данных в различных спектральных диапазонах получено только для самой известной звезды этого типа, AM Her. Одна из глав данной работы посвящена полярю MT Dra, фотометрические наблюдения которого проводились в течение шести сезонов.

Среди большого количества малоизученных объектов, которые на основе анализа спектров, оценок показателей цвета или на основании рентгеновских данных отнесены к вероятным катаклизмическим переменным, можно обнаружить очень необычные и интересные. У одной из таких звезд, NSV 25181, помимо изменений блеска, являющихся типичными для новоподобных звезд (фликеринг, переменность среднего за ночь блеска системы), были обнаружены периодичности, характерные для нерадиальных пульсаций белых карликов (звезды типа ZZ Cet). Комбинация переменности, отражающей процесс аккреции вещества в CVs, и нерадиальных пульсаций белого карлика является дополнительной возможностью получить ценную информацию о главных компонентах систем методами астросейсмологии. К 2010 году достоверно известно всего 11 катаклизмических переменных, обладающих этими свойствами.

Перечисленные обстоятельства показывают, что изучение катаклизмических переменных является актуальной проблемой современной астрофизики.

## Цель работы

Целью работы является исследование процессов, протекающих в катаклизмических переменных звездах. Для достижения цели диссертационной работы решаются следующие задачи:

- фотометрия недостаточно изученных катаклизмических переменных звезд;

- поиск и анализ фотометрической переменности избранных CVs на различных временных масштабах;
- поиск периодичностей и выяснение их природы;
- получение и интерпретация спектральных наблюдений катаклизмических переменных звезд, представляющих наибольший астрофизический интерес;
- сопоставление фотометрических и спектральных периодичностей, анализ причины их различия.

## Научная новизна

В ходе выполнения работы получен ряд новых результатов.

Впервые получен обширный ряд фотометрических наблюдений, в том числе и многоцветные наблюдения, поляра MT Dra. Выяснено, что орбитальный период системы не меняется на протяжении 17 лет, что не совсем характерно для катаклизмических переменных звезд.

Впервые получены детальные спектральные наблюдения MT Dra.

Обнаружена фотометрическая переменность блеска двух новоподобных звезд, одна из которых, по-видимому, содержит нерадиально пульсирующий белый карлик. К 2010 году известно, что белые карлики пульсируют в 11 катаклизмических переменных.

Подтверждено, что у звезды MN Dra типа SU UMa одновременно наблюдаются положительные и отрицательные сверхгорбы. Таким образом, она является только четвертой ТДС, аккреционный диск которой испытывает два различных типа прецессии во время сверхвысышек.

## Научная и практическая значимость

Результаты работы могут быть использованы при изучении звезд типа SU UMa, полярных и новоподобных звезд. Накопленный наблюдательный материал может быть полезен для уточнения теории катаклизмических переменных звезд. Особую значимость для построения моделей ТДС с аккреционными дисками имеют результаты наблюдений MN Dra, показывающей и положительные, и отрицательные сверхгорбы.

## Основные результаты, выносимые на защиту:

- Для MT Dra впервые получены детальные фотометрические наблюдения. Подтвержден орбитальный период. Он остается неизменным на протяжении 17 лет, что редко наблюдается у катаклизмических переменных. По наблюдениям 2006 года выяснено, что переход в низкое состояние блеска происходит быстро: за одни сутки блеск MT Dra уменьшился на  $1^m$ . На основании анализа наблюдений за шесть лет отмечено, что переходы MT Dra из одного состояния блеска в другое происходят непериодически. Впервые получены многоцветные наблюдения MT Dra в различных состояниях блеска. Выделены три режима аккреции вещества на магнитные полюса белого карлика. Амплитуда изменения лучевых скоростей близка к 1200 км/с. Эквивалентные ширины линий меняются в широком диапазоне. Наблюдаемая фотометрическая и спектральная переменность MT Dra в высоком состоянии блеска объясняется различными условиями видимости аккреционных струй на разных фазах орбитального цикла.
- Для RX J1951.7+3716 впервые получены фотометрические наблюдения. Открыта переменность блеска с амплитудой  $0^m8$ . Кривая блеска типична для новоподобных катаклизмических переменных. Выявлены возможные периодичности изменений блеска,  $0^d628$  и  $0^d3879$ , связанные суточным сопряжением.
- В поле звезды RX J1951.7+3716 открыты пять затменных переменных звезд. Две из них – переменные типа W UMa (EW), три остальные звезды – переменные типа  $\beta$  Per (EA).
- Для NSV 25181 впервые получены детальные фотометрические наблюдения. Блеск системы изменяется на  $0^m4$ . Кривая блеска типична для новоподобных катаклизмических переменных. Обнаружена переменность блеска с периодами в 28.32 и 24.58 мин. Подобные колебания могут объясняться нерадиальными пульсациями белого карлика в тесной двойной системе (переменность типа ZZ Cet).
- Проведены обширные фотометрические наблюдения уникальной катаклизмической переменной MN Dra – звезды типа SU UMa в известном “пробеле периодов”. Во время двух последовательных сверх-

вспышек, июля и сентября 2009 года, были обнаружены положительные сверхгорбы с периодом  $0^d.105442$ . Период изменяется со скоростью  $-1.5 \times 10^{-4}$  периода за период. Во время нормальных вспышек и в спокойном состоянии MN Dra блеск меняется с периодом  $0^d.096046$ . Амплитуда этих колебаний достигает  $1^m.5$  в спокойном состоянии, а во время нормальных вспышек близка к  $0^m.3$ . Эта переменность интерпретируется как отрицательные сверхгорбы. MN Dra является четвертой звездой типа SU UMa, у которой одновременно наблюдаются и положительные, и отрицательные сверхгорбы.

## Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. *Фотометрическое исследование поляра MT Dra в 2005 – 2009 годах*, А.М. Зубарева, Е.П. Павленко, М.В. Андреев, С.В. Антипин, Н.Н. Самусь, А.В. Сергеев, *Астрономический журнал*, 2011, **88**, №3, 250–255
2. *MN Dra – In-the-Gap Dwarf Nova With Negative Superhumps*, E. Pavlenko, T. Kato, M. Andreev, A. Sklyanov, A. Zubareva, D. Samsonov, I. Voloshina, V. Metlov, S. Shugarov, N. Parakhin, A. Golovin, O. Antoniuik, 2010, *AIP Conference Proceedings*, **1273**, 320–323
3. *Photometric Study of a Nova-Like Cataclysmic Variable Star NSV 25181*, А.М. Zubareva, S.V. Antipin, *Information Bulletin on Variable Stars*, 2010, **5956**
4. *Periodicities of a Nova-Like Cataclysmic Variable Star RX J1951.7+3716*, А.М. Zubareva, S.V. Antipin, *Information Bulletin on Variable Stars*, 2011, **5968**
5. *Optical Spectroscopy of MT Dra in 2006 and 2009*, А.М. Zubareva, V.V. Shimansky, N.V. Borisov, A.V. Valeev, 2011, arXiv:1104.4413v1
6. *Фотометрическое исследование поляра RX J1846.9+5538*, А.М. Зубарева, 2006, *Физика Космоса: Труды 35-й Международной студенческой научной конференции*, Екатеринбург, стр. 220



7. *Спектроскопия и многоцветная фотометрия полярна MT Dra (RX J1846.9+5538)*, А.М. Зубарева, 2007, Физика Космоса: Труды 36-й Международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, стр. 207
8. *Фотометрия MT Dra в 2008 году*, А.М. Зубарева, С.В. Антипин, 2009, Физика космоса: Труды 38-й Международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, стр. 325
9. *Four New Eclipsing Variable Stars*, N.A. Virnina, S.V. Antipin, A.M. Zubareva, *Peremennye zvezdy Supplement*, 2011, 11, 9

## Личный вклад автора

Автором работы выполнена наибольшая часть фотометрических наблюдений (все наблюдения RX J1951.7+3716 и NSV 25181, около 90% наблюдений MT Dra, участие в кампании по исследованию MN Dra). Автор принимал участие в спектральных наблюдениях MT Dra в 2009 году. Все данные обработаны автором. Автор внес основной вклад в интерпретацию результатов.

## Апробация результатов

Результаты представлены

- на семинарах:
  - отдела физики звезд и галактик НИИ КраО (май 2007 года)
  - ИНАСАН (октябрь 2010)
- на конференции молодых ученых ИНАСАН (октябрь 2009 года)
- на международных конференциях:
  - Физика космоса, Коуровка, Россия (2006, 2007, 2009 годы)
  - Interacting Binary Stars, Nauchny, Crimea (June 2008)
  - 17th European White Dwarf Workshop, Tübingen, Germany (August 2010).

## Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 97 страниц, в ней содержатся 40 рисунков, 6 таблиц, список цитируемой литературы включает в себя 65 наименований.

## Содержание работы

Во *введении* показана актуальность проблемы, а также сформулирована цель исследования. Представлены основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту. Показаны их научная новизна и практическая ценность.

В *первой главе* выполнен обзор свойств катаклизмических переменных с сильным и слабым магнитным полем. Особое внимание уделено полярам и дисковым тесным двойным системам типа SU UMa. Рассмотрены модели неустойчивостей диска, которые применяются для объяснения наблюдательных данных о звездах этого типа. Кратко описаны особенности распределения катаклизмических переменных по орбитальным периодам и эволюционный путь тесных двойных систем, которые на данный момент находятся на стадии катаклизмических переменных звезд.

*Вторая глава* посвящена фотометрическим и спектральным исследованиям полярного белого карлика в тесной двойной системе MT Dra. У белого карлика в этой тесной двойной системе активны два магнитных полюса. Когда темп перетекания вещества в системе высок, активны оба магнитных полюса белого карлика. В такие моменты звезда находится в высоком состоянии блеска. На промежутках времени, когда темп аккреции вещества низкий, активен только один магнитный полюс белого карлика. Соответственно, в такие моменты поляр показывает низкое состояние блеска.

Точные значения таких параметров системы, как угол наклона и угол между осью магнитного диполя и осью вращения белого карлика, до сих пор неизвестны. Однако по форме кривых блеска и изменению лучевых скоростей MT Dra имеет много общего с хорошо изученным полярным ST LMi (например, Робертсон и др., 2008), за исключением того обстоятельства, что большую часть времени у ST LMi активен только

один магнитный полюс.

В *разделе 2.1* исследуется массив фотометрических наблюдений в полосах, близких к *BVR* Джонсона и Кузинса. За шесть сезонов (с 2005 по 2010 годы) на семи телескопах обсерваторий России и Украины получено более 5200 индивидуальных ПЗС-кадров. За время наблюдений поляр находился в различных состояниях блеска. Подтвержден орбитальный период исследуемой тесной двойной системы, равный  $0^d.0893869$ , и его постоянство на протяжении 17 лет (по сравнению с периодом Шварца и др., 2002). Проводится анализ переменности *MT Dra* на интервале месяцев и лет. Было выяснено, что переходы *MT Dra* из высокого состояния блеска в низкое и обратно происходят не периодически. По наблюдениям октября 2006 года удалось установить, что переход в низкое состояние происходит за одни сутки. За несколько орбитальных циклов *MT Dra* стала слабее на  $1^m$ . Обсуждаются три режима аккреции вещества на магнитные полюса белого карлика.

В *разделе 2.2* описываются спектральные наблюдения *MT Dra*. Данные были получены в марте 2006 года и октябре 2009 года на редукторе светосилы и щелевом спектрографе SCORPIO 6-метрового телескопа БТА САО РАН. В общей сложности получено 34 спектра низкого разрешения, которые покрывают почти три орбитальных периода системы. Спектры были получены, когда исследуемая переменная находилась в высоком состоянии блеска. Они являются характерными для спектров полярных звезд и содержат линии серии Бальмера, нейтрального и ионизованного гелия. Все линии в спектре эмиссионные, не наблюдается никаких признаков вторичного компонента системы. Профили линий имеют сложную форму. Лучевые скорости вычислялись для центра тяжести линий. Амплитуда изменения лучевых скоростей, определенных по линиям водорода и ионизованного гелия, близка к 1200 км/с. Такие значения скоростей характерны для газа, выпадающего в областях вблизи магнитных полюсов белого карлика. Формы кривых лучевых скоростей близки к синусоиде. Учитывая, что в высоком состоянии блеска в системе активны два магнитных полюса, следовало ожидать, что на кривой лучевых скоростей будут видны две волны за период. Вероятно, расстояние между линиями, которые формируются аккреционными колоннами, невелико, и оба компонента сливаются. Эквивалентные ширины линий меняются в широком диапазоне.

Фотометрические и спектральные наблюдения сопоставляются в *разделе 2.3*. Фазы максимумов и минимумов кривой блеска и кривых лучевых скоростей отличаются приблизительно на 0.1 периода. Мы полагаем, что аккреционные колонны ориентированы таким образом, что максимумы на кривой блеска приходятся на фазы, когда мы видим колонны “с торца”. Имеющийся наблюдательные данные удается объяснить, если ось вращения белого карлика и ось магнитного диполя поляра МТ Дра ориентированы так же, как и у ST LMi.

*Третья глава* содержит в себе информацию о фотометрических наблюдениях двух малоизученных новоподобных звезд RX J1951.7+3716 и NSV 25181.

*Раздел 3.1* посвящен звезде RX J1951.7+3716. В августе 2010 года на телескопе Цейс-600 Крымской лаборатории ГАИШ получено более 2200 индивидуальных ПЗС-кадров. На основе этих данных удалось сделать вывод о том, что объект принадлежит к новоподобным катаклизмическим переменным звездам. Было выявлено, что амплитуда изменения блеска различна в различные ночи. Кроме того, звезда показывала фликеринг: блеск изменяется на несколько десятых долей звездной величины на интервалах времени 10–15 мин. Спектральный период (Петерс и Торстенсен, 2005) по фотометрическим данным подтвердить не удалось. Обсуждаются обнаруженные периодичности.

В *разделе 3.2* описаны наблюдения NSV 25181, выполненные на телескопе Цейс-600 Крымской лаборатории ГАИШ в августе 2010 года. В ходе анализа первых детальных фотометрических наблюдений (более 1100 ПЗС-кадров) было выявлено три типа изменения блеска. Во-первых, был обнаружен фликеринг. Во-вторых, средний за ночь блеск системы также оказался переменным. Эти особенности позволяют отнести NSV25181 к новоподобным катаклизмическим переменным звездам. В-третьих, были обнаружены периодичности в 28.32 и 24.58 мин. Значения периодов и амплитуды изменения блеска характерны для нерадиальных пульсаций белого карлика, наблюдаемых у звезд типа ZZ Cet. К 2010 году достоверно известно всего 11 катаклизмических переменных, обладающих этими свойствами (Скоди и др., 2010; Аппас и др., 2006; Генсике и др., 2006).

*Раздел 3.3* включает в себя описание пяти новых переменных звезд, открытых в поле RX J1951.7+3716. Все обнаруженные звезды относятся к затменным переменным. Две из них – переменные типа W UMa (EW),

три остальные звезды – переменные типа  $\beta$  Per (EA).

В *четвертой главе* исследуется звезда MN Dra, пекулярная карликовая новая типа SU UMa, находящаяся в известном “пробеле периодов”; период положительных сверхгорбов равен 2.53 ч ( $0^d.105442$ ). Наблюдения проводились на четырех телескопах в рамках кампании с июля по ноябрь 2009 года. Во время двух последовательных сверхвспышек, июля и сентября 2009 года, были обнаружены положительные сверхгорбы. С помощью диаграммы O–C проанализирована скорость изменения периода положительных сверхгорбов. Было установлено, что период сверхгорбов уменьшается со скоростью  $-1.5 \times 10^{-4}$  периода за период. Это значение хорошо согласуется со скоростями изменения периода, полученными для других сверхвспышек MN Dra (Като и др., 2009; Павленко и др., 2010). Во время нормальных вспышек и в спокойном состоянии у MN Dra обнаружена переменность, которая интерпретируется как отрицательные сверхгорбы с периодом  $0^d.096046$ . Амплитуда этих колебаний достигает  $1^m.5$  в спокойном состоянии, а во время нормальных вспышек близка к  $0^m.3$ . На данный момент принято считать, что причиной возникновения отрицательных сверхгорбов является наклонный аккреционный диск, линия узлов которого прецессирует в направлении, противоположном орбитальному движению системы. MN Dra является четвертой звездой типа SU UMa, у которой одновременно наблюдаются и положительные, и отрицательные сверхгорбы (Харви и др., 1995, Олех и др., 2007, Олех и др., 2009).

В *заключении* приводятся результаты, выносимые на защиту.

## Список литературы

Arras и др. (P. Arras, D.M. Townsley, L. Bildsten), *Astrophys. J.* **643**, 119 (2006)

Генсике и др. (B.T. Gänsicke, P. Rodriguez-Gil, T.R. Marsh, et al.), *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **365**, 969 (2006)

Като и др. (T. Kato, A. Imada, M. Uemura, et al.), *Publ. of the Astron. Soc. of Japan* **61**, 395 (2009)

Олех и др. (A. Olech, A. Rutkowski and A. Schwarzenberg-Czerny), *Acta Astron.* **57**, 331 (2007)

Олех и др. (A. Olech, A. Rutkowski and A. Schwarzenberg-Czerny),

Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **399**, 465 (2009)

Павленко и др. (E.P. Pavlenko, I.B. Voloshina, M.V. Andreev, et al.),  
Astron. Rep. **54**, 6 (2010)

Петерс и Торстенсен (C. Peters and J. Thorstensen), Publ. of the Astron.  
Soc. of the Pacific **117**, 1386 (2005)

Робертсон и др. (J.W. Robertson, S.B. Howell, R.K. Honeycutt et al.  
2008, Astron. J., **136**, 1857)

Скоди и др. (P. Szkody, A. Mukadam, B.T. Gänsicke, et al.), Astron. J.  
**710**, 64 (2010)

Харви и др. (D. Harvey, D.R. Skillman, J. Patterson and F.A. Ringwald),  
Publ. of the Astron. Soc. of the Pacific **107**, 551 (1995)

Шварц и др. (R. Schwarz, J. Greiner, G. H. Tovmassian, et al.), Astron.  
and Astrophys. **392**, 505 (2002)