

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Голышева Полина Юрьевна

**Фотометрические исследования
катаклизмических переменных звезд**

Специальность 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Отделе релятивистской астрофизики Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова

Научные руководители — *Шакура Николай Иванович, доктор физико-математических наук, профессор*
Шугаров Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты — *Петров Петр Петрович, доктор физико-математических наук, КРАО РАН, отдел физики звезд, главный научный сотрудник*

Самусь Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, ИНАСАН, отдел нестационарных звезд и звездной спектроскопии, ведущий научный сотрудник, ГАИШ МГУ, отдел изучения Галактики и переменных звезд, ведущий научный сотрудник

Барсукова Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, САО РАН, лаборатория физики звезд, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «25» февраля 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: polina-golysheva@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией в электронном виде также можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/338243132/>

Автореферат разослан «23» декабря 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Пружинская

Общая характеристика работы

Введение

Катаклизмические переменные (сокр. КП) являются полуразделенными тесными двойными системами (ТДС) на поздних стадиях эволюции, состоящими из красного карлика (звезды-донора, вторичного компонента), теряющего вещество через внутреннюю точку Лагранжа, и белого карлика (звезды-аккретора, первичного компонента), см. монографии Warner (1995), Черепашук (2013). В диссертации рассмотрены КП с относительно слабым магнитным полем, $B < 0.1$ МГс, когда вещество поступает на белый карлик посредством аккреционного диска.

КП делятся на следующие подтипы: классические новые, повторные новые, карликовые новые, новоподобные переменные. В диссертации проведены исследования объектов, относящихся к карликовым новым и новоподобным звездам.

Карликовые новые (звезды типа U Gem) относятся к вспыхивающим КП, амплитуда вспышек в среднем составляет $2^m - 6^m$, интервал между вспышками составляет от 10 дней до десятков лет, а их продолжительность – от нескольких суток до месяца (см., например, Warner (1995)). Однако среди карликовых новых примечательна группа объектов, претерпевающих более мощные вспышки с амплитудой $6^m - 8^m$, – звезды типа WZ Sge (см., например, методический материал, написанный Н.Н. Самусем¹). Выделяют следующие основные типы карликовых новых:

- SS Cyg (UGSS), показывающие т.н. “нормальные вспышки”, повторяющиеся более-менее регулярно и характеризующиеся быстрым подъемом и плавным спадом;
- SU UMa (UGSU), наряду с “нормальными вспышками” имеющие “сверхвспышки”, во время которых наблюдаются “сверхгорбы”;
- Z Cam (UGZ), у которых также наблюдаются “нормальные вспышки”, но иногда завершения этой стадии не происходит, и система остается на некотором промежуточном уровне между вспышкой и спокойным состоянием.

Новоподобные звезды – разнообразная и неоднородная группа звезд, включают в себя все катаклизмические переменные без вспышек. К новоподобным звездам относят и катаклизмические переменные, которые до сих пор наблюдались только в минимуме блеска, т.е. в спокойном состоянии, хотя по своим спектральным характеристикам относятся к карликовым новым. Также

¹<http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/>

к новоподобным относят звезды, которые находятся в перманентной вспышке. Эти звезды имеют горячий диск и подобны карликовым новым во время вспышки.

Актуальность исследований

Катаклизмические переменные звезды представляют большой исследовательский интерес не только у наблюдателей, но и у теоретиков, так как, будучи тесными двойными системами (ТДС), они проявляют разнообразные физические свойства, возникающие вследствие приливных явлений, например, такие, как эллипсоидальная форма у вторичного компонента, наблюдательным проявлением которой является двойная волна за период на кривых блеска. Примером приливных явлений является эксцентрическая форма аккреционного диска у звезд типа SU UMa или WZ Sge. Таким образом, КП представляют собой широкое поле для исследований процессов обмена вещества между компонентами, структуры течения вещества и физики аккреционных дисков. Наблюдая КП, можно получить гораздо больше информации о природе компонент системы, чем при исследовании одиночных звезд. КП являются уникальными природными лабораториями, на примере которых возможно детальное исследование аккреции и образующегося в результате этого процесса аккреционного диска у систем со слабым магнитным полем, которые изучаются в представленной диссертации. Представления об этих процессах могут оказаться полезными и при исследовании более экстремальных объектов, у которых аккретором является нейтронная звезда или черная дыра. Эволюция звезд, у которых имеется обмен вещества между компонентами, происходит иначе, чем у одиночных звезд, и КП – ТДС на поздних стадиях эволюции, представляют интерес для исследования эволюционных сценариев, являясь некими тестами для проверки теории звездной эволюции. Кроме того, двойственность КП делает возможным извлечь информацию о геометрии системы по фотометрическим наблюдениям, особенно при высоких углах наклона орбиты к лучу зрения, что позволяет определить размеры излучающих компонент в системе, например.

Так как на разных временных масштабах блеск КП меняется по-разному, и зачастую их фотометрическое поведение оказывается непредсказуемым, эта группа звезд всегда будет привлекать внимание как профессионалов, так и любителей. Поскольку точно предсказать вспышку невозможно, любительские наблюдения или патрульный мониторинг помогут вовремя начать астрономам-профессионалам всесторонние исследования этого события. В течение одной ночи, благодаря короткому орбитальному периоду у КП, мы можем проследить от одного до нескольких оборотов системы. Это обстоятельство дает возможность даже по такому ограниченному мониторингу

найти ряд физических характеристик в системе и построить математическую модель ТДС, как сделано, например, в нашей работе для звезды UU Aqr. Фотометрические наблюдения до сих пор остаются наиболее важным и в то же время доступным способом исследования переменности блеска звезд, так как их можно проводить на телескопах с небольшим диаметром зеркала. Чтобы получить наиболее полную информацию о звезде, о спектральном классе вторичного компонента, температурах, а также убедиться в двойственности системы, желательно привлечение спектральных наблюдений, но для их получения требуются, как правило, большие телескопы. Однако, многоцветные ПЗС-наблюдения делают возможным оценить вклад в излучение от разных компонент системы, а использование двухцветных диаграмм позволяет определить спектральный класс красного карлика и цветовую температуру системы. Приходящее к нам и непосредственно измеряемое излучение от звезды является, по существу, суммой излучений как от самих звезд, так и от аккреционного диска, от газового потока, истекающего из внутренней точки Лагранжа, от горячего пятна, вызванного соударением струи с аккреционным диском, от прогрева белым карликом и горячим диском полусферы красного карлика, обращенного к нему, и других излучающих компонент. Суммарный и изменяющийся из-за орбитального движения вклад в излучение от всех этих источников может быть разделен на конкретные составляющие с помощью методов математического моделирования. В некоторых случаях, особенно в случае затменных систем, мы предварительно даем качественное объяснение замеченных особенностей на кривых блеска, происходящих как вне, так и во время затмений, и разделяем эти источники без точного расчета их размеров, светимостей и локации в данной системе. Очевидно, что вспышки или ослабления мы также регистрируем на кривой блеска. Поэтому фотометрические наблюдения очень важны для понимания физики процессов, происходящих в ТДС.

Исследования КП и в частности, карликовых новых имеют высокую степень разработанности, см., например, серию работ группы Като (из последних статей – Kato et al. (2020)). Однако большой интерес к этой тематике вызван разнообразным поведением этой группы звезд. Хотя основная модель КП уже не вызывает сомнений и разногласий, все-таки остается затруднительным объяснить столь большое многообразие фотометрической переменности у этих звезд. Несмотря на разделение их на подтипы (в основном, основанное на проявлении вспышечной активности), не всегда удается уверенно классифицировать звезду, так как она может проявлять свойства, не совсем характерные для своего подтипа. Не бывает двух одинаковых катаклизмических звезд, каждая система по-своему уникальна. Поэтому фотометрические исследования этих звезд не теряют своей актуальности и по сегодняшний день.

Объекты и предмет исследований

Диссертация посвящена фотометрическим исследованиям катаклизмических переменных звезд, в работу вошли карликовые новые типа SS Cyg, SU UMa, а также системы подтипа SU UMa – WZ Sge, новоподобные звезды. Анализируются результаты наблюдений затменных КП в спокойном состоянии: карликовая новая типа SU UMa V1239 Her, новоподобные звезды UU Aqr и KN Cet. Изучены объекты, которые наблюдались как в спокойном, так и вспышечном состоянии: карликовые новые OV Boo (тип SU UMa) и V1460 Her. Во время сверхвспышек и по возвращению в спокойное состояние детально исследованы звезды типа SU UMa: OV Boo, PNV J19150199+071947 (=V1838 Aql), ASASSN-15po, два последних объекта относятся к подтипу WZ Sge. Также анализируется поведение следующих звезд типа SU UMa: PNV J172929 – во время сверхвспышки 2014 г., ASASSN-15bp, QY Per, V650 Peg, MASTER J212624, ASASSN-15ni – во время сверхвспышек 2015 г., CRTS J000130 – во время сверхвспышки 2016 г., ASASSN-17hw – во время сверхвспышки 2017 г. Карликовая новая типа SS Cyg HS 0218+3229 исследовалась нами в течение семи лет – во время вспышек и в спокойном состоянии. Как и объект V1460 Her, HS 0218+3229 является карликовой новой с редкими продолжительными вспышками с плавным подъемом блеска. Проведено исследование поведения новоподобной звезды V380 Oph (тип VY Scl).

Цель работы

Предметом исследований в диссертации являются катаклизмические переменные звезды, как во время вспышек, так и в спокойном состоянии. Особое внимание уделялось малоизученным и вновь открываемым системам и уточнению их классификации. Очевидно, что для детального анализа кривых блеска на разных временных масштабах требуется накопление больших рядов фотометрических наблюдений исследуемых звезд, так как зачастую вспышечная активность носит непредсказуемый характер и происходит нерегулярно. Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

- наблюдение и обработка ПЗС-наблюдений избранных звезд методом апертурной фотометрии и составление таблиц временных рядов;
- анализ кривых блеска во время вспышек и в спокойном состоянии блеска;
- определение или уточнение орбитальных параметров;
- изучение феномена сверхгорбов и их эволюции во время сверхвспышек у звезд типа SU UMa;

- исследование орбитальной переменности, анализ профиля затмения у систем с высоким углом наклона орбиты;
- отбор наиболее интересных кандидатов для исследования аккреционной структуры методами математического моделирования;
- изучение цветовых изменений, анализ положения звезды на двуцветных диаграммах;
- проведение классификации изучаемых звезд.

Научная новизна

На основе полученного фотометрического материала избранных звезд были получены некоторые принципиально новые результаты.

Нами была зафиксирована вспышка звезды HS 0218+3229, произошедшая в октябре 2007 г., анализ кривой блеска показал, что произошедшее явление можно объяснить вспышкой сравнительного редкого типа “изнутри-наружу”. На сегодняшний день известно пять вспышек этой звезды, причем две из них были исследованы нами. Благодаря открытию вспышечной активности и располагая информацией об их характере, нам удалось классифицировать переменную как карликовую новую типа UGSS.

Получены многоцветные ПЗС-наблюдения затменной системы OV Boo во время вспышки марта 2017 г. – вероятного кандидата в звезды типа WZ Sge. Отметим, что две прошлые вспышки звезды были найдены только по архивным фотографиям и детально не были прописаны. Нами было обнаружено, что во время вспышки орбитальные кривые блеска системы имеют совсем другой вид, чем в спокойном состоянии, и показывают слабые понижения блеска на фазах 0 и 0.5, в отличие от ярко выраженных затмений на нулевой фазе, наблюдаемых у звезды в спокойном состоянии. Во время вспышки четких сверхгорбов нами обнаружено не было, превалирует орбитальная переменность. Однако известно несколько звезд типа WZ Sge, у которых сверхгорбы появляются с большой задержкой и видны относительно непродолжительное время, например, объект V529 Dra, см. Katysheva et al. (2013), Kazarovets et al.-part II (2015). Впервые был прописан и интерпретирован трек звезды на двуцветных диаграммах во время вспышки и по возвращению в спокойное состояние.

Объект PNV J19150199+071947 (=V1838 Aql) также наблюдался во время вспышки, произошедшей в мае-июне 2013 г. По амплитуде вспышки, ее продолжительности и стадии “плато” мы заключаем, что у звезды наблюдалась сверхвспышка, а открытие нами ранних сверхгорбов – характерной черты звезд типа WZ Sge, позволило нам доказать принадлежность звезды к этому

типу. Мы впервые подробно проследили эволюцию сверхгорбов, построили треки на двухцветных диаграммах, определили значение изменения периода сверхгорбов $P_{dot} = dP/P$ и уверенно классифицировали объект как звезду типа WZ Sge. В итоге звезда получила окончательное обозначение V1838 Aql, Kazarovets et al.-part II (2015).

У новоподобной V380 Oph нами было зафиксировано второе, после 1979 г., большое падение блеска на 4^m в 2015 г., что подтверждает, что звезда относится к типу VY Scl. Мы первыми нашли величину фотометрического периода у звезды, хотя по спектральным наблюдениям он уже был ранее найден. Наш период оказался на несколько процентов короче спектрального, из чего мы сделали предположение, что фотометрический период является периодом отрицательных сверхгорбов у V380 Oph.

Мы активно участвовали в наблюдениях объекта V1460 Her (=1SWASP J162117+441254=CSS160603: 162117+441254) во время вспышки и после ее окончания. Звезда необычна тем, что первоначально считалась контактной системой типа W UMa, но благодаря открытию вспышки в июне 2016 г., была причислена к карликовым новым и получила окончательное обозначение V1460 Her. Эволюция орбитальных кривых блеска довольно интересна: нам удалось проследить, как меняется форма и глубина затмений с течением времени, произошедшим после максимума вспышки, и объяснить эти изменения. Мы нашли общие черты у этой звезды и у исследованной нами HS 0218+3229. Также мы нашли в литературе еще два похожих по фотометрическому и цветовому поведению объекта – это звезды V549 Cam (=VSX J052807.9+725606) и V361 Lyr, см. ссылки в работе Katysheva et al. (2017). На этом основании мы сделали предположение о новом подклассе звезд типа UGSS.

Мы внесли свой вклад в работу по всестороннему исследованию эволюции сверхгорбов у восьми звезд типа SU UMa (PNV J172929, ASASSN-15bp, QY Per, V650 Peg, MASTER J212624, ASASSN-15ni, CRTS J000130, ASASSN-17hw) во время сверхвспышек 2014–2017 гг., проводимых группой Като, см. серию работ Kato et al. (2015), Kato et al. (2016), Kato et al. (2017), Kato et al. (2020).

Для затменных систем V1239 Her, UU Aqr были построены математические модели, которые подробно описывают структуру течения вещества и воспроизводят наблюдаемые кривые блеска.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты работы основаны на анализе обширных фотометрических ПЗС-наблюдений и охватывают разнообразную группу катаклизмических переменных звезд. Кроме того, для некоторых систем были получены многоцветные наблюдения, исследованы изменения показателей цвета, по которым бы-

ла оценена цветовая температура и ее изменение. Данный материал может представлять интерес для астрономов, занимающихся физикой ТДС на поздних стадиях эволюции. Результаты работы могут быть использованы при решении ряда задач, например, при исследованиях вспышечной активности КП, орбитальной переменности, фликеринга, при решении статистических задач и для уточнения классификации. Отдельный интерес представляют затменные КП, также рассматриваемые в работе, которые дают возможность не только подробно исследовать аккреционные процессы, но и строить их математические модели.

Накопленный материал является результатом многолетних наблюдений, ценность которых будет лишь возрастать со временем. И если модельные представления о физических процессах, протекающих у КП, могут претерпевать некоторые изменения, то оригинальные фотометрические наблюдения, как были, так и останутся основным источником информации о таких системах.

Положения, выносимые на защиту

1. Карликовая новая типа SU UMa V1239 Her находится в “пробеле периодов” катаклизмических переменных, орбитальный период составляет $\sim 2^h 24^m$. Изменения амплитуды предзатменного горба на кривых блеска указывают на то, что в системе между вспышками происходят активные процессы, связанные с изменениями параметров аккреционного диска и других элементов структуры течения вещества.
2. Звезды OV Boo и PNV J19150199+071947=V1838 Aql относятся к карликовым новым типа SU UMa. Во время сверхвспышки у затменной системы OV Boo не обнаружено четких сверхгорбов, происходило постепенное увеличение глубины затмений. Наличие ранних сверхгорбов в начале сверхвспышки у V1838 Aql подтверждает принадлежность к подтипу WZ Sge; изменение периода сверхгорбов на стадии “плато” за один орбитальный период больше средней величины для подобных звезд и составляет $dP/P \sim 25 \cdot 10^{-5}$.
3. Наблюдения HS 0218+3229 во время вспышечной активности указывают на то, что звезда является карликовой новой типа UGSS. Кривая блеска вспышки свидетельствует о низком темпе перетекания вещества в системе и зарождении вспышки во внутренних частях аккреционного диска с последующим распространением во внешние области. Орбитальная переменность блеска системы в спокойном состоянии связана с эффектом эллипсоидальности вторичного компонента.

4. Звезды 1SWASP J162117+441254=V1460 Her и V380 Oph имеют нетипичные для катаклизмических переменных кривые блеска. Наблюдения V1460 Her во время вспышки указывают на принадлежность звезды к карликовым новым. На орбитальных кривых блеска у V1460 Her во время вспышки наблюдаются затмения, а в спокойном состоянии системы переменность вызвана эффектом эллипсоидальности. Обнаружение второго эпизода падения блеска у новоподобной звезды V380 Oph указывает на принадлежность звезды к объектам типа VY Scl.
5. Похожие свойства найденных характеристик у HS 0218+3229 и V1460 Her и еще у известных двух звезд, V549 Cam и V361 Lyr, могут свидетельствовать о существовании нового подкласса катаклизмических переменных с доминирующим излучением холодного компонента в спокойном состоянии.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в шестнадцати печатных изданиях, девять из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Голышева П.Ю., Антипин С.В., Жарова А.В., Катышева Н.А., Хохол Д., Шугаров С.Ю., *Многоцветная фотометрия карликовой новой HS 0218+3229*, **Астрофизика**, 2012, том 55, №2, с. 235-253.// Импакт-фактор: 0.643
2. Golysheva P., Shugarov S., *Multicolor photometric monitoring of a new WZ Sge-type star in Aquila*, **Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso**, 2014, том 43, с. 312-318.// Импакт-фактор: 0.636
3. Хрузина Т.С., Голышева П.Ю., Катышева Н.А., Шугаров С.Ю., Шакура Н.И., *Карликовая новая V1239 Геркулеса в спокойном состоянии блеска*, **Астрономический журнал**, 2015, том 92, №4, с. 323-349.// Импакт-фактор: 1.235
4. Namekata, K., Isogai, K., Kato, T. et al. (incl. Golysheva P.), *Superoutburst of WZ Sge-type dwarf nova below the period minimum: ASASSN-15po*, **Publications of the Astronomical Society of Japan**, 2017, том 69, №1, с. 2.// Импакт-фактор: 5.024
5. Kimura, M., Kato, T., Maehara, H. et al. (incl. Golysheva P.), *On the nature of long-period dwarf novae with rare and low-amplitude outbursts*, **Publications**

of the **Astronomical Society of Japan**, 2018, том 70, №4, с. 78.// Импакт-фактор: 5.024

6. Kato, T., Hamsch, F.-J., Dubovsky, P. A. et al. (incl. Golysheva P.), *Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. VII. The seventh year (2014-2015)*, **Publications of the Astronomical Society of Japan**, 2015, том 67, №6, с. 105.// Импакт-фактор: 5.024
7. Kato, T., Hamsch, F.-J., Monard, B. et al. (incl. Golysheva P.), *Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. VIII. The eighth year (2015-2016)*, **Publications of the Astronomical Society of Japan**, 2016, том 68, №4, с. 65.// Импакт-фактор: 5.024
8. Kato, T., Isogai, K., Hamsch, F.-J. et al. (incl. Golysheva P.), *Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. IX. The ninth year (2016-2017)*, **Publications of the Astronomical Society of Japan**, 2017, том 69, №5, с. 75.// Импакт-фактор: 5.024
9. Kato, T., Isogai, K., Wakamatsu, Y. et al. (incl. Golysheva P.), *Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. X. The tenth year (2017)*, **Publications of the Astronomical Society of Japan**, 2020, том 72, №1, с. 14.// Импакт-фактор: 5.024

а также семь публикаций – в сборниках трудов конференций:

1. Golysheva P., Katysheva N., Shugarov S., Borisov N., Gabdeev M., *Multicolour Photometry of Unusual Dwarf Nova HS 0218+3229*, **Central European Astrophysical Bulletin**, 2013, том 37, с. 345-354
2. Golysheva P., Shugarov S., Katysheva N., Khruzina T., *Observation and Light Curve Analysis of Three Eclipsing Dwarf Novae, Living Together: Planets, Host Stars, and Binaries*, 2015, том 496, с. 231-235
3. Katysheva N., Golysheva P., Shugarov S., Gabdeev M., Borisov N., *Photometric and spectroscopic investigation of the dwarf nova HS 0218+3229: A Short Review*, **Acta Polytechnica**, 2015, том 2, с. 123-127
4. Khruzina T., Katysheva N., Golysheva P., Shugarov S., *Optical Variability Analysis of UU Aqr – an Eclipsing Nova-like System*, **EAS Publications Series**, 2015, том 71, с. 149-150
5. Shugarov S., Golysheva P., Sokolovsky K., Chochol D., *Photometric variability of the nova-like object V380 Oph in 1976-2016*, **Proceedings of Astro plate**, 2016, с. 59-62

6. Golysheva P., Shugarov S., Goranskij V., Vozyakova O., *Multicolor light curve analysis of eclipsing cataclysmic star OV Boo*, **Central European Astrophysical Bulletin**, 2017, том 41, с. 79-90
7. Katysheva N., Shugarov S., Golysheva P., *Outburst of the Unusual Binary CSS160603: 162117+441254*, **ASP Conference Series**, 2017, том 510, с. 413-416.

Апробация результатов и достоверность

Представленные результаты являются достоверными и докладывались автором на следующих международных конференциях:

1. 45 years of Hvar Observatory and 20 years of ACT: The role of 1-m class telescopes now and in the future, Хвар, Хорватия, 17-20 октября 2017, *Multicolor light curve analysis of eclipsing cataclysmic star OV Boo* (устный)
2. Astroplate. International workshop on scientific use, digitization and preserving astronomical photographic records, Прага, Чехия, 15-18 марта 2016, *Photometric variability of the nova-like object V380Oph in 1976-2016* (стендовый)
3. The physics of evolved stars, 2015, Ницца, Франция, 8-12 июня 2015, *UU Aqr – an eclipsing nova-like cataclysmic variable with unstable light curve. Analysis of the optical variability* (стендовый)
4. Living Together: Planets, Host Stars and Binaries, Литомышль, Чехия, 8-12 сентября 2014, *Observation and light curve analysis of three eclipsing dwarf novae* (устный)
5. Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes, Татранска Ломница, Словакия, 23-26 сентября 2013, *An evolution of superhumps of a new WZ Sge-type system in Aquila* (устный)
6. The most Mysterious Binaries: Significance for Astrophysics, Хвар, Хорватия, 2-6 июля 2012, *Multicolor photometry of unusual dwarf nova star HS 0218+3229* (устный)

Методология и методы исследования

Фотометрические наблюдения исследуемых в диссертации катаклизмических переменных проводились на телескопах в Словакии (Стара Лесна, Астрономический Институт Словацкой Академии наук) и в Крыму (Крымская

астрономическая станция ГАИШ МГУ), небольшая часть наблюдений была получена на 2.5 м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ наблюдателем Возяковой О.В. и на телескопе Цейсс-1000 Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии наук наблюдателем В.П. Горанским. Объединение рядов наблюдений представляет определенную трудность, вызванную неизбежными систематическими ошибками при наблюдениях на разных телескопах с различными ПЗС-камерами. Для уменьшения этой ошибки:

- Выбирались стандартные звезды по возможности ближе к цвету переменной.
- Калибровался данный набор светофильтров, камеры и телескопа путем вычисления инструментальных величин и показателей цвета нескольких десятков звезд в звездном скоплении М67. Далее найденные величины сравнивались с точно известными этими же значениями, взятыми из библиографических источников и вычислялось уравнение цвета. С учетом этого уравнения инструментальные величины изучаемых КП приводились к стандартной системе.
- Сравнивались одновременные или близкие по времени наблюдения объекта, полученные на разных телескопах.
- Использовалась модифицированная программа “Эффект” Горанского, позволяющая сводить наблюдения, полученные на разных телескопах, к единой шкале звездных величин.

Личный вклад автора

Все данные были обработаны автором. Обработка ПЗС-кадров, общим количеством около пятнадцати тысяч, проводилась методом апертурной фотометрии в программе “MaxIm DL” с использованием стандартной процедуры учета темнового тока, байеса и плоского поля матрицы. Автор частично принимал участие в наблюдениях в Словакии (Стара Лесна, Астрономический Институт Словацкой Академии наук) и в Крыму (Крымская астрономическая станция ГАИШ МГУ). Поиск периодичностей у исследуемых звезд проводился автором программой “Эффект” В.П. Горанского, с использованием методов Фурье-анализа и Лафлера-Кинмана. Материалы глав 1, 3 и разделы 2.1, 2.2 главы 2 подготовлены при активном и непосредственном участии автора в анализе и интерпретации полученных наблюдений, в оформлении материала в виде рисунков, таблиц. В результатах, представленных в разделах 2.3, 2.4 главы 2, основной вклад автора заключался в обработке фотометрического материала. Результаты исследований были представлены автором

на международных конференциях, а также на семинарах в ГАИШ МГУ и в Институте астрономии РАН.

Для звезды V1239 Her (Хрузина и др. (2015)) автором проведена подготовка наблюдательного материала для построения модели системы и дальнейшей инерперетации. Для этого были проанализированы и сгруппированы фазовые кривые блеска, выявлены пекулярности на кривых блеска в некоторые ночи (отсутствие предзатменного горба, смещение вторичного минимума). Автор принимал активное, непосредственное участие в поиске периода, построении диаграммы “О-С” у этой системы. Для затменных звезд UU Aqr, KN Cet, EX Dra, V2051 Oph автором проанализировано фотометрическое поведение в течение орбитального движения этих систем.

Автор внес решающий вклад в исследованиях карликовых новых OV Boo и PNV J19150199+071947 (=V1838 Aql) во время сверхвспышек. Анализ переменности блеска, поиск периодичностей, определение некоторых параметров у этих объектов и их классификация проведены автором наравне с одним из руководителей диссертации, а также соавтором этих работ С.Ю. Шугаровым (Golysheva et al. (2017), Golysheva & Shugarov (2014)). Для звезды ASASSN-15pro автором произведена обработка шести наблюдательных ночей, в течение которых блеск объекта находился вблизи максимума сверхвспышки, на стадии плато и по возвращению в спокойное состояние; независимо от соавторов статьи Namekata et al. (2015) найден период ранних сверхгорбов, а также выявлена переменность звезды на спаде повторной вспышки с периодом, близком к орбитальному. Автор принял участие в обширных исследованиях, включающих несколько сотен объектов, по изменению периода сверхгорбов карликовых новых типа SU UMa, проводимых группой Като, и внес свой вклад, проведя обработку наблюдений следующих звезд: PNV J172929 – во время сверхвспышки 2014 г. (Kato et al. (2015)), ASASSN-15bp (Kato et al. (2015)), QY Per (Kato et al. (2016)), V650 Peg (Kato et al. (2016)), MASTER J212624 (Kato et al. (2016)), ASASSN-15ni – во время сверхвспышек 2015 г. (Kato et al. (2016)), CRTS J000130 – во время сверхвспышки 2016 г. (Kato et al. (2017)), ASASSN-17hw – во время сверхвспышки 2017 г. (Kato et al. (2020)).

В исследованиях звезды HS 0218+3229 (Голышева и др. (2012)) автор внес значительный вклад в анализе фотометрического поведения объекта во время вспышек и в спокойном состоянии, в определении орбитального периода по многолетнему наблюдательному ряду, автором исследована орбитальная переменность и цветовые изменения звезды, определены параметры системы. Автор участвовал в наблюдениях в октябре 2010 г. в Словакии. Автор внес основной вклад в интерпретацию полученных результатов, провел классификацию звезды. Автор принял участие в совместных международных исследованиях двойной системы 1SWASP J162117+441254 во время вспышки

(Kimura et al. (2018)), проведена обработка наблюдений 9 ночей. Далее, автор наравне с соавторами работы Katysheva et al. (2017) продолжил изучение этого объекта уже в спокойном состоянии блеска (спустя месяц и более после вспышки). Для этого были построены и проанализированы орбитальные кривые блеска во время вспышки и в спокойном состоянии, выявлены изменения формы главного и вторичного минимумов с течением времени, произошедшим после вспышки. На основании полученных исследований звезд HS 0218+3229 и 1SWASP J162117+441254, а также обобщив имеющуюся информацию по двум другим объектам со сходным фотометрическим поведением: V549 Cam (=VSX J052807.9+725606) и V361 Lyr, автор сделал предположение о существовании нового подкласса карликовых новых с редкими, продолжительными вспышками более симметричной формы. Автор принял участие в продолжении многолетних наблюдений антикарликовой новой V380 Oph (полученных за период 2006–2016 гг.), и наравне с соавтором Шугаровым (работа Shugarov et al. (2016)) обнаружил падение блеска в 2016 г., отметим, что это лишь второй эпизод подобного события на протяжении сорокалетнего периода (с 1976 г.) наблюдений звезды. Значимый вклад был внесен автором при поиске периодичностей у этой звезды: был уточнен прецессионный период, а значение периода сверхгорбов совпало с найденным ранее по ряду наблюдений 2002–2004 гг.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 136 страниц, диссертация содержит 56 рисунков, 13 таблиц, в работе приведены 168 ссылок на цитируемые литературные источники. Во *Введении* рассматривается обзор основных характеристик катаклизмических переменных звезд со слабым магнитным полем. Описаны поставленные задачи, показана актуальность исследований, обсуждается их значимость и новизна, рассматривается методика обработки наблюдений. Представлены основные положения, выносимые на защиту. Приведен список публикаций по теме диссертации. Рассмотрен личный вклад автора в проведенных исследованиях.

В *Главе 1* анализируется поведение затменных катаклизмических переменных в спокойном состоянии блеска, и обсуждается вопрос, почему такие системы представляют особый интерес для построения моделей.

В *разделе 1.1* проведено исследование звезды V1239 Her – карликовой новой типа SU UMa, находящейся в “пробеле периодов” КП. Уточнен орбитальный период, подтверждено, что он не менялся на протяжении 10 лет. Приводятся и анализируются кривые блеска, построенные за разные наблюдательные ночи, выявлены их различия. Показано, что в системе происходят ак-

тивные процессы даже в состоянии покоя. Приводятся основные результаты трехмерного математического моделирования в рамках “комбинированной” модели, приводится динамика изменений параметров аккреционного диска, а также приводится сравнение наблюдаемых и синтетических кривых блеска.

В *разделе 1.2* рассматривается и анализируется переменность новоподобной звезды UU Aqr в течение двух оборотов системы. Приводятся и сопоставляются орбитальные кривые блеска. Для объяснения кривых блеска применяются две модели: модель с “горячей линией” и со “спиральными рукавами” на аккреционном диске.

В *разделе 1.3* приводятся результаты исследований орбитальной переменности затменных карликовых новых KN Cet, EX Dra и V2051 Oph, дается анализ фазовых кривых блеска, сопоставляются и интерпретируются различия фотометрического поведения звезд EX Dra и V2051 Oph.

Глава 2 посвящена изучению вспышечной активности карликовых новых типа SU UMa. Большое внимание уделяется исследованию сверхгорбов и их эволюции во время сверхвспышек.

В *разделе 2.1* приводится анализ многоцветных ПЗС-наблюдений затменной звезды OV Boo. Показано, что во время вспышки у объекта не наблюдаются затмения на нулевой фазе орбитального цикла, а по мере спада блеска звезды происходит увеличение глубины затмений. Исследованы цветовые изменения звезды во время вспышки и в течение орбитального цикла.

В *разделе 2.2* рассматривается сверхвспышка у объекта PNV J19150199+071947, являющейся звездой типа WZ Sge. Анализируются кривые блеска на разных стадиях сверхвспышки. Обнаружены ранние сверхгорбы, показывающие двойную волну за период. Определено отношение масс компонент в системе. На стадии плато период и амплитуда сверхгорбов возрастают – наблюдаются обычные сверхгорбы. Скорость изменения периода за период оказалась выше, чем у большинства звезд типа SU UMa. В конце сверхвспышки у звезды наблюдаются поздние сверхгорбы. Стадии сверхгорбов можно видеть на диаграмме О-С, а также на сводной кривой блеска сверхвспышки. Приводятся изменения показателей цвета в течение сверхвспышки.

В *разделе 2.3* представлены совместные наблюдения во время сверхвспышки и повторных повышений блеска у объекта ASASSN-15ro – также звезды типа WZ Sge. Определен период ранних сверхгорбов, отношение масс в системе. Обычные сверхгорбы исследовались во время стадий “А” и “В”, определен темп изменения периода на “В” стадии. Стадии “С” и стадии поздних сверхгорбов не наблюдалось в связи с окончанием сверхвспышки и появлением хаотических вариаций блеска во время повторного повышения яркости. Обсуждается проблема малого значения орбитального периода системы (72.6 мин), находящегося вблизи “минимума периодов” КП, который, согласно теоретическим расчетам авторов Knigge (2006), составляет 76.2 ± 1.0 мин.

В *разделе 2.4* приведены исследования сверхгорбов восьми объектов типа SU UMa во время сверхвспышек, в работе над которыми автор принимал непосредственное участие. Результаты были включены в серию из десяти статей и продолжающуюся в настоящее время, проводимую под руководством Т. Като (статьи Kato et al. (2015), Kato et al. (2016), Kato et al. (2017), Kato et al. (2020)) и содержащую порядка нескольких сотен подобных объектов. Для каждой звезды приводится значение периода сверхгорбов на стадии “В” и скорости изменения периода на этой стадии, P_{dot} (кроме звезды CRTS J000130, для которой наблюдательных данных оказалось недостаточно). У некоторых звезд также наблюдались ранние сверхгорбы, а также сверхгорбы стадий “А” и “С”. Для всех изучаемых нами звезд значение P_{dot} оказалось положительным.

В *Главе 3* представлены результаты исследований катаклизмических переменных с необычным фотометрическим поведением.

В *разделе 3.1* проведен анализ многоцветных ПЗС-наблюдений в $U, B, V, (RI)_{C,J}$ полосах карликовой новой HS 0218+3229 за период наблюдений с 2006 по 2013 гг. За этот период у звезды были зафиксированы две вспышки, которые подробно анализируются в разделе. Уточнен орбитальный период системы. В спокойном состоянии у звезды наблюдается двойная волна за период, что связано с эффектом эллипсоидальности вторичного компонента. Установлено, что во время вспышек орбитальная переменность не наблюдается на фоне поярчавшего аккреционного диска. Проанализировано положение звезды на двухцветных диаграммах во время вспышек и в спокойном состоянии. Приводятся и объясняются фазовые кривые блеска и показателей цвета. Приведены оценки некоторых физических параметров системы. Поскольку по разным сообщениям, включая наши, у звезды известно пять вспышек, переменная была классифицирована как карликовая новая типа UGSS с типом вспышки “изнутри-наружу”.

В *разделе 3.2* излагаются результаты совместных исследований объекта 1SWASP J162117+441254, первоначально классифицируемого как контактная система типа W UMa. После открытия вспышки, наблюдаемой рядом исследователей, в том числе и нами, звезда стала считаться катаклизмической переменной. Во время вспышки наблюдаются затмения глубиной $\sim 1^m$ во время главного минимума орбитальной кривой блеска. Установлено, что по мере ослабления общего блеска системы после максимума вспышки, глубина главного затмения уменьшается, и параллельно происходит возрастание глубины вторичного затмения, которое в спокойном состоянии превышает глубину главного затмения на несколько десятых звездных величин. Приводятся и обсуждаются результаты моделирования этой звезды.

В *разделе 3.3* приводится сводная кривая блеска за сорокалетний период наблюдений V380 Oph – звезды типа VY Scl, т.н. “антикарликовой новой”.

Зафиксированы два падения блеска этой звезды, в 1979 г. и в 2015 г. Приводится анализ периодичностей и объяснение их природы – у звезды найден период прецессии диска и период, близкий к орбитальному (согласно спектральным исследованиям из литературных данных), интерпретируемый как период отрицательных сверхгорбов.

В *Заключении* подводится итог выполненной работы, сопоставляются наблюдательные проявления у разных объектов, выявляются сходства и различия между ними.

Основные выводы

Подводя итог фотометрическим исследованиям избранных звезд, можно отметить следующие результаты:

- Для V1239 Her исследована фотометрическая переменность в спокойном состоянии, проведен анализ профилей затмения и таких структур, как предзатменный горб и ступеньки на орбитальных кривых блеска. Уточнен орбитальный период, $0.100082222(2)^d$, по нашим наблюдениям и по данным из литературы. Обнаружены изменения амплитуды предзатменного горба и его отсутствие в некоторые ночи. Эти результаты позволили построить “комбинированную” модель системы и проследить динамику изменений параметров системы в разных состояниях. У другой изученной системы - новоподобной звезды UU Aqr, вид кривых блеска меняется даже в течение одного орбитального периода. Еще одной интересной особенностью звезды оказалось наличие плавных понижений блеска на внезатменной кривой, т.н. “дипы”, которые объясняются структурными образованиями на диске.
- Во время сверхвысышек впервые были исследованы три звезды типа SU UMa: OV Boo, PNV J19150199+071947 и ASASSN-15pro. У OV Boo четко выраженных сверхгорбов во время вспышки зафиксировано не было, показано, что орбитальный период не менялся на протяжении 10 лет, несмотря на произошедшую вспышку. Для OV Boo впервые показано, как меняется форма затмений: от их отсутствия во время вспышки до красивого алголеподобного затмения вблизи стадии покоя. Дается интерпретация найденной особенности. Также впервые показано, что форма затмения различна в разных фотометрических полосах.

Приводятся кривые блеска звезд PNV J19150199+071947 и ASASSN-15pro во время сверхвысышек, обнаружены положительные сверхгорбы и прослежена эволюция их изменений, по величине избытка периода сверхгорбов вычислены отношения масс в системах, которые оказались равными

~ 0.08 и ~ 0.07 соответственно. По О-С диаграмме определено изменение периода сверхгорбов за один орбитальный период $P_{dot} = dP/P$, которое оказалось равным $25 \cdot 10^{-5}$ и $1.29 \cdot 10^{-5}$ для PNV J19150199+071947 и ASASSN-15pro соответственно. Также обнаружены ранние сверхгорбы, подтверждающие принадлежность этих объектов к подтипу WZ Sge. Для PNV J19150199+071947 и OV Boo построены треки на двухцветных диаграммах $(U-B)-(B-V)$, $(B-V)-(V-R)$, $(V-R)-(R-I)$, $V-(V-R)$, показывающие изменение цветовой температуры со временем, произошедшим после вспышки.

- Для звезды HS 0218+3229 проведены детальные фотометрические наблюдения во время вспышек 2007 и 2013 гг. и в спокойном состоянии блеска в течение семи лет. Уточнен орбитальный период $0.2973559(10)^d$. Установлено, что орбитальная переменность блеска с амплитудой до 0.2^m связана с эффектом эллипсоидальности красной звезды в спокойном состоянии системы, в то время как во время вспышки эти вариации блеска не проявляются на фоне вспыхнувшего аккреционного диска. Показано, что вспышки звезды относятся к типу “inside-out”. Найдено, что вторичный компонент является звездой спектрального класса K5 V. Получены оценки полной светимости диска во время вспышки: $L_{bol} \sim 4 \cdot 10^{34}$ эрг/с и расстояния до системы ~ 660 пк. Согласно общепринятой классификации ОКПЗ, звезда является карликовой новой типа UGSS с редкими (известно пять вспышек), раз в 5-6 лет, вспышками, имеющими более симметричную форму, чем у большинства звезд этого типа.
- По фотометрическим наблюдениям уточнена классификация двух переменных звезд с нетипичными кривыми блеска – 1SWASP J162117+441254 и V380 Oph. Исследования первого из этих объектов, являющегося затменной системой, проведены как во время вспышки, так и в спокойном состоянии, прослежена эволюция орбитальной переменности этой звезды, подтверждена принадлежность к карликовым новым. Сравнение найденных автором фотометрических характеристик 1SWASP J162117+441254 и HS 0218+3229 позволило сделать вывод об их сходстве. В обеих системах в состоянии покоя орбитальная переменность показывает двойную волну, показатель цвета $V-R$ относительно велик: ~ 0.6 mag для 1SWASP J162117+441254 и $\sim 1.1^m$ для HS 0218+3229, красный карлик вносит наибольший вклад в светимость системы, в отличие от классических звезд типа UGSS. Поскольку было обнаружено еще два подобных объекта, сделано предположение о существовании нового подкласса карликовых новых. Характерными чертами этих объектов является доминирующее излучение от красного карлика на стадии покоя; эффект эллипсоидальности на стадии покоя и его исчезновение во время вспышки; относительно

большие орбитальные периоды продолжительностью в несколько часов; редкие вспышки с медленным нарастанием блеска и плавным спадом. Для новоподобной звезды V380 Oph, которая обычно пребывает в ярком состоянии на уровне $\sim 14.5^m$, найдено второе падение блеска на 4^m , произошедшее в 2015 г., что доказывает принадлежность звезды к объектам типа VY Scl. Уточнен прецессионный период в 4.29^d , и период близкий к орбитальному в 0.148^d , который является, вероятнее всего, периодом отрицательных сверхгорбов у этой системы.

Список литературы

- Голышева, П. Ю., Антипин, С. В., Жарова, А. В., Катыева, Н. А., Хохол, Д., Шугаров, С. Ю.: 2012, *Астрофизика*, **55**, 235.
- Хрузина, Т. С., Голышева, П. Ю., Катыева, Н. А., Шугаров, С. Ю., Шакура, Н. И.: 2015, *АЖ*, **92**, 323.
- Черепашук, А. М.: 2013, Тесные двойные звезды (изд. “Москва Физматлит”).
- Golysheva, P., Shugarov, S.: 2014, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, **43**, 312.
- Golysheva, P., Shugarov, S., Goranskij, V., Vozyakova, O.: 2017, *Central European Astrophysical Bulletin*, **41**, 79.
- Kato, T., Hambsch, F.-J., Dubovsky, P. A., et al.: 2015, *PASJ*, **67**, 105.
- Kato, T., Hambsch, F.-J., Monard, B., et al.: 2016, *PASJ*, **68**, 65.
- Kato, T., Isogai, K., Hambsch, F.-J., et al.: 2017, *PASJ*, **69**, 75.
- Kato, T., Isogai, K., Wakamatsu, Y., Hambsch, F.-J., et al.: 2020, *PASJ*, **72**, 14.
- Katysheva, N., Shugarov, S., Chochol, D., et al.: 2013, *Central European Astrophysical Bulletin*, **37**, 335.
- Katysheva, N., Shugarov, S., Golysheva, P.: 2017, *ASP Conference Series*, **510**, 413.
- Kazarovets, E. V., Samus, N. N., Durlevich, O. V., Kireeva, N. N., Pastukhova, E. N.: 2015, *Information Bulletin on Variable Stars*, **6155**, 1.
- Kimura, M., Kato, T., Maehara, H., et al.: 2018, *PASJ*, **70**, 1.
- Knigge, C.: 2006, *MNRAS*, **373**, 484.
- Namekata, K., Isogai, K., Kato, T. and 38 coauthors: 2015, *PASJ*, **69**, 2.
- Shugarov, S., Golysheva, P., Sokolovsky, K., Chochol, D.: 2016, **arXiv: 1605.01162**.
- Smak, J.: 1984, *Acta Astron.*, **34**, 161.
- Warner, B.: 1995, *Cataclysmic Variable Stars* (Cambridge, Cambridge Univ. Press).