

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Республики Крым
«Крымская астрофизическая обсерватория РАН»

На правах рукописи

УДК 524.337.7

Сосновский Алексей Александрович

**АККРЕЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИЗБРАННЫХ
КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ С РАЗЛИЧНЫМ
ЭВОЛЮЦИОННЫМ СТАТУСОМ**

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник ФГБУН «КрАО РАН»

Павленко Е.П.

Научный – 2022

Содержание

Введение	4
Глава 1. Обзор современного состояния проблемы. Методика ведения наблюдений и анализ данных.....	21
1.1 Современное состояние проблемы	21
1.1.1 Карликовые новые типа SU UMa	24
1.1.1.1 Приливная нестабильность, апсидальная прецессия и положительные сверхгорбы. 24	
1.1.1.2 Нодальная прецессия и отрицательные сверхгорбы	27
1.1.3 «Пробел» в распределении орбитальных периодов	28
1.1.4 Нерадиальные пульсации аккрецирующих белых карликов	30
1.2 Методика наблюдений и обработка данных.	34
1.2.1. Телескопы и наблюдения.	34
1.2.3. Методика анализа данных наблюдений.....	40
Глава 2. Эволюция нерадиальных пульсаций белого карлика у EZ Lyn.....	43
2.1.1 История объекта.	43
2.1.2 Наблюдения	44
2.2 Долговременная кривая блеска EZ Lyn (2006-2021 гг.)	47
2.3 Пульсации в мини-вспышках 2007 г. и их окрестностях	49
2.4 Второе прохождение полосы нестабильности (2011-2021 гг.).....	52
2.5. Сезон наблюдений 2012 -2014 гг.....	55
2.6. Сезон наблюдений 2015-2022 гг.....	62
2.7 Обсуждение	64
2.8 Выводы к главе 2.....	67
Глава 3. Затменная карликовая новая типа SU UMa 1RXS J003828.7+250920 в «пробеле периодов».....	69
3.1 Введение.....	69
3.2. Наблюдения 2010-2012 гг.	69
3.3 Период сверхгорбов во время сверхвспышки 2010 г.	72
3.4 Обнаружение орбитального периода в спокойном состоянии 2011 г.....	73
3.5 Обнаружение отрицательных сверхгорбов.....	80
3.6 Избыток периода во время сверхвспышки и дефицит периода в спокойном состоянии	84
3.7 Оценка отношения масс.....	84
3.8. Колориметрия.....	85

3.9 Выводы к Главе 3.....	89
Глава 4. Периодические явления у карликовых новых NY Her и J161700.81+620024.9.....	90
4.1 Введение.....	90
4.2 NY Her: обнаружение отрицательных сверхгорбов.....	91
4.2.1 Основная информация об объекте.	91
4.2.2 Наблюдения.	91
4.2.3 Анализ данных	92
4.3 1RXS J161659	95
4.3.1 Основная информация.....	95
4.3.2 Наблюдения	95
4.3.3 Нормальные вспышки и горбы на кривых блеска в спокойном состоянии – 2017 год. 97	
4.3.4 Период сверхгорбов и сверхвспышка 2018 г.....	101
4.3.5. Колориметрия сверхгорбов	104
4.3.6 Выводы к главе 4	107
Заключение	109
Благодарности	111
Список литературы.....	112

Введение

Катаклизмические переменные (КП) с водородными белыми карликами - это компактные двойные системы звезд с орбитальными периодами от ~шести часов до 76 мин. В этих системах компонент позднего класса заполняет свою полость Роша и теряет вещество на белый карлик. Эволюция КП сопровождается уменьшением орбитального периода и определяется потерей углового момента, основной механизм потери – магнитное торможение (для орбитальных периодов больше ~ трёх часов) и гравитационное излучение (для периодов меньше двух часов). КП являют собой уникальную лабораторию для изучения особенностей поздней эволюции через изучение процессов аккреции и ее воздействие на компоненты системы. Знание орбитального периода является чрезвычайно важным, поскольку оно приводит к определению важнейшего фундаментального параметра эволюции – отношению масс компонентов, которое традиционно находится методами спектроскопии. Однако наблюдения слабых объектов сложно проводить на телескопах малого и среднего размеров. В данной ситуации эффективным инструментом определения отношения масс можно считать фотометрический метод, используя эмпирическое соотношение между орбитальным периодом и периодом «сверхгорбов», получаемым во время сверхвспышек [1]. Поиск и исследование звезд в малоизученном «пробеле периодов», где происходит смена механизма потери углового момента, также является актуальной задачей, поскольку до сих пор нет однозначного объяснения, почему в интервале периодов, где, согласно теории стандартной эволюции звёзд, прекращается аккреция и не должно быть вспышек аккреционных дисков, обнаружено уже несколько десятков КП со вспышками.

В ходе эволюции КП темп потери вещества компонентом-донором уменьшается с 10^{-8} до 10^{-12} солнечных масс в год и аккреционные диски у самых короткопериодических систем долго накапливают вещество для запуска очередной вспышки. В спокойном состоянии, в этих КП доминирующим

оказывается излучение белого карлика, который может обладать нерадиальными пульсациями. Нечастые вспышки дают возможность проследить прохождение этих объектов через полосу неустойчивости по мере того, как белый карлик нагревается вспышкой и впоследствии остывает в течение нескольких лет, а не тысячелетий по сравнению с изолированными белыми карликами. Определение эволюции нерадиальных пульсаций является уникальным зондированием влияния аккреционного нагрева и последующего охлаждения на внутренние слои белого карлика. Аккреционные диски – нестационарные объекты. Они подвержены тепловой и приливной неустойчивостям [2]; показывают два типа вспышек, если их отношение масс меньше 0.3; во время сверхвспышек они демонстрируют апсидальную прецессию, а для любого отношения масс могут показывать нодальную прецессию и известное число таких объектов гораздо меньше.

В диссертации приводятся результаты исследования четырёх катаклизмических переменных с различным эволюционным статусом: долгопериодической КП в пробеле периодов 1RX J0038, короткопериодической КП EZ Lyn и КП с промежуточными периодами NY Her и 1RXS J1616.

Актуальность работы

Аккреционные процессы на разных этапах поздней эволюции катаклизмических переменных (КП) позволяют выявить особенности различных компонентов КП и, следовательно, продвинуться в понимании эволюции звёзд, поэтому исследование этих объектов является весьма актуальной задачей [8]. Очевидна важность исследования прецессионных явлений (и, следовательно, периода «положительных сверхгорбов») в аккреционных дисках карликовых новых с отношением масс менее 0.3 масс Солнца (КП типа SU UMa) во время сверхвспышек. Знание орбитальных периодов и периодов положительных сверхгорбов короткопериодических и долгопериодических КП типа SU UMa даст возможность оценить отношение масс для КП с различным эволюционным статусом и определить степень соответствия отношения масс стандартной теории

эволюции КП. Изучение «отрицательных сверхгорбов», связанных с нодальной прецессией наклонного диска, актуально для выявления причин, приводящих к его наклону и для понимания связи между появлением/исчезновением отрицательных сверхгорбов и изменением интервала между вспышками.

Изучение аккрецирующих белых карликов в двойных системах, ввиду небольшого количества известных на сегодняшний день систем (18 объектов) [41] имеет огромное значение. Во-первых, такие исследования сложны и требовательны к точности, плотности и длине временных рядов (ввиду низкой светимости объектов 18-19 зв.в), но при этом дают беспрецедентную возможность изучить, как внутренняя структура белого карлика реагирует на аккрецию вещества, используя периоды пульсаций, во вторых – мониторинг эволюции пульсационных периодов приведёт к определению полосы неустойчивости этого типа объектов, длительность которой и скорость остывания значительно отличается от одиночных БК.

Цель работы

Целью диссертационной работы является подробное изучение аккреционных явлений и их следствий у малоисследованных катаклизмических переменных типа SU UMa с различным эволюционным статусом на основании высокоточных длительных фотометрических наблюдений, и определение ряда их параметров - орбитального периода и периодов положительных и отрицательных сверхгорбов, отношения масс компонентов, нерадиальных пульсаций и их эволюции у аккрецирующих белых карликов, выявление отличий аккрецирующих пульсаторов от изолированных, оценка времени прохождения полосы неустойчивости в таких системах.

Для достижения указанной цели были поставлены и последовательно решены следующие задачи:

1. Проведены длительные (2010-2021 г.) высокоточные фотометрические наблюдения четырёх катаклизмических переменных типа SU UMa -

долгопериодической 1RXS J003828.7+250920 (далее – 1RXS J0038) в «пробеле» периодов, короткопериодической EZ Lyn и КП со «средним» периодом NY Her и 1RXS J161600.81+620024.9 (далее – 1RXS J1616) в течение 82 ночей (650 часов, 40000 оценок блеска).

2. Проведен анализ эволюции пульсаций белого карлика EZ Lyn на интервале более 10 лет после вспышки 2010 г.

3. Выполнен поиск, анализ и интерпретация периодических процессов у катаклизмических переменных 1RXS J0038, 1RXS J1616 и NY Her.

4. Получены такие физические параметры как отношение масс у 1RXS J0038 и 1RXSJ J1616; эффективные температуры белого карлика у EZ Lyn в течение прохождения полосы неустойчивости.

Научная новизна

Соискателем проведены долговременные уникальные наблюдения (около 10 лет, ~ 40000 оценок блеска, суммарное время наблюдений около 650 часов) с высоким временным разрешением, полученные на 2.6 м ЗТШ, четырёх карликовых новых, представляющих различные этапы поздней эволюции тесных двойных систем. Полученные данные собраны в базе данных и находятся в открытом доступе [32].

Определены ранее неизвестные параметры этих систем - орбитальные периоды и оценки отношения масс у карликовых новых 1RXS J0038 и 1RXS J1616, отрицательные сверхгорбы у NY Her и 1RXS J0038. Впервые был использован новый подход к поиску отрицательных сверхгорбов у карликовых новых типа SU UMa по выборкам систем с нехарактерно редкими нормальными вспышками для данного интервала между сверхвспышками. Впервые изучена эволюция пульсаций белого карлика EZ Lyn на временном интервале ~10 лет и показано, что это самое долгое пребывание аккрецирующего белого карлика в полосе неустойчивости среди известных подобных систем.

Научная и практическая значимость работы

Результаты исследований, полученных в ходе выполнения данной работы, позволяют лучше понять процессы, происходящие во взаимодействующих двойных системах. Полученные данные могут быть использованы в дальнейшем для улучшения теории эволюции катаклизмических переменных и теоретических моделей гидродинамики аккреционного диска. Также полученный материал может быть использован в процессе обучения студентов на кафедрах астрономии и физики, при написании дипломных работ, а также в публичных лекциях по астрономии для широких масс населения.

Методология и методы исследования

Исследования проведены на основе фотометрических наблюдений, полученных на 2.6-м телескопе ЗТШ (90%) и на 38-см телескопе (10%). Для обеспечения максимальной эффективности наблюдений слабых объектов с минимальными потерями света, автором была разработана и установлена в прямом фокусе ЗТШ наблюдательная аппаратура с ПЗС-матрицей, колесом фильтров и обвязкой. Использовались также данные, полученные в других обсерваториях в рамках международных кампаний.

Наблюдения проводились с помощью пакета Maxim DL; обработка и калибровка изображений исследуемых объектов, звёзд сравнения и контрольных звёзд осуществлялась методами апертурной фотометрии. Анализ данных проводился с помощью традиционных апробированных методик: анализа временных рядов – периодограммного анализа, анализа разностей наблюденных и ожидаемых моментов экстремумов блеска (метод O-C); диаграмм «цвет-звездная величина». Оценки полученных физических характеристик делались с использованием эмпирических и теоретических соотношений. Использовался новый подход к поиску отрицательных сверхгорбов у карликовых новых типа SU UMa.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для короткопериодической карликовой новой EZ Lup, содержащей пульсирующий белый карлик, впервые обнаружены пульсации, существующие в течение десяти лет после вспышки 2010 г. и показано их увеличение с 257 сек. до 756 сек., происходившее неравномерно. Это соответствует остыванию белого карлика с $\sim 12\,000$ К до $\sim 11\,400$ К и указывает на самое долгое пребывание в полосе нестабильности для известных аккрецирующих пульсаторов среди карликовых новых. Показаны отличия поведения пульсаций аккрецирующего белого карлика от изолированного.

2. Обнаружены орбитальные периоды у карликовых новых 1RXS J0038 (0.09451 сут.) и 1RXS J1616 (0.06888 сут.) по данным наблюдений в спокойном состоянии. Показано, что это системы с частным затмением, а 1RXS J0038 попадает в «пробел» распределения орбитальных периодов.

3. Для карликовых новых 1RXS J0038 и 1RXS J1616 впервые сделаны оценки отношения масс компонентов, находящиеся в хорошем согласии с теоретическими оценками стандартной эволюции КП.

4. Обнаружены отрицательные сверхгорбы у карликовой новой NY Her в спокойном состоянии с периодом 0.07141(5) сут. Получено наблюдательное подтверждение теоретического предсказания о связи увеличения интервала между вспышками с появлением нодальной прецессии аккреционного диска. Также найдены отрицательные сверхгорбы у карликовой новой 1RXS J0038 (период 0.0917 сут.) в спокойном состоянии и нормальной вспышке.

5. Создана база фотометрических данных ряда катаклизмических переменных типа SU UMa с малым отношением масс и различным эволюционным статусом, являющаяся значимым вкладом в мировую базу данных этих объектов (более 40000 оценок блеска, суммарное время наблюдений около 650 часов).

Достоверность и апробация работы

Результаты, представленные в данной диссертации, имеют достаточную достоверность и обоснованность, определяемую статистическим анализом большого количества нового фотометрического материала, полученным на длительном интервале времени.

Основные выводы и положения диссертации получили высокую оценку среди мирового астрономического сообщества, о чем свидетельствуют публикации в ведущих научных журналах с высоким импакт фактором, а также были использованы другими авторами, о чем говорит цитируемость статей. В частности, обнаруженное нами появление нерадиальных пульсаций белого карлика в системе карликовой новой EZ Lyn, через несколько месяцев было подтверждено наблюдениями космическим телескопом Хаббл.

Основные научные результаты диссертационной работы были представлены в докладах на 13 международных и всероссийских научных конференциях:

Международная конференция «20th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics», Kyiv 2013. *Color study of the eclipsing cataclysmic variable IRXJ 003829 in an inactive state in 2010-2012.*

Международная конференция «19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics», Kiev 2012. *Cataclysmic variable Star IRXJ003828. Discovering the eclipse. Physical characteristic.*

Международная конференция «Астрономия и физика космоса», Compact binary stars—the sources of gravitational radiation: 15 years of investigation in the Crimean astrophysical observatory.

Международная конференция «Palermo workshop 2015 “The golden age of cataclysmic variables and related objects-III”, September 7-12, Palermo, Italy. *Cataclysmic variable in the period gap or the borderline SU UMa type dwarf novae.*

Международная конференция "Stars: from Collapse to Collapse" SAO, Nizhnij Arkhyz, Oct. 3-7, 2016, EZ Lyn: 5 years of "rest".

Международная конференция "Golden age of cataclysmic variables and related objects - IV", Palermo, Italy, Sept. 11 - 16. *SU UMa dwarf novae in the*

period gap.

Международная конференция International conference "Compact White Dwarf Binaries", Yerevan, Armenia, September 15 -21, 2019. Evolution of negative superhumps

Международная конференция "Наземная астрономия в России. XXI век." САО, 21-25 сент. 2020. Особый этап эволюции катаклизмических переменных.

Всероссийская конференция "Звезды, планеты и их магнитные поля", 17-21 сентября, Санкт-Петербург. Периодические процессы в катаклизмических переменных: предсказания и наблюдения

Всероссийская конференция «Настоящее и будущее малых и средних телескопов». Россия, САО, пос. Нижний Архыз, 19-22 октября 2015 г. Последние результаты исследования катаклизмических переменных на телескопах НИИ КрАО.

XXV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых "ВНКСФ". Санкт-Петербург, 2018. Циклическое изменение периода отрицательных сверхгорбов у караклизмической переменной NY Her.

ВАК 2021: "Астрономия в эпоху многоканальных исследований", 23-28 августа, 2021, Москва, Россия. EZ Lup: быстрое остывание белого карлика после вспышки 2010 г.

Всероссийская астрономическая конференция - 2017 "Астрономия: познание без границ", 17-22 сентября, 2017, Ялта, Крым. NY Her: открытие отрицательных сверхгорбов.

Первая ежегодная конференция молодых ученых НИИ "КрАО" 16 ноября 2015 г. Результаты исследования катаклизмических переменных V1006 Cyg, IRXSj003828, ASASSN 14fu и объекта KIC 2856960 в 2014-2015 г.

Вторая ежегодная конференция молодых ученых НИИ "КрАО" 15 ноября 2016 г. EZ Lup - 5 лет "покоя"

Третья ежегодная конференция молодых ученых КрАО РАН. 28 ноября 2017 г. NY Her: обнаружение отрицательных сверхгорбов. Дискуссия

Четвертая ежегодная конференция молодых ученых КрАО, Научный, 11-12 декабря 2018 г. Редкие периодические процессы в катаклизмических переменных.

Научный семинар КрАО, март 2016. Затменная катаклизмическая переменная IRXSJ003828 с высокой переменностью внезатменного блеска.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объём работы составляет 119 страниц, диссертация содержит 52 рисунка, 6 таблиц, список используемой литературы включает в себя 88 ссылок.

Список публикаций автора по теме диссертации

Автор имеет 9 опубликованных работ по теме диссертации, из них в рецензируемых журналах, входящих в число научных журналов, рекомендованных ВАК – 7 работ.

1. Amantayeva, A.; Zharikov, S.; Page, K.; Pavlenko, E.; **Sosnovskij, A.**; Khokhlov, S.; Ibraimov, M. *Period Bouncer Cataclysmic Variable EZ Lyn in Quiescence*. // The Astrophysical Journal, Volume 918, Issue 2, id. 58, 16 p., 2021.
2. Pavlenko, E.; **Sosnovskij, A.**; Antoniuk, K.; Lyumanov, E.; Pit, N.; Antoniuk, O. *Humps and Superhumps in the SU UMa-Type Dwarf Nova System IRXS J161659.5+620014*. // Astrophysics, Volume 63, p. 491–503, 2020.
3. Pavlenko, E.; **Sosnovskij, A.**; Katysheva, N.; Kato, T.; Littlefield, K. *Eclipsing SU UMa-Type Dwarf Nova IRXS J003828.7+250920 During the "Period Gap". I. Multiperiodicity and Color Features in 2011-2012*. // Astrophysics, Volume 59, Issue 3, p. 304-320, 2016.
4. Pavlenko, E.; Kato, T.; **Sosnovskij, A.**; Andreev, M.; Ohshima, T.; Sklyanov, A.; Bikmaev, I.; Galeev, A. *Dwarf nova EZ Lyncis second visit to instability strip*. // Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, Issue 6, p. 113, 2014.
5. Pavlenko, E.; Malanushenko, V.; Tovmassian, G.; Zharikov, S.; Kato, T.; Katysheva, N.; Andreev, M.; Baklanov, A.; Antonyuk, K.; Pit, N.; **Sosnovskij, A.**; Shugarov, S. *SDSS J080434.20 +510349.2: cataclysmic variable witnessing the instability strip?* // Memorie della Societa Astronomica Italiana, Volume 83, p.520, 2012.

6. Kato, T.; Isogai, K.; Hamsch, F.; Vanmunster, T.; Itoh, H.; Monard, B.; Tordai, T.; Kimura, M.; Wakamatsu, Y.; Kiyota, S.; Miller, I.; Starr, P.; Kasai, K.; Shugarov, S.; Chochol, D.; Katysheva, N.; Zaostroynykh, A.; Sekeráš, M.; Kuznyetsova, Y.; Kalinicheva, E.; Golysheva, P.; Krushevskaya, V.; Maeda, Y.; Dubovsky, P.; Kudzej, I.; Pavlenko, E.; Antonyuk, K.; Pit, N.; **Sosnovskij, A.**; Antonyuk, O.; Baklanov, A. et al. *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, Volume 69, Issue 5, 75 p., 2017.
7. **Sosnovskij, A.**, Antonyuk, O. I., Pavlenko, E. *EZ Lyn: 5 Years of "Quiescence"*. // Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Edited by Yu. Yu. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.205, 2017.
8. **Sosnovskij, A.**, Pavlenko, E. *EZ Lyn: White Dwarf fast cooling after 2010 outburst*. // Astronomy at the epoch of multimessenger studies. Proceedings of the VAK-2021 conference, Aug 23–28, 2021.
9. **Sosnovskij, A.**, Pavlenko, E., Pit, N., Antoniuk, K. *NY Her: possible discovery of negative superhumps*. // Information Bulletin on Variable Stars, No. 6216, #1, 2017.

Личный вклад автора

Диссертация на 90% основана на наблюдениях, полученных соискателем в 2010-2021 гг. единолично. В 2012 году автором была разработана и установлена в прямом фокусе 2.6 м. телескопа ЗТШ кассета с оборудованием, позволяющим проводить собственные исследования по данной тематике. Большинство данных, представленных в диссертации (в течение 80 ночей), были выполнены на этом оборудовании. Для статей 1-9 была осуществлена обработка и первичный анализ данных, подготовка программ наблюдений. В статьях 7-9 соискатель является первым автором, а полученные результаты полностью основаны на наблюдениях, полученных и обработанных лично. В статьях 2, 3, 4, 5 наблюдения автора вносят

определяющий вклад, соискатель участвовал в постановке задачи, проведение частотного анализа, написании текстов статей, представлении, интерпретации и обсуждении полученных результатов.

Краткое содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются ее цель, задачи и методы исследования. Обсуждаются научная новизна и практическая значимость исследования, приводятся положения, выносимые на защиту, излагаются содержание работы и личный вклад автора.

Первая глава диссертации посвящена обзору современного состояния проблемы, методике ведения наблюдений и анализа данных. **В главе 1.1** описано современное состояние проблемы и основные теоретические сведения об этом классе объектов, имеющиеся на сегодняшний день. **В главе 1.1.1** приведена информация о карликовых новых типа SU UMa - подклассе немагнитных катаклизмических переменных (далее КП) с периодами < 3 часов: **глава 1.1.1.1** посвящена описанию приливной неустойчивости аккреционных дисков и её следствиям – апсидальной прецессии и положительным сверхгорбам, приведены перспективы колориметрических наблюдений сверхгорбов в течение сверхвспышки для КП с различным темпом потери вещества звезды-донора. **В главе 1.1.1.2** идёт речь о менее распространённом явлении в КП - отрицательных сверхгорбах, и общепринятой гипотезе, объясняющей их появление - обратной нодальной прецессии диска, плоскость которого наклонена к орбитальной плоскости [32]. Глава 1.1.3 посвящена описанию «пробела» в распределении орбитальных периодов – особом этапе в эволюции КП, во время которого происходит смена механизмов потери углового момента.

Глава 1.1.4 описывает особенности поведения нерадиальных пульсаций аккрецирующих белых карликов. **Глава 1.2** посвящена методике наблюдений и обработке данных: в **главах 1.2.1, 1.2.2 и 1.2.3** описаны инструменты, на которых проводились наблюдения, представлены их технические характеристики,

возможности, кривые чувствительности светофильтров, формулы перехода от инструментальной системы BVRI к стандартной BVRCIS Джонсона-Кузинса, а также описаны принципы апертурной фотометрии, приведены зависимости точности единичного измерения блеска от звёздной величины для данного времени экспозиции, информация о звездах сравнения и использованные методики анализа данных наблюдений.

Глава 2 диссертации посвящена исследованию эволюции нерадиальных пульсаций белого карлика у катаклизмической переменной EZ Lyn, содержащей пульсирующий белый карлик. В **главе 2.1.1** изложена история объекта. В **главе 2.2** описаны наблюдения, которые проводились с 2007 по 2021 г. в КрАО на 2.6 м телескопе ЗТШ и других телескопах - всего в течение 57 ночей, и методы анализа данных. Представленный в диссертации интервал наблюдений EZ Lyn составляет около 1 г. после вспышки 2006 г. и около 10 лет (более 50 ночей) после вспышки 2010 г., из них диссертантом самостоятельно выполнены наблюдения и обработка данных в течение 45 ночей.

В **главе 2.3** представлена долговременная кривая блеска карликовой новой типа WZ Sge EZ Lyn с 2006 по 2021 гг. построенная по нашим данным, включающая две вспышки, серию мини-вспышек после вспышки 2006 года и наблюдения в спокойном состоянии. EZ Lyn показала нехарактерно высокую для звёзд типа WZ Sge вспышечную активность, продемонстрировав две вспышки с интервалом в 4 года, в то время как частота вспышек большинства звёзд типа WZ Sge - десятки лет. Показано, что вспышка 2010 года отличалась от предыдущей числом повторных поярчений (ребрайтингов).

В **главе 2.4** показано, что нерадиальные пульсации белого карлика, обнаруженные в первом прохождении полосы неустойчивости после вспышки 2006 г. [44], продолжали регистрироваться и во время мини-вспышек в 2007 г. с периодом, близким к периоду, который регистрировался в спокойном состоянии. Отмечено, что присутствие пульсаций в мини-вспышках указывает на то, они не

вызвали нагрев белого карлика, достаточный для выхода из полосы неустойчивости. В **главе 2.5** представлен анализ нерадиальных пульсаций белого карлика в течение второго прохождения полосы неустойчивости (2011-2021 гг.), в которую EZ Lyn вошёл спустя ~ 7 месяцев после вспышки 2010 г, но с меньшим периодом пульсаций - 4,28 мин (257 сек). В том же году наблюдения EZ Lyn были проведены космическим телескопом Хаббл, который подтвердил наличие пульсаций с этим же периодом в ультрафиолетовом диапазоне [60]. **Глава 2.6** посвящена анализу быстрых изменений периода пульсаций в течение нескольких часов по данным отдельных ночей. В **главах 2.7-2.8** рассматривается эволюция пульсаций на всём 10-летнем интервале наблюдений, показывающая «скачкообразное» увеличение периода от 4.28 мин до 12.6 мин. (см. Рис. А), а также показано, что белый карлик продолжает пульсировать, а значит, находится в полосе неустойчивости не менее 10 лет и продолжает остывать. В обсуждении, которое приводится в **главе 2.9**, показано, что это увеличение периода может соответствовать уменьшению температуры белого карлика от $\sim 12000\text{K}$ до $\sim 11400\text{K}$ и продемонстрировано хорошее согласие с температурами, найденными независимо спектральными методами.

Сделан вывод, что спустя 10 лет после вспышки EZ Lyn белый карлик всё ещё не вышел из полосы неустойчивости, хотя прошёл бóльшую её часть. Отмечено также, что подобное неравномерное увеличение периода пульсаций в процессе остывания белого карлика после вспышки наблюдалось у GW Lib [66]. Это одно из основных отличий поведения пульсаций аккрецирующих белых карликов в тесных двойных системах от изолированных. В **главе 2.10** представлены выводы по данному объекту и указан личный вклад соискателя.

Глава 3 посвящена исследованию карликовой новой типа SU UMa 1RXS J0038. Общая информация об объекте и постановка задачи представлена в **главе 3.1**. Описание наблюдений, проведённых на разных стадиях вспышечной активности (во время сверхвспышки 2010 г., в неактивном состоянии 2011-2010 гг. и в нормальной вспышке 2012 г. дано в **главе 3.2**. В **главе 3.3** представлен

анализ наблюдений во время сверхвспышки 2010 г., проведённый в рамках международной кампании VSNET, показавший наличие сверхгорбов с периодом 0.097 сут., что дало основание заподозрить нахождение этого объекта в пробеле периодов. Поскольку для окончательной классификации этого объекта необходимо знание орбитального периода, специальные наблюдения с целью его поиска были проведены в минимуме блеска.

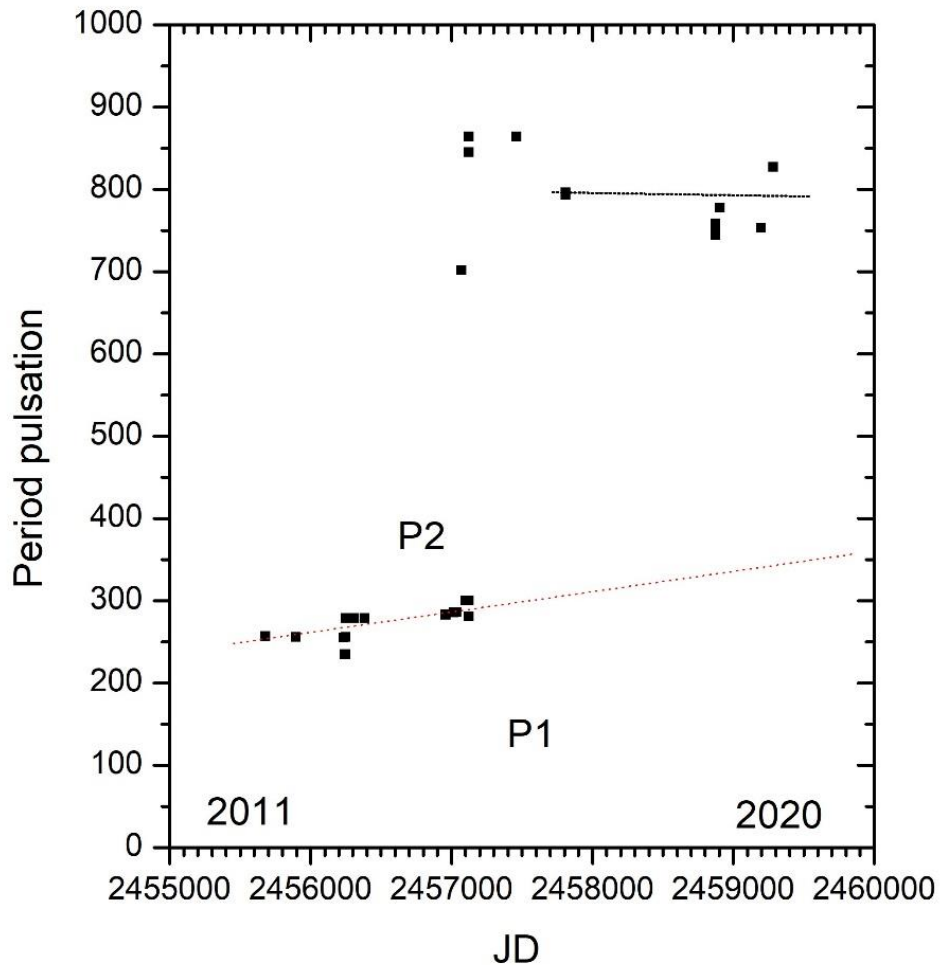


Рис. А. Эволюция нерадиальных пульсаций белого карлика EZ Lyn после вспышки 2010 г. в течение десяти лет.

Результат наблюдений и их анализ приведён в **главе 3.4**. В ней описываются обнаружение орбитального горба, частного затмения и их характеристик на кривых блеска и, следовательно, нахождение орбитального

периода. Его величина 0.0945 сут. однозначно определяет карликовую новую как находящуюся в пробеле периодов. В этой же главе показано, что частное затмение наблюдается также и на кривой блеска во время нормальной вспышки. В **главе 3.5** идёт речь о выяснении причины вариаций внезатменного блеска. Анализ временных рядов выявил наличие ещё одного периода - отрицательных сверхгорбов, который наблюдался по крайней мере в течение двух лет. Знание периода положительных сверхгорбов и орбитального периода позволило вычислить избыток и дефицит периода ϵ (**глава 3.6**) и получить оценку отношения масс компонентов 1RXS J0038 $q \sim 0.21$, которая неплохо согласуется со стандартным ходом эволюции (**глава 3.7**). В **главе 3.8** описываются результаты анализа колориметрических наблюдений в полосах BVRc. Показано положение 1RXS J0038 и контрольных звезд на двухцветной диаграмме B-V, V-Rc. В то время, как контрольные звезды поля располагаются в непосредственной близости от Главной последовательности, положение 1RXS J0038, в среднем, смещено относительно нее и линии абсолютно черного тела вправо. Это может указывать на то, что основным источником излучения в минимуме блеска является аккреционный диск и горячее пятно. В **главе 3.9** представлены выводы к главе 3 и указан личный вклад соискателя в изучение данного объекта.

Результаты анализа периодических явлений у карликовых новых NY Her в минимуме блеска и 1RXS J1616 во время сверхвспышки, нормальных вспышках и в минимуме блеска, описаны в **Главе 4**.

В **главе 4.1** даётся обоснование выбора NY Her и 1RXS J1616 для поиска вероятных отрицательных сверхгорбов у этих объектов при анализе долговременных кривых блеска, была замечена необычно низкая частота нормальных вспышек при коротком сверхцикле. Авторы предположили, что увеличение цикла (интервала между нормальными вспышками) могло произойти из-за наклона аккреционного диска над орбитальной плоскостью. В этом случае аккреционная струя большую часть времени попадает не в край диска, а в его центральные части и требуется больше времени для достижения критических

условий, необходимых для запуска тепловой неустойчивости. Вследствие этого можно было бы ожидать появление нодальной прецессии диска и, как следствие, отрицательных сверхгорбов. Основная информация об NY Her дана в **главе 4.2.1**, а наблюдения описаны в **главе 4.2.2**. **Глава 4.2.3** посвящена анализу кривых блеска, полученных во время спокойного состояния NY Her, когда его блеск колебался в пределах $18^m.5 - 19^m.8$. Представлен анализ временных рядов, указавший на строгую периодичность сигнала с большой амплитудой. Приведены аргументы в пользу того, что обнаруженная периодичность, действительно, является искомым периодом отрицательных сверхгорбов.

Сведения о карликовой новой 1RXS J1616 изложены в **главе 4.3.1**, а наблюдения описаны в **главе 4.3.2**. В **главе 4.3.3** показана вспышечная активность объекта, зарегистрированная соискателем в 2017 г., выявившая конкретную длину цикла (11 сут.) нормальных вспышек в эпоху наблюдений. Периодограммный анализ данных 1RXS J1616 в минимуме блеска не показал наличие периода отрицательных сверхгорбов, как предполагалось. Вместо этого была обнаружена переменность блеска с орбитальным периодом.

В **главе 4.3.4** идёт речь об исследовании положительных сверхгорбов во время сверхвспышки 2018 г. Определены моменты максимумов блеска и соответствующие величины O-C. Сравнение с ходом O-C у предыдущих сверхвспышек 2016 и 2017 гг. показало хорошую воспроизводимость. Определено, что наблюдения приходились на конечную стадию (C) эволюции положительных сверхгорбов. Знание орбитального периода и периода положительных сверхгорбов позволило найти избыток периода и получить оценку отношения масс компонентов 1RXS J1616, равную $q=0.14$, оказавшуюся в хорошем согласии со стандартной эволюцией КП. В **главе 4.3.5** представлен результат BVRc колориметрии положительных сверхгорбов: небольшое увеличение амплитуды с длиной волны; показатель цвета B-Rc наиболее «красный» вблизи максимума сверхгорба.

В главе 4.3.6 представлены выводы к главе 4. и указан личный вклад диссертанта в изучение данных объектов.

В заключении подводятся итоги и формулируются основные выводы диссертационной работы.

Глава 1. Обзор современного состояния проблемы. Методика ведения наблюдений и анализ данных

1.1 Современное состояние проблемы

Катаклизмические переменные (КП) — класс астрономических объектов, относящихся к переменным звёздам и проявляющие катаклизмическую (вспышечную) активность. Это тесные двойные системы на поздних стадиях эволюции [3],[4]. Согласно стандартной модели [6], КП состоят из звезды позднего спектрального класса [5], заполнившей свою полость Роша и теряющей вещество через внутреннюю точку Лагранжа на вырожденный компактный компонент – белый карлик (также, возможно, на нейтронную звезду или черную дыру), предварительно образуя вокруг него аккреционный диск [7] в случае отсутствия у белого карлика магнитного поля (Рис. 1).

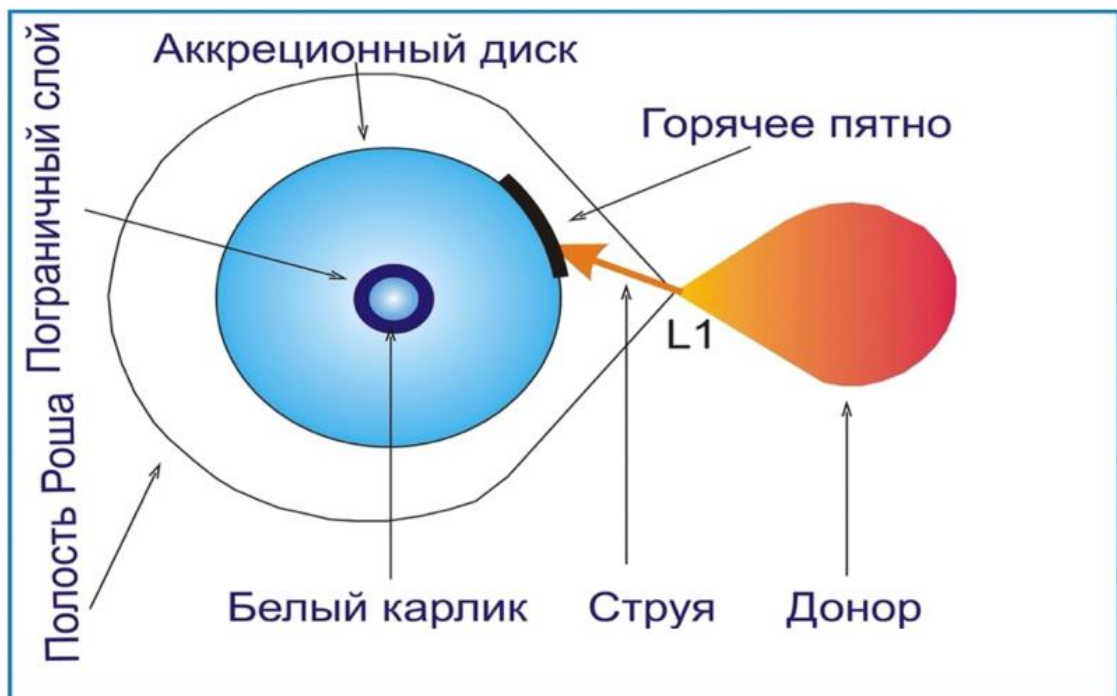


Рисунок 1. Схематическое изображение КП с немагнитным белым карликом (с дисковой аккрецией).

Вторичный компонент-донор теряет вещество с уменьшающимся темпом (см. Рис. 1, [8]) по мере эволюционного уменьшения орбитального периода: от $10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$ (самые долгопериодические КП) до $10^{-11} M_{\odot}/\text{год}$ (самые короткопериодические КП типа WZ Sge).

Темп переноса вещества и отношение масс q являются ключевыми параметрами эволюции КП. Именно они определяют деление катаклизмических переменных на подклассы (Рис. 2 и 3).

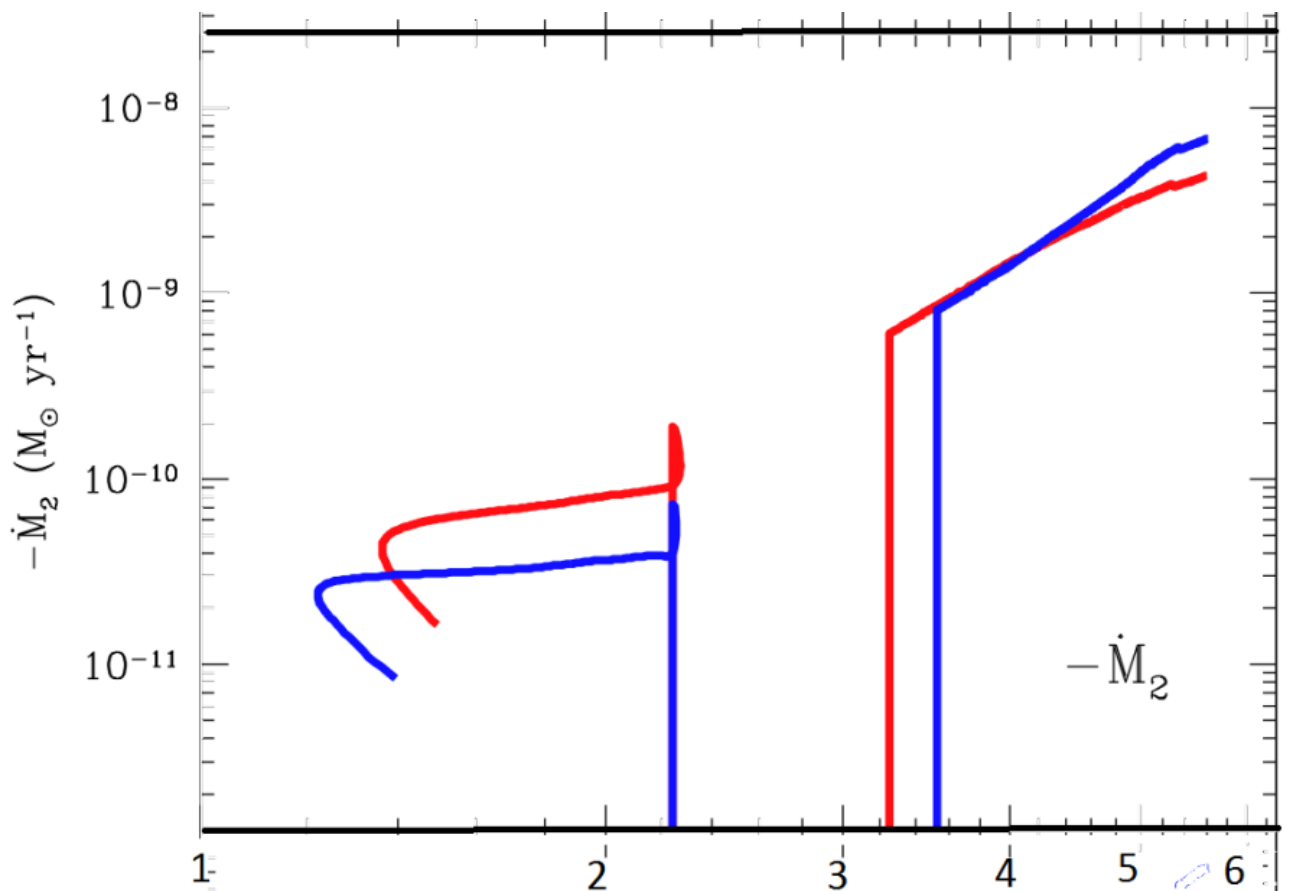


Рисунок 2. Теоретические кривые зависимости «Орбитальный период – темп потери вещества» [8]. Красным цветом показана кривая, соответствующая ходу стандартной эволюции, синим – оптимальной эволюции. Отсутствие переноса вещества относится к «пробелу» в распределении КП по орбитальным периодам (см. Раздел 5 о пробеле периодов).

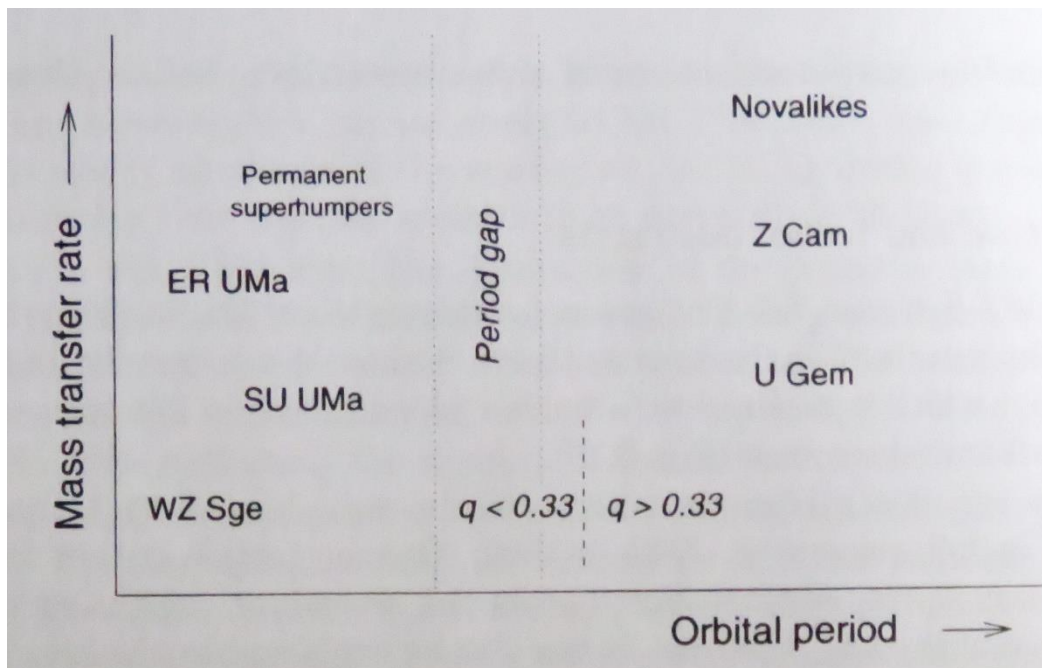


Рис. 3. Типы катаклизмических переменных с точки зрения орбитального периода и темпа переноса вещества. Самый высокий темп переноса вещества имеют долгопериодические КП типа Z Cam, а самый низкий – КП типа WZ Sge.

Аккреционные диски в катаклизмических переменных – в высшей степени нестационарные объекты. Они претерпевают различные виды неустойчивости – тепловую, приливную или обе [2, 9-13], прерывистую аккрецию на белый карлик (карликовые новые), циклическое изменение радиуса, могут иметь сложную и неоднородную структуру. В спокойном состоянии — это холодные нейтральные диски с малой вязкостью $\alpha = 0.01 - 0.05$ (<0.001 у звезд типа WZ Sge), а во вспышках – горячие ионизованные диски с высокой вязкостью ($\alpha = 0.1 - 0.5$). Вспышки объясняются тепловой неустойчивостью аккреционных дисков. До сих пор нет единой точки зрения на причину этой неустойчивости. Согласно одной (в настоящее время – доминирующей) точки зрения [2] является внутренняя неустойчивость диска, согласно другой - неустойчивость переносимого вещества от компонента-донора.

В результате столкновения аккреционной струи с диском образуется горячее пятно. Однако эта привычная модель взаимодействия газовой струи с аккреционным диском в немагнитных системах в настоящее время оказывается

уже не столь очевидной: в ряде работ, например, Bisikalo et.al. [14] рассматривается концепция безударного взаимодействия. Если же белый карлик обладает сильным магнитным полем, аккреция идет на магнитные полюса белого карлика [15].

Теряя вещество, компонент-донор может уменьшить свою массу настолько, что отношение масс компонентов достигнет некоей пороговой величины ($m_2/m_1 < 0.25$, где m_2 – масса вторичного компонента, а m_1 – первичного) и будет продолжать уменьшаться. Катаклизмическая переменная войдет в так называемый «пробел» в распределении орбитальных периодов (76 минут – 3.18 часа) [8], [1]. Системы в пробеле и после прохождения его образуют подкласс КП – систем типа SU UMa (см. ниже).

В этих системах вторичный компонент, теряя массу, становится коричневым карликом, а орбитальные периоды, дойдя до минимального периода, начинают увеличиваться [16]. Такие системы называются «баунсеры». В них, по мнению Жарикова и др. [17], аккреционный диск отличается от кругового и имеет двухспиральную структуру.

1.1.1 Карликовые новые типа SU UMa

1.1.1.1 Приливная неустойчивость, апсидальная прецессия и положительные сверхгорбы

Подкласс немагнитных катаклизмических переменных с периодами < 3 часов – звезды типа SU UMa [4]. Они обладают замечательным свойством – двумя типами вспышек: нормальными и сверхвспышками.

Нормальные вспышки возникают с интервалом от нескольких суток до десятков суток, длятся 2-4 суток и имеют амплитуду 2^m-5^m . Они располагаются между сверхвспышками, амплитуды сверхвспышек несколько больше, чем амплитуды нормальных вспышек, а длительности – от 10 суток и более. В минимуме блеска между вспышками при благоприятном наклоне орбиты можно

наблюдать «горбы» – колебания блеска с орбитальным периодом, а во время сверхвспышек – колебания блеска с периодом «положительных сверхгорбов», на несколько процентов превосходящим орбитальный период. Впервые сверхгорбы были открыты независимо Фогтом [18] и Уорнером [19] во время сверхвспышки 1972 г. карликовой новой типа SU UMa VW Hui. Если «горбы» связывают с условиями видимости «горячего пятна» и/или «горячей линии» [4, 20], то причина «сверхгорбов» принципиально иная. Согласно современным представлениям [10, 21, 22], сверхгорбы являют собой приливные высвобождения энергии в диске. Предполагается, что причиной этих колебаний является прямая прецессия аккреционного диска, возникающая при достижении радиуса диска резонанса 3:1 [22, 10, 9]. Когда радиус диска достигает резонансной орбиты, соответствующей этому резонансу, диск из кругового преобразуется в эллиптический и показывает апсидальную прецессию.

Источник сверхгорбов находится во внешних частях диска, в том месте, где орбиты частиц пересекаются, а их период P_{sh} связан с орбитальным P_{orb} и прецессионным P_{prec} периодами соотношением (1):

$$1/P_{prec} = 1/P_{orb} - 1/P_{sh} \quad (1)$$

Достичь данной резонансной орбиты могут только системы с отношением масс $q = m_2/m_1 < 0.25$, где m_2 и m_1 – массы донора и белого карлика соответственно, поскольку для систем с бóльшим q радиус 3:1 резонанса будет находиться уже за границей приливного радиуса.

Като и др. [23] выделили и исследовали три стадии в изменении периода сверхгорбов в течение сверхвспышки. Это стадия А, которая характеризуется постоянным периодом; стадия В с развитыми сверхгорбами и систематическими изменениями этого периода, причем, его средняя величина меньше, чем на стадии А; стадия С с периодом, меньшим, чем на стадии В, видимая на поздней фазе сверхвспышки до пост-сверхвспышечной фазы. На данном этапе предполагается, что стадия А характеризуется скоростью динамической прецессии на радиусе 3:1 резонанса, стадия В отражает рост газового давления в диске [24, 25, 26].

Происхождение стадии С все еще остается неясным. Звезды типа WZ Sge редко показывают ярко выраженный переход к стадии С.

Неожиданным было обнаружение резервуара пыли за внешней границей оптически видимого аккреционного диска у немагнитной карликовой новой WZ Sge [27], авторы связали происхождение пыли с веществом, теряемым холодным коричневым карликом и показали, что темп потери вещества $10^{-12} M_{\odot}/\text{год}$ (который присущ звездам типа WZ Sge) может обеспечить непрерывное пополнение пылевого тора в системе. Очевидно, что для выживания пыли необходимо достаточно холодное вещество газового диска, способного экранировать горячее излучение белого карлика. Если излучение пыли не обнаружимо в видимой области спектра, то многоцветная фотометрия в широком спектральном диапазоне может выявить наличие холодного вещества.

В этом смысле могут оказаться перспективными колориметрические наблюдения сверхгорбов в течение сверхвспышки для КП с различным темпом потери вещества звезды-донора. Так, Uemura et al. (2008) [28], сделали вывод о скоплении более холодного вещества в самых внешних слоях аккреционного диска у вспыхнувшей КП SDSS J102146.44+234926.3 по сравнению с температурой самых внутренних и внешних областей диска во вспышке $\sim 10^5$ К и 10^4 К соответственно [29]. В 80-е годы последовал ряд работ по колориметрии сверхгорбов. Авторы отмечали, что в основном сверхгорбы «красные», т.е., показатели цвета наиболее красные, когда яркость сверхгорба достигает максимального значения [4]. Однако это единичные данные, и авторы отмечали, что для полноты картины данных наблюдений явно не хватает. Так же в ряде работ по колориметрии сверхгорбов [30, 31] указывалось, что их амплитуда увеличивается с ростом длины волны, что, возможно, также связано с наличием запасов холодного газа во внешнем аккреционном диске.

Однако очень скудные многоцветные наблюдения сверхгорбов на данном этапе не позволяют пока сделать окончательные выводы.

1.1.1.2 Нодалная прецессия и отрицательные сверхгорбы

Менее распространенное явление у катаклизмических переменных разных масс, в том числе и у звезд типа SU UMa, — это «отрицательные сверхгорбы», период которых на несколько процентов меньше орбитального [16]. В отличие от положительных сверхгорбов, этот феномен, наоборот, наблюдается (за небольшим исключением) в неактивном состоянии. Число известных таких систем среди карликовых новых типа SU UMa не превосходит двух десятков, что можно объяснить эффектом селекции, поскольку слабый блеск объектов вне вспышек резко ограничивает возможность их исследований. В настоящее время общепринятой гипотезой, объясняющей появление отрицательных сверхгорбов, считается гипотеза об обратной нодалной прецессии диска, плоскость которого, в силу пока не очень понятных причин, слегка наклонена к орбитальной плоскости [31]. Модуляция блеска с периодом отрицательных сверхгорбов вызывается различным вкладом горячего пятна в общее излучение при попадании аккреционной струи в различные части диска при нодалной прецессии.

У большинства КП цикл относительно стабилен, однако попадаются такие КП, у которых частота нормальных вспышек может изменяться драматически от S (короткий цикл) до L (длинный цикл) согласно исследованиям Смака [33]. Осаки и Като [26] предположили, что появление отрицательных сверхгорбов может уменьшать частоту нормальных вспышек, поскольку аккреционной струе требуется больше времени, чтобы пополнить наклонный диск веществом для срабатывания тепловой нестабильности и появления вспышки по сравнению с диском, который лежит в орбитальной плоскости. Однако это справедливо, как заметили авторы, для вспышек типа «inside-out» (“извне-вовнутрь”), у которых тепловая нестабильность сначала зарождается во внешних частях диска, а затем распространяется во внутренние. Связь появления или\и исчезновения отрицательных сверхгорбов с изменением частоты цикла, предсказанная Осаки и Като, была найдена ранее еще для V503 Cyg [34, 35] по наземным наблюдениям. Как показывает долговременный мониторинг некоторых (к сожалению,

немногочисленных) КП с отрицательными сверхгорбами, характерное время существования отрицательных сверхгорбов (т.е., времени, в течение которого диск пребывает в наклонном состоянии), может варьироваться от десятилетий, как, например, MN Dra [36] до десятков часов [26].

Кратковременная (существующая в течение нескольких сверхциклов) прецессия была названа авторами «импульсной» нодальной прецессией. Она была выявлена по наблюдениям карликовой новой V1504 Cyg с помощью космического телескопа Kepler. Авторы подробно показали, что радиус аккреционного диска циклически изменяется как между вспышками, так и между сверхвспышками. Подобный характер изменения радиуса диска был найден также Павленко и др. [37], Складновым и др. [36] по наземным наблюдениям MN Dra. Осаки и Като [26] показали, что характер изменения радиуса диска может быть решающим параметром в выборе одной из двух моделей, объясняющих прерывистую аккрецию на белый карлик (внутренняя нестабильность диска или нестабильность переносимого вещества). По этой причине наблюдения эволюции отрицательных сверхгорбов чрезвычайно важны для объяснения природы вспышек карликовых новых, однако они очень малочисленны из-за большой трудоемкости подобного исследования: объекты слабы, характерное время изменения периода отрицательных сверхгорбов – десятки суток. И, в первую очередь, необходимы поисковые работы с целью обнаружения новых КП с отрицательными сверхгорбами и разработка критериев поиска таких систем.

1.1.3 «Пробел» в распределении орбитальных периодов

На некотором этапе эволюции при $m_2 \sim 0.3$ солнечных масс, звезда-донор может стать полностью конвективной и магнитное торможение («magnetic braking») может сильно уменьшиться. При этом резко уменьшается темп потери вещества вторичным компонентом, звезда сжимается до восстановления теплового равновесия вплоть до ухода под полость Роша. В таком состоянии

перетекание вещества прекращается, как следствие – прекращаются и вспышки, система «уходит в пробел периодов». Эта стадия длится до тех пор, пока звезда вновь не придет в контакт с полостью Роша и не «выйдет из-под пробела». Темп потери вещества вторичным компонентом для орбитальных периодов, которые превосходят верхнюю 3-часовую границу «пробела», составляет 10^{-8} – 10^{-9} солнечных масс в год, а для периодов, которые меньше 2-часовой границы – от 10^{-10} солнечных масс в год и ниже.

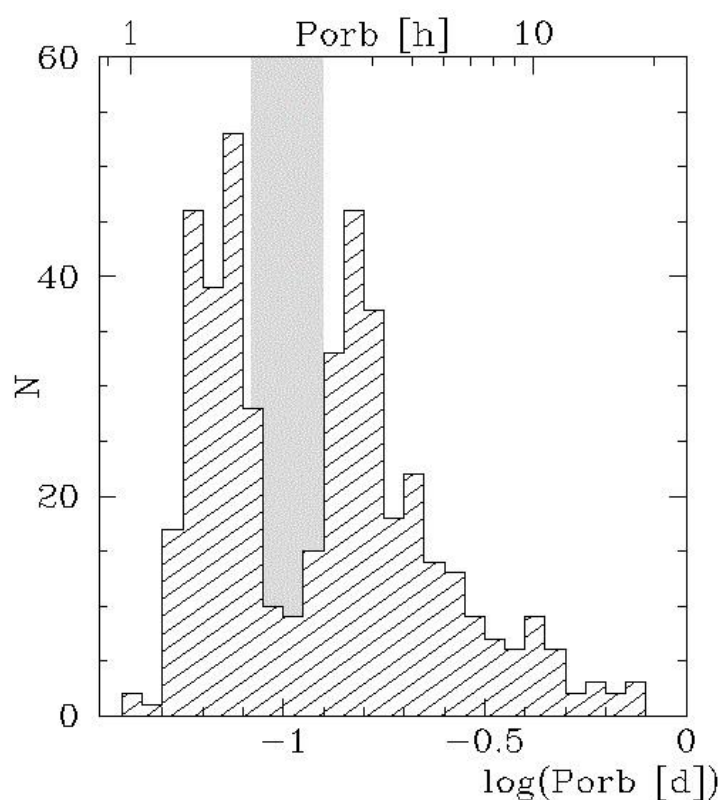


Рисунок 4. Диаграмма распределения звезд различных типов по орбитальным периодам. По вертикальной шкале – количество объектов, по горизонтальной – величина периода.

Вызов данной концепции был брошен несколькими карликовыми новыми, чьи периоды оказались в середине «пробела». Однако Стехле и др. [88], изучая долговременную эволюцию КП в зависимости от металличности звезды-донора, пришли к выводу, что существует зависимость ширины пробела от металличности звезды-донора.

В общем случае в эволюции отдельно взятой катаклизмической переменной должен быть свой индивидуальный «пробел», когда двойная система становится полностью разделенной. Максимальная ширина «пробела» соответствует звездным парам, в которых красный карлик обладает максимальной металличностью (от $Z = 10^{-3}$ до $Z = 0.02$), а минимальная ширина – парам, в которых металличность красного карлика низка ($Z = 10^{-4}$). Другая возможность карликовой новой оказаться в «пробеле» – это родиться в нем, т.е., впервые достигнуть контакта, когда орбитальный период находится в интервале между 2 и 3 ч. (Рис.2) [8].

Интересно распределение систем типа SU UMa в пробеле периодов. По данным 2014 г. [38], их число в пробеле составляло несколько десятков и оно монотонно убывало от короткопериодической границы пробела к долгопериодической (Рис. 4). Авторы объяснили эту особенность тем, что при приближении к долгопериодическому краю пробела, аккреционным дискам сложнее достичь приливной неустойчивости).

1.1.4 Нерадиальные пульсации аккрецирующих белых карликов

Наиболее привлекательными для изучения белых карликов в КП оказываются карликовые новые типа WZ Sge с самыми короткими орбитальными периодами (см. гистограмму на Рис. 5), самым низким темпом переноса вещества и с самым маленьким вкладом диска в общее излучение (порядка 10%), сквозь который просвечивает белый карлик. Претерпевая аккреционные вспышки, белый карлик нагревается, а после прекращения аккреции остывает до температуры, которую он имел в спокойном состоянии (вне вспышки). У некоторых систем температура белого карлика после вспышки оказывается в пределах границ «полосы неустойчивости»

Изучение аккрецирующих белых карликов имеет огромное значение. Во-первых, они дают беспрецедентную возможность исследовать, как внутренняя

структура белого карлика реагирует на аккрецию вещества, используя периоды пульсаций, полученные из наблюдений, во-вторых – мониторинг эволюции пульсационных периодов приведёт к определению полосы неустойчивости этого типа объектов.

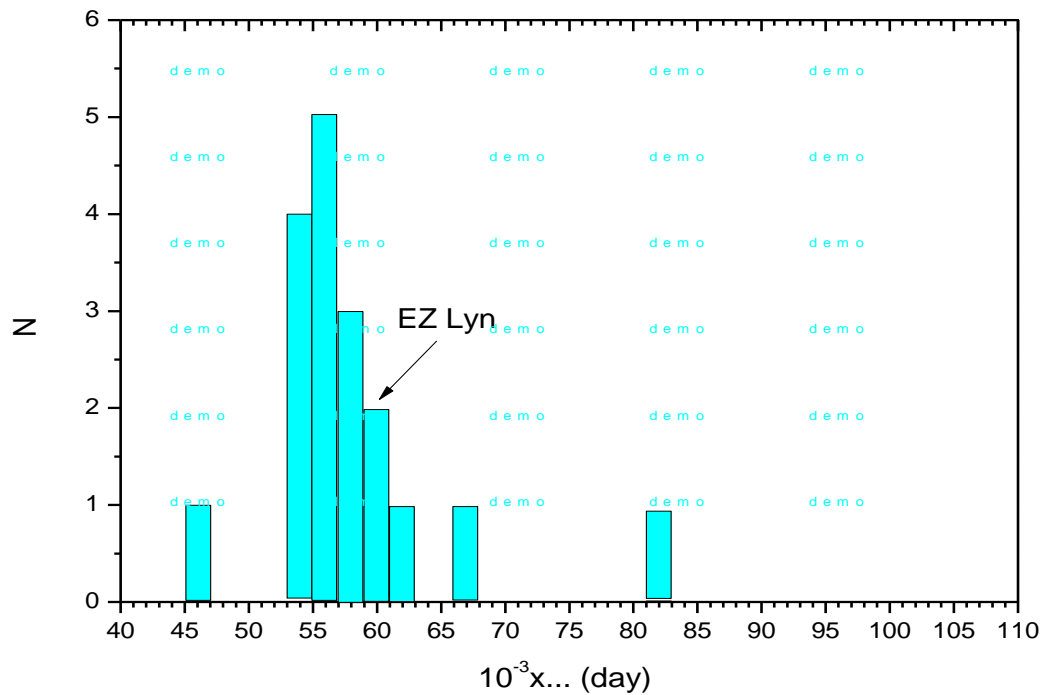


Рисунок 5. Гистограмма распределения аккрецирующих пульсаторов по орбитальным периодам.

Изучение аккрецирующих белых карликов имеет огромное значение. Во-первых, они дают беспрецедентную возможность исследовать, как внутренняя структура белого карлика реагирует на аккрецию вещества, используя периоды пульсаций, полученные из наблюдений, во-вторых – мониторинг эволюции пульсационных периодов приведёт к определению полосы неустойчивости этого типа объектов. Полоса неустойчивости относительно хорошо изучена для одиночных (изолированных) БК ($T = 10\ 800\text{--}12\ 300\ \text{K}$) [39] (Рис. 6) и плохо определена для аккрецирующих БК. Измерения температуры нескольких

известных аккрецирующих БК указывают на более широкий диапазон температур ($T = 10\,500 - 16\,000\text{ K}$) (Таблица. 1) по сравнению с изолированными БК. Для последних определена эмпирическая связь между периодом пульсаций БК и его эффективной температурой [39]. В среднем периоды пульсаций изменяются от ~ 100 до ~ 1000 сек. при снижении температуры от «синего» до «красного» края (Рис. 3).

В соответствии с представленной эмпирической зависимостью, ожидается, что в течение остывания белого карлика (продвижения вдоль полосы нестабильности) могут появляться разные пульсационные моды, причем появление более коротких периодов пульсаций возможно сразу после вспышки, и затем будет сдвигаться в более долгопериодическую сторону, если эмпирическая зависимость «Период-температура» (Рис. 6) справедлива и для аккрецирующих БК. Изолированные БК проходят через полосу нестабильности в течение тысячелетий. Временная шкала пребывания в полосе нестабильности аккрецирующих БК может составлять несколько лет. К сожалению, вспышки непредсказуемы, и большинство из них повторяются через 10–30 лет. Несмотря на то, что известно несколько систем, содержащих пульсирующий БК и претерпевших вспышки, долговременный мониторинг эволюции пульсаций в спокойном состоянии после вспышки выполнен только для GW Lib [40]. К 2021 г. число известных аккрецирующих пульсаторов достигло 18 [41].

Известные вспышки аккрецирующих пульсаторов [41] приведены в Табл. 1. Число известных карликовых новых с пульсирующими белыми карликами составляло 18 объектов, из них всего у восьми объектов зарегистрированы вспышки. Из таблицы видно, что растёт число объектов с интервалом между вспышками несколько лет – а не десятков лет, как считалось раньше.

Имеющиеся данные показывают, что пульсационное поведение аккрецирующих и изолированных белых карликов сильно различается. Отклонения от «нормы» (если под «нормальным» понимать поведение изолированных БК) можно описать исчезновением и возобновлением пульсаций в

масштабе нескольких дней, неравномерное изменение периода пульсаций в масштабе месяцев-лет, имитирующее неравномерное остывание БК после вспышки [41].

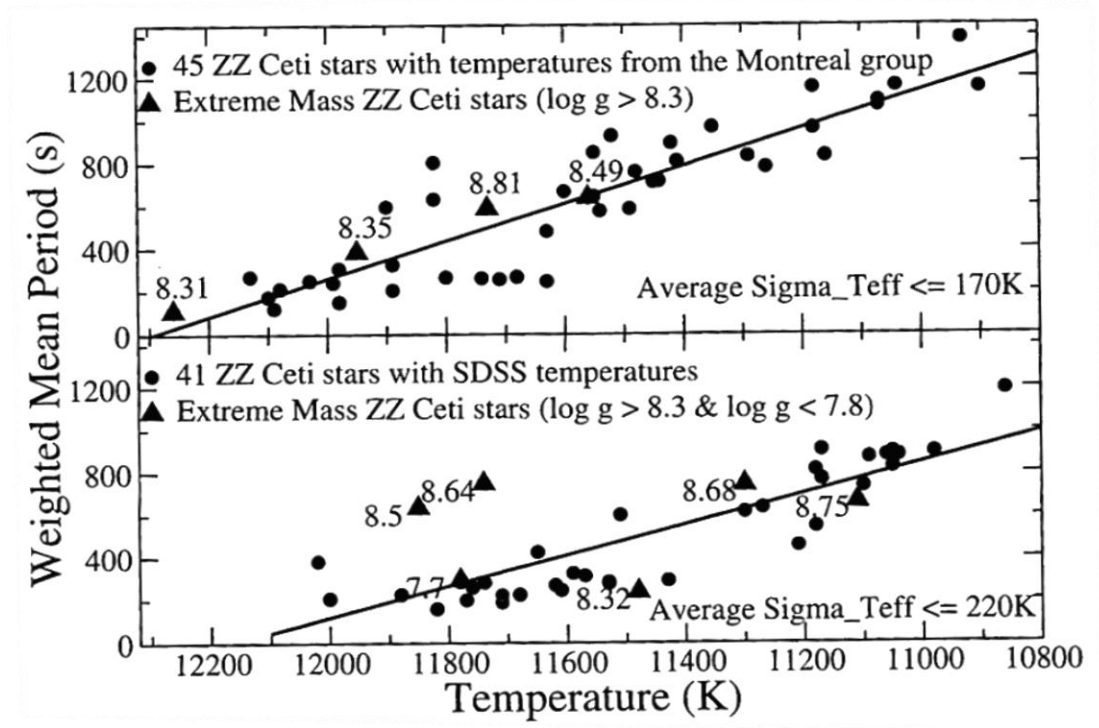


Рисунок 6. Диаграмма зависимости периода пульсаций изолированных БК от их температуры [39].

Таблица 1. Известные к 2021 г. карликовые новые с пульсирующими белыми карликами.

Object	$P_{orb}(\text{min})$	$P_{pulse}(\text{sec})^a$	$T(^{\circ}\text{K})$	Outbursts	Pulsation References
OV Boo	66.6	500, 660, 1140	14,200	1984, 2017	Patterson et al. (2008)
GW Lib	76.8	236,376,648	15,000	1983, 2007	van Zyl et al. (2004)
EQ Lyn	77.8	1,192–1,230	15,100	2006, 2012, 2019	Mukadam et al. (2007)
SDSS1457 + 51	77.9	582–642, 1200		2015	Uthas et al. (2012)
BW Scl	78.2	618,1242	14,800	2011	Uthas et al. (2012)
V386 Ser	80.5	221, 345, 609	14,500	2019	Warner and Woudt (2004)
PQ And	80.6	1358, 1967, 1988	12,000	1938, 1967, 1988, 2010, 2020	Patterson et al. (2005)
LV Cnc	81.3	214, 260	13,500		Mukadam et al. (2007)
GY Cet	81.5	335, 581, 595	14,500	1999, 2020	Warner and Woudt (2004)
V455 And	81.5	320–370	10,500	2007	Araujo-Betancor et al. (2005)
V355 UMa	82.5	641, 1065	12,500	2011	Gänsicke et al. (2006)
SDSS2205 + 11	82.8	330, 475, 575	15,000	2011	Warner and Woudt (2004)
SDSS0755 + 14	84.8	257–262	15,900		Mukadam et al. (2017)
EZ Lyn	85.0	256, 756	13,000	1979, 2006, 2010	Pavlenko (2009)
DY CMi	85.6	238, 684			Woudt and Warner (2011)
PP Boo	88.8	559	10,000		Nilsson et al. (2006)
RXJ0232-37	95.3	267	13,200	2007	Mukadam et al. (2017)
MT Com	119.5	668, 1236, 1344	12,000	1994	Patterson et al. (2005)

^aPrimary known periods visible at quiescence.

1.2 Методика наблюдений и обработка данных.

1.2.1. Телескопы и наблюдения.

Сложность наблюдения объектов, о которых идет речь в данной работе, заключается в том, что зачастую такие объекты очень слабы – во время вспышки блеск может достигать 15-16 зв. в, а вот в спокойном состоянии зачастую 18,5-20 зв. в, и для их подробного изучения требуются крупные телескопы и наблюдательное время. В зависимости от текущего состояния яркости объекта, исследования проводились на следующих телескопах Крымской астрофизической обсерватории:

а) К-380 - имеет диаметр зеркала 38 см. системы Кассегрена (F/13), был изготовлен в Крымской астрофизической обсерватории. Зеркала были отполированы Г. В. Борисовым. Электро-механические узлы телескопа изготовили инженеры КрАО А.Н. Абраменко, Г.А. Сивцов и Н.Н. Охмат. Телескоп установлен в 1998 году. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС SBIG ST-7 и Aropgee ALTA E47 (Рис. 9);

После модернизации телескопа, выполненной так же диссертантом, в августе 2017 года, значительно возросла пороговая звездная величина (до 18 зв. в при эксп. 180 сек, без фильтра), что позволяет теперь вести на нем точные наблюдения выбранных катаклизмических переменных не только во вспышках, но и с более низким временным разрешением в спокойном состоянии практически непрерывно, и, соответственно, значительно увеличить плотность наблюдательных данных.

б) ЗТШ – диаметр зеркала 2.6 м. Наблюдения до 2012 года проводились с ПЗС FLI 1001A, а с 2012 - APOGEE Alta E47. Стоит отметить что в 2012 году диссертантом, при помощи инженеров КрАО Дроздова И.В., Долгополова А.В. и персонала ЗТШ, была изготовлена и установлена в прямом фокусе ЗТШ наблюдательная камера на основе матрицы Aropgee Alta (1024x1024 пикселей (размер пикселя 24 мкм), с кареткой фильтров, обеспечивающих

фотометрическую систему, близкую к системе Джонсона-Кузинса BVRCIc, с полностью автономной системой питания, а так же ее система управления, расположенная в центральном пульте управления ЗТШ. Схематическое изображение телескопа К-380 и оборудования приведены на Рис. 7, а 2.6-м телескопа ЗТШ – на Рис. 8.

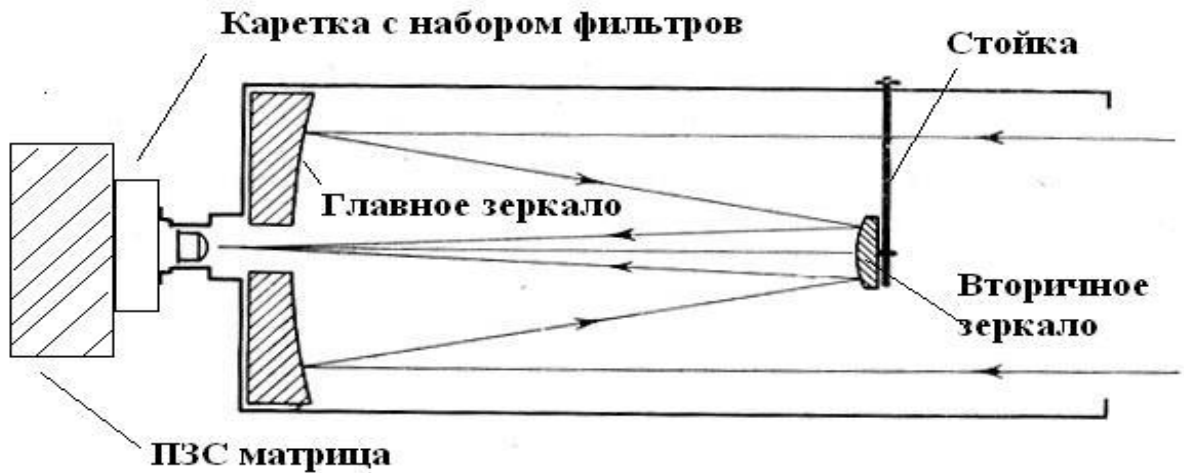


Рисунок 7. Оптическая схема 38-см телескопа К-380, с указанием основных узлов и приемной аппаратуры.

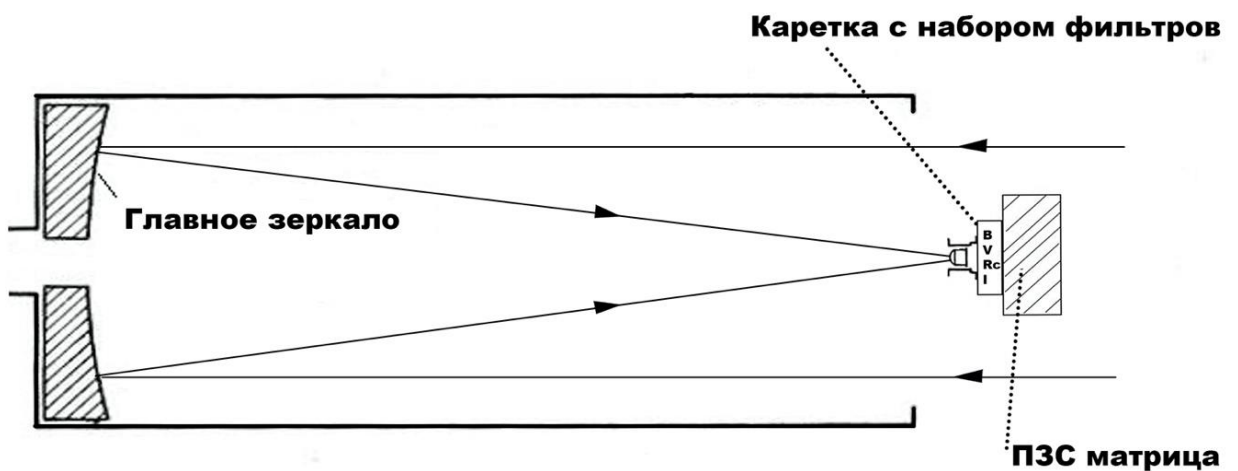


Рисунок 8. Оптическая схема прямого фокуса 2.6-м телескопа.

На Рис. 9 приведена кривая реакции матрицы Argee Alta E47. Максимум чувствительности приходится на красную область спектра, совпадающую с фотометрической полосой Кузинса Rc.

Установленное оборудование имеет разрешение 0.5"/пиксель и поле 7.4x7.4'. Это позволяет достигать $\sim 19 - 19.5$ зв. в. с отношением сигнал/шум 60-80 в полосах BVR_c с характерными временами экспозиций 30-60 сек.

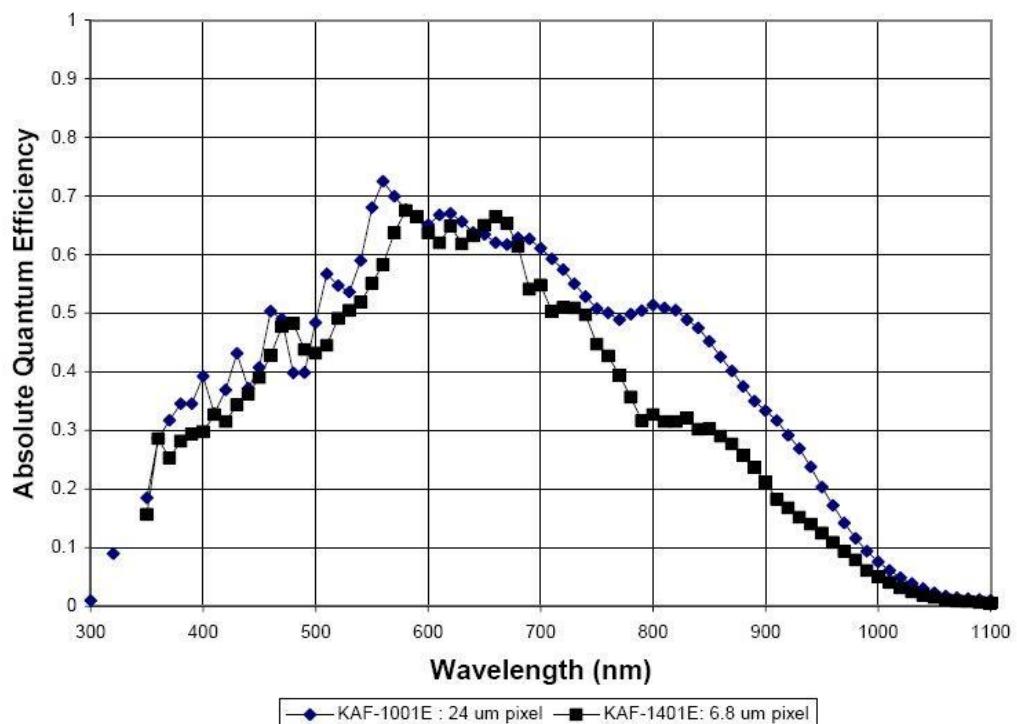


Рис. 9. Кривая чувствительности ПЗС матрицы Argee Alta E47 (в нашем случае - сенсор 1001E, синие квадраты).

Для получения корректных данных при многоцветных наблюдениях, на базе физического факультета Крымского Федерального Университета были измерены полосы пропускания фильтров. (Рис. 10). По наблюдениям звёзд с известными звёздными величинами в рассеянном звёздном скоплении M67 [47] были

рассчитаны формулы перехода от инструментальной системы BVRI к стандартной BVRcIc Джонсона-Кузинса (2-5):

$$B-b = -0.1130 + 0.2635(b-v) \quad (2)$$

$$V-v = 0.0077 + 0.0305(v-r) \quad (3)$$

$$Rc-r = 0.0158 - 0.0521(v-r) \quad (4)$$

$$Ic-i = 0.0959 + 0.6201(v-r) \quad (5)$$

Наблюдения на обоих телескопах велись чаще всего в полосах BVRcIc, но иногда из-за низкой яркости объекта или для получения данных с более высоким временным разрешением, наблюдения проводились в интегральном свете, т.е. без использования фильтров.

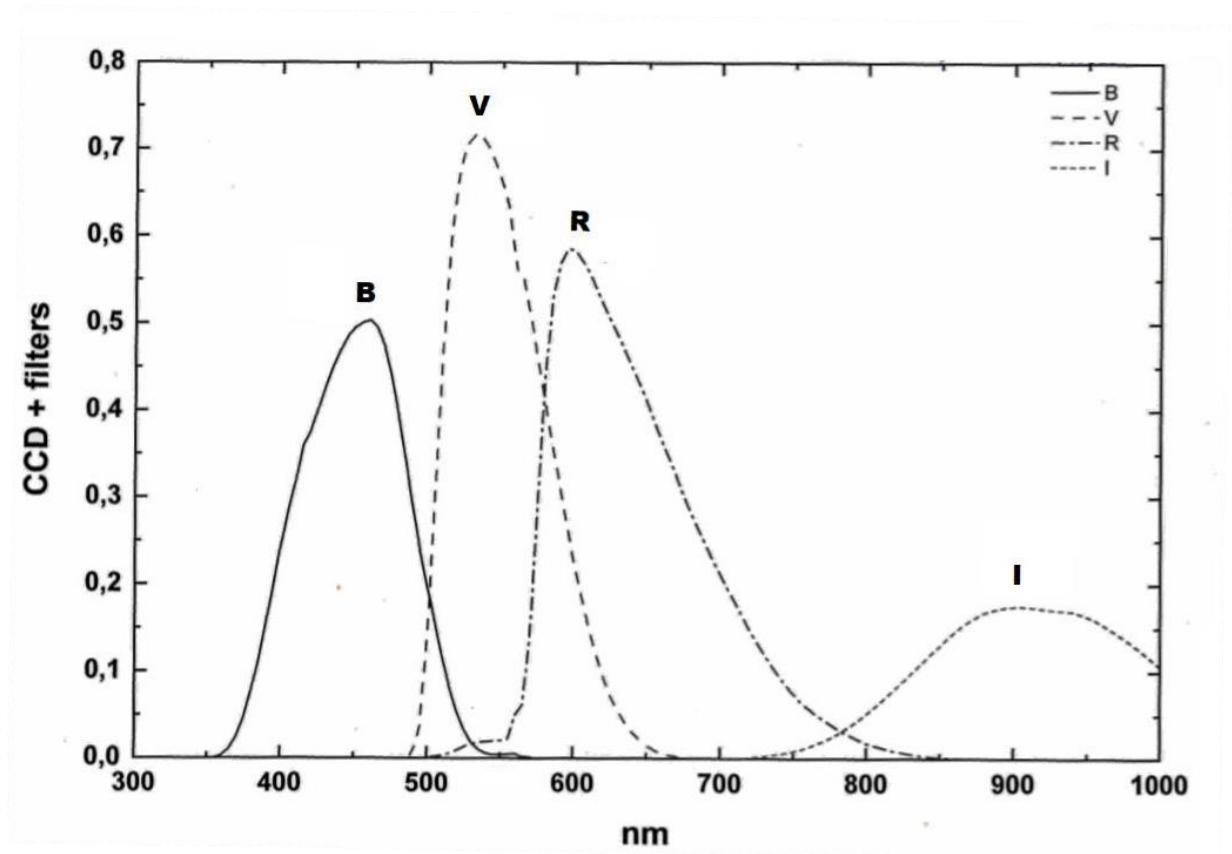


Рисунок 10. Результирующие кривые чувствительности светофильтров с учетом пропускания матрицы Argee-47, использовавшиеся для телескопов К-380 и ЗТШ.

1.2.2 Апертурная фотометрия

Принцип апертурной ПЗС-фотометрии состоит в суммировании значений интенсивности пикселей внутри некоторой области. Обычно используют круг некоторого радиуса. Инструментальная звездная величина звезды считается по простой формуле (6):

$$m_{\text{instr}} = -2.5 \cdot \lg \left(I^{\text{S+F}} - \left(N^{\text{S+F}} / N^{\text{F}} \right) \cdot I^{\text{F}} \right), \quad (6)$$

где $I^{\text{S+F}}$ - суммарная яркость звезды плюс фон по $N^{\text{S+F}}$ пикселям внутри заданной апертуры; I^{F} - яркость фона, оцененная по N^{F} пикселям.

Размер апертуры выбирается с таким расчетом, чтобы уменьшить с одной стороны влияние соседних деталей на изображении, а с другой - наиболее точно измерить яркость звезды.

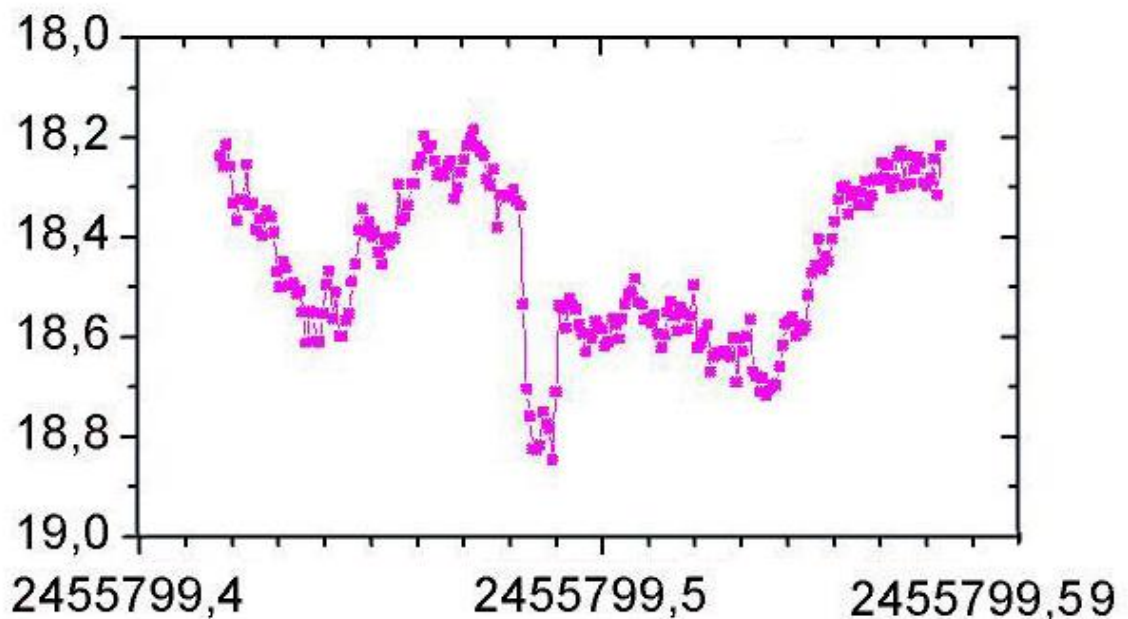


Рисунок 11. Пример кривой блеска из сета наблюдений 1RX J0038 в 2011 году. Ошибка единичного измерения примерно соответствует размеру квадрата.

Управление телескопом во время наблюдений и первичная фотометрическая обработка осуществлялась с помощью программы MAXIM-DL: Во время ПЗС-

наблюдений проводилась запись не только сигнала от переменной звезды, также записывался темновой сигнал, равномерная засветка по небу или куполу телескопа («плоское поле») и байес.

Полученные таким образом данные использовались в дальнейшем для корректной обработки результатов наблюдений, что позволяло исключить влияние инструментальных помех от оборудования. Время считывания сигнала (экспозиция) подбиралось таким образом, чтобы обеспечить необходимый баланс между минимальным временным разрешением и допустимой точностью, достаточной для регистрации ожидаемого эффекта. Переменный объект наблюдался одновременно с одной или несколькими звездами сравнения и контрольными звездами, попадавшими в поле зрения. Подходящая звезда сравнения выбиралась посредством проверки нескольких кандидатов из доступных каталогов (например, USNO) с учетом ее неперемещенности и близкого спектрального класса. Для корректного определения точности наблюдений в каждой цветовой полосе, были проведены специальные измерения блеска окрестных звезд в диапазоне, охватывающем диапазон изменения блеска переменного объекта по нескольким десяткам записей в каждом фильтре (Рис. 12, Рис. 13). Для каждой из контрольных звезд, окружающих переменную звезду, определялась ошибка измерения блеска - среднеквадратичное отклонение от среднего блеска (сигма). Эти определения использовались для получения зависимостей ошибки измерения блеска от звездной величины в каждой цветовой полосе для каждой ночи. В целом наилучшая точность наблюдений обеспечивалась в полосе Rc, наихудшая – в В, что объяснялось кривой чувствительности данного типа ПЗС-приемника.

1.2.3. Методика анализа данных наблюдений

а) *Периодограммный анализ*. В исследованиях рядов данных, с типичной для наземных наблюдений, проводимых на одной долготе, суточной скважностью, выделение истинных периодов составляет одну из труднейших частей анализа.

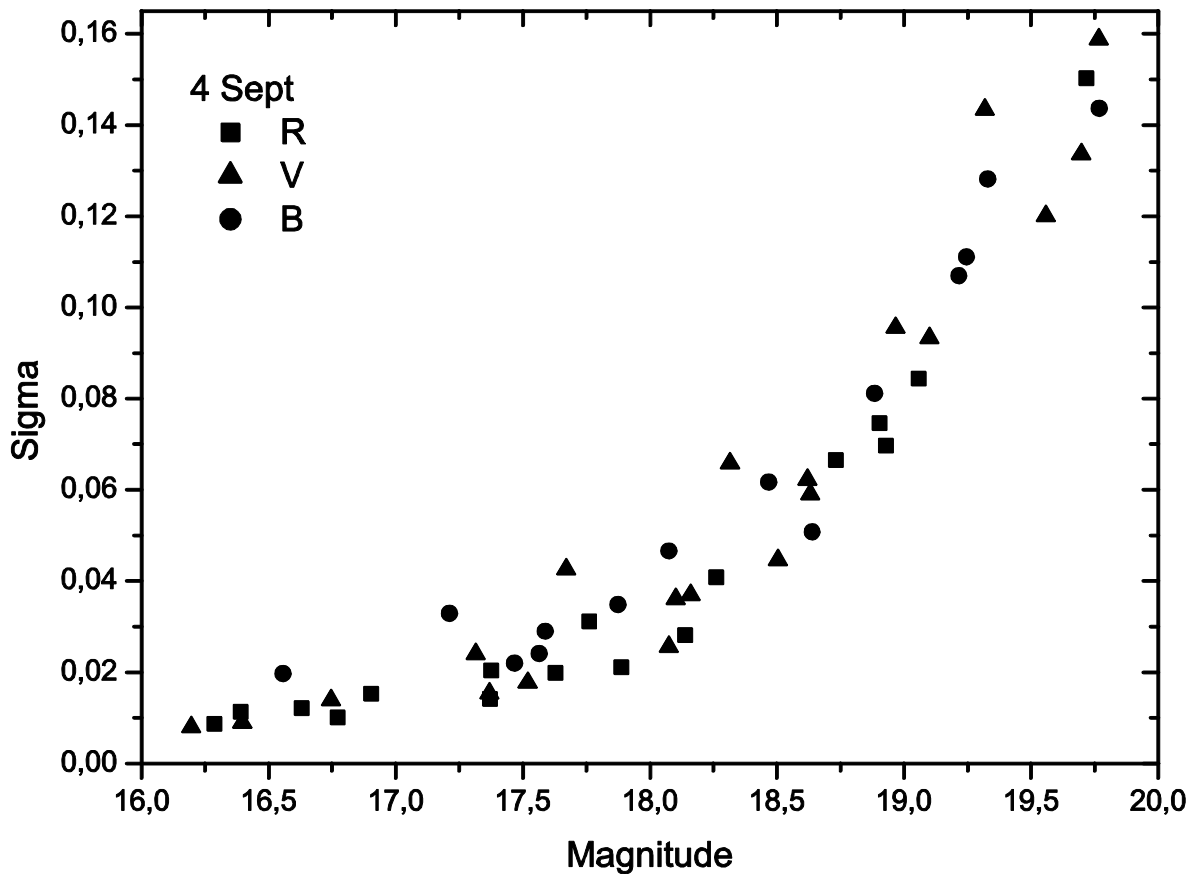


Рисунок 12. Пример зависимости точности единичного измерения блеска от звездной величины для наблюдений 4 сентября 2011 г. на 2.6-м телескопе в фотометрической системе BVRC с экспозицией 20 сек. Квадратами обозначены данные в полосе Rc, треугольниками – в V, кружками – в B.

Для подавления суточной скважности, проводят наблюдения на разных долготах, однако это не всегда возможно. Когда исследуемые колебания блеска имеют достаточно симметричный (синусоидальный) профиль, поиск

предполагаемого периода можно проводить, используя параметрический метод Фурье.

Если же профиль асимметричный, поиск периода осуществлялся уже непараметрическими методами, например, методом Стеллингверфа [42]. При поиске периодического сигнала, данные предварительно освобождаются от долгопериодического тренда (при наличии). При необходимости, если есть подозрение на существование нескольких независимых периодов, проводится процедура «отбеливания» - последовательное вычитание периодических сигналов и анализирование периодограмм остатков. При этой процедуре зависимые сигналы должны исчезнуть, а независимые – остаться.

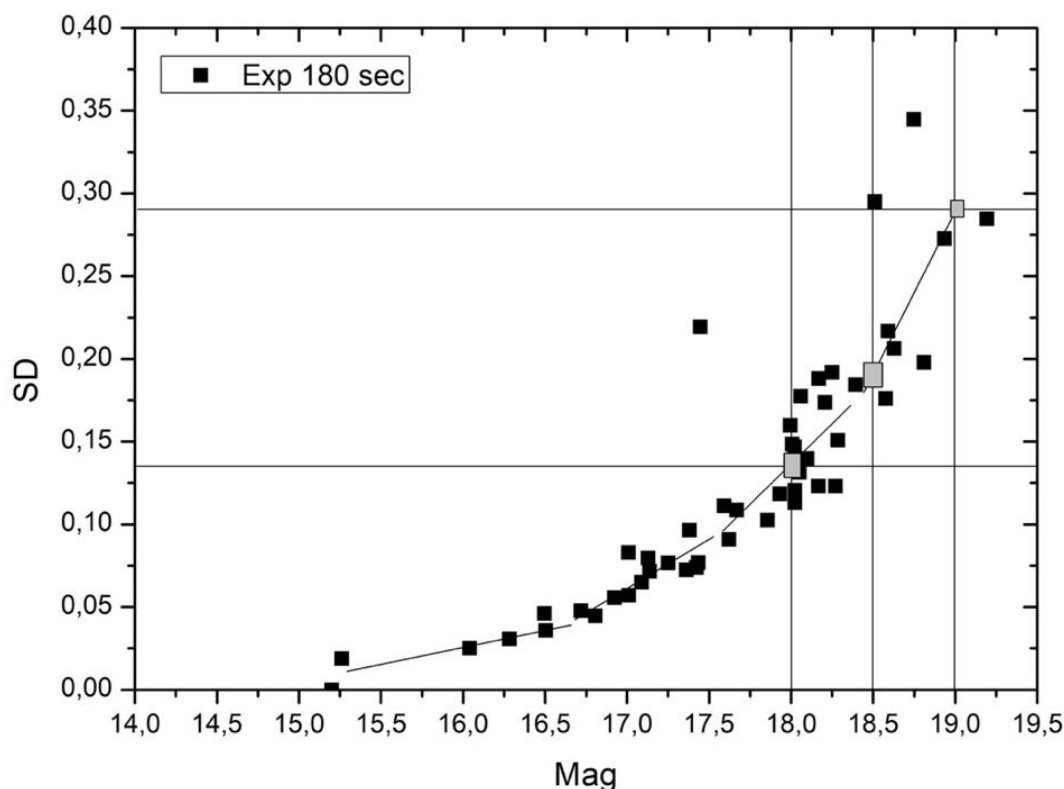


Рисунок 13. Пример зависимости точности единичного измерения блеска от звездной величины для наблюдений в ноябре 2018 г. Телескопе К-380 (в интегральном свете) при экспозиции 180 сек. Горизонтальными линиями отмечен диапазон точности регистрации блеска объектов $18^m - 19^m$.

б) *Анализ O-C экстремумов блеска.* С помощью этого метода исследовалось поведение найденного периодического процесса: является ли он постоянным на изучаемом временном интервале, но требуется уточнить его величину, увеличивается или уменьшается. Здесь «O» - наблюдаемый (Observed) момент экстремума блеска, «C» - вычисленный (Calculated) момент по заранее определённой эфемериде.

с) *Определение избытка/дефицита орбитального периода* для идентификации типа прецессии аккреционного диска (апсидальная или нодальная) и оценки отношения масс компонентов с помощью эмпирических и теоретических соотношений для орбитального периода и периода сверхгорбов.

д) *двухцветные диаграммы* для определения вклада компонентов двойной системы в общее излучение.

Глава 2. Эволюция нерадиальных пульсаций белого карлика у EZ Lyn.

2.1.1 История объекта.

Объект EZ Lyn (SDSS J080434.20+510349.2) впервые был открыт в минимуме блеска Szkody et al. [43] и классифицирован как короткопериодическая (0,059 d) карликовая новая с белым карликом в качестве вторичного компонента. Pavlenko et al. [44] впервые обнаружили объект во время вспышки, более точно – ближе к её окончанию. Наличие сверхгорбов с периодом 0.06 mag, большая амплитуда вспышки и серия из 11 ребрайтенингов (многократных поярчаний) подразумевали, что эта звезда принадлежит подклассу карликовых новых типа WZ Sge [45, 44, 47], а более точно, согласно классификации Като [46], карликовой новой типа WZ Sge с многократными поярчаниями. Поскольку у звезд типа WZ Sge не бывает (за небольшим исключением) нормальных вспышек, то при описании объектов, как правило, ограничиваются словом «вспышка» вместо «сверхвспышка». После вспышки Жариков и соавт. [48] обнаружили серию мини-вспышек с амплитудой около 0,5 mag.

В 2010 году у EZ Lyn была обнаружена очередная вспышка [49]. В отличие от вспышки 2006 года, она содержала только 6 ребрайтенингов, что почти в два раза меньше. Через месяц после её окончания, EZ Lyn оказалась на ~ 1 mag слабее, чем в 2006 году.

По данным наблюдений вспышки 2010 г., средний период сверхгорбов EZ Lyn также составлял 0,060 d, Като и соавт. впервые обнаружили частное затмение во время сверхвспышки 2006 года и определили орбитальный период, равный 0,059005 d [23]. Амантаева и др. [50] оценили массу БК $= 0.85(1) M_{\odot}$, а красного карлика $= 0.042 M_{\odot}$, что определяет систему как «баунсер» - т.е., систему, где вторичный компонент является коричневым карликом.

Через ~ 7 месяцев после вспышки 2006 г. Павленко [51] обнаружила нерадиальные пульсации белого карлика с периодом 12.6 мин. После вспышки 2010 г. система EZ Lyn вновь вошла в полосу неустойчивости. Диссертанту была поставлена задача исследовать эволюцию пульсаций на большом временном интервале – вплоть до их исчезновения, т.е., определить таким образом время пребывания в полосе неустойчивости. Другой задачей было выявить особенности пульсаций во время повторных поярчаний и в их окрестностях с момента вспышки 2006 г.

2.1.2 Наблюдения

Наблюдения EZ Lyn проводились с 2007 по 2021 год ежегодно в КраО на 2.6 м телескопе ЗТШ с ПЗС (Aprogee E47), в отдельные годы (2012-2014) были дополнительно использованы наблюдения, полученные на 2-м телескопе Обсерватории на Терсколе с ПЗС (FLI PL430) и русско-турецком телескопе РТТ150 с ПЗС (TFOSC) – 7 и 1 ночь соответственно (см. Таблицу 2). Данные были получены с использованием метода стандартной апертурной фотометрии, с вычетом темнового сигнала, плоского поля и шумового тока с помощью программы MaXim DL. Большинство наблюдений проводилось без использования светофильтров, либо в фотометрической системе Кузинса Rc. Экспозиция составляла 20-60 секунд в зависимости от погодных условий. Звезда сравнения использована такая же, как и у Zharikov et al. [48]. Стандартная ошибка единичного измерения для наблюдений на ЗТШ и Терсколе составляла 0.005–0.017 mag, на РТТ-150 около 0.025 mag. Перед анализом данных, для каждой ночи наблюдений был вычтен общий долгопериодический тренд методом средневзвешенной полиномиальной регрессии [53]. Для анализа использованы методы фазовой дисперсии [42], ошибки 1σ были рассчитаны по методу [54]; использован метод LASSO, примененный для анализа быстрых изменений периода в течение ночи [49], метод быстрого Фурье-анализа (FFT) [52].

Вероятности ложной тревоги (FAP) были оценены по методу [56]. Сложность анализа потенциальных пульсаций белого карлика у EZ Lyn заключается в том, что они зашумлены орбитальной модуляцией. Оба сигнала могут иметь переменную амплитуду [43, 57] но обычно преобладает орбитальный сигнал. Для корректной постройки периодограмм, орбитальные сигналы были вычтены.

Представленный в диссертации интервал наблюдений EZ Lyn составляет около 10 лет (более 50 ночей), из них диссертантом самостоятельно выполнены наблюдения и обработка данных в течение 45 ночей.

Таблица 2. Журнал наблюдений EZ Lyn в 2012-2022 гг. Буквой А обозначен 2 м. Телескоп на Терсколе, В – 2.6 м. ЗТШ КрАО. Фотометрическая полоса: R – полоса Кузинса R, W – без применения светофильтров.

Дата/телескоп	Начало набл. HJD 2456000+	Конец набл. HJD 2456000+	Кол-во снимков	Эксп. (сек)	Фотом. полоса
22.10.2012/А	2456236.360	2456236.619	242	60	R
23.10.2012/А	2456237.341	2456237.488	181	45	R
13.11.2012/А	2456244.518	2456244.626	120	60	R
14.11.2012/А	2456245.336	2456245.623	415	60	R
15.11.2012/А	2456247.340	2456246.627	304	60	R
16.11.2012/В	2456248.388	2456248.627	202	90	W
17.11.2012/В	2456249.333	2456249.488	246	30	W
18.11.2012/В	2456250.427	2456250.661	716	20	W
13.01.2013/В	2456306.238	2456306.579	579	30	W
14.01.2013/В	2456307.156	2456207.672	1785	20	W
02.05.2013/В	2456385.28	2456385.29	269	15	W
06.11.2013/В	2456603.518	2456603.58	90	30	W
08.01.2014/В	2456697.170	2456697.677	915	45	W
09.09.2013/В	2456545.488	2456545.590	381	20	W

Таблица 2. Продолжение					
31.10.2013/B	2456597.493	2456603.522	314	20	W
27.10.2014/B	2456958.365	2456958.639	556	30	W
28.10.2014/B	2456959.367	2456959.629	581	30	W
29.10.2014/B	2456960.398	2456960.630	698	20	W
30.10.2014/B	2456961.423	2456961.625	654	20	W
24.12.2014/B	2457017.447	2457017.672	515	30	W
25.12.2014/B	2457018.264	2457017.524	568	30	W
28.12.2014/B	2457020.191	2457020.243	70	30	W
13.01.2015/B	2457036.165	2457036.499	820	30	W
14.01.2015/B	2457036.499	2457037.481	1377	30	W
15.20.2015/B	2457072.376	2457072.622	546	30	W
20.02.2015/B	2457073.527	2457074.425	655	20	W
16.03.2015/B	2457098.226	2457098.452	594	20	W
10.04.2015/B	2457123.228	2457123.390	416	20	W
11.04.2015/B	2457124.232	2457124.370	397	20	W
12.04.2015/B	2457125.242	2457125.392	60	60	VR
19.02.2016/B	2457438.405	2457438.630	600	30	W
06.03.2016/B	2457454.319	2457454.616	519	45	W
25.10.2016/B	2457687.349	2457687.633	354	60	W
01.02.2017/B	2457420.226	2457420.373	443	20	W
11.10.2017/B	2458038.511	2458038.628	308	30	W
12.10.2017/B	2458039.519	2458039.635	303	30	W
12.11.2017/B	2458070.467	2458070.629	425	30	W
22.02.2017/B	2457835.212	2457835.355	435	20	W
23.03.2017/B	2457836.208	2457836.333	472	20	W
26.02.2017/B	2457811.234	2457811.645	931	20	W
27.02.2017/B	2457812.269	2457812.597	995	20	W
28.02.2017/B	2457813.309	2457813.594	848	20	W
12.03.2018/B	2458190.295	2458190.357	86	30	W
14.03.2018/B	2458192.260	2458192.356	128	60	W
09.04.2018/B	2458218.233	2458218.346	376	20	W
13.10.2018/B	2458405.482	2458405.618	356	30	W

Таблица 2. Продолжение					
08.04.2019/B	2458582.224	2458582.445	548	20	W
09.04.2019/B	2458583.223	2458583.461	562	30	W
25.10.2019/B	2458782.448	2458782.579	625	15	W
31.03.2019/B	2458574.226	2458574.463	621	30	W
25.01.2020/B	2458874.295	2458874.674	2562	10	W
25.02.2020/B	2458905.395	2458905.625	771	20	W
26.01.2020/B	2458875.270	2458875.419	1000	10	W
26.02.2020/B	2458906.235	2458906.608	1424	15	W
09.03.2021/B	2459283.221	2459283.414	721	20	W
11.03.2021/B	2459285.213	2459285.451	623	30	W

2.2 Долговременная кривая блеска EZ Lyn (2006-2021 гг.)

Несмотря на то, что изначально имелись некоторые основания полагать, что EZ Lyn является звездой типа WZ Sge, и показывает вспышечную активность с циклом в десятки лет [44], вторая зарегистрированная вспышка произошла всего через четыре года после вспышки 2006 года. Общая кривая блеска EZ Lyn с 2006 по 2021 г., включающая две вспышки, показана на Рис. 14. Разброс точек около $JD = 2454150$ объясняется наличием мини-вспышек.

Вспышка 2010 года отличалась от предыдущей, по крайней мере, последовательностью ребрайтингов. Их сравнение приведено на рис 15. Помимо различий в их числе во время первой и второй вспышки, в 2010 году они имеют большую амплитуду. Кроме того, блеск объекта в 2010 стал намного слабее, чем в 2006 году в тот же момент после окончания вспышки.

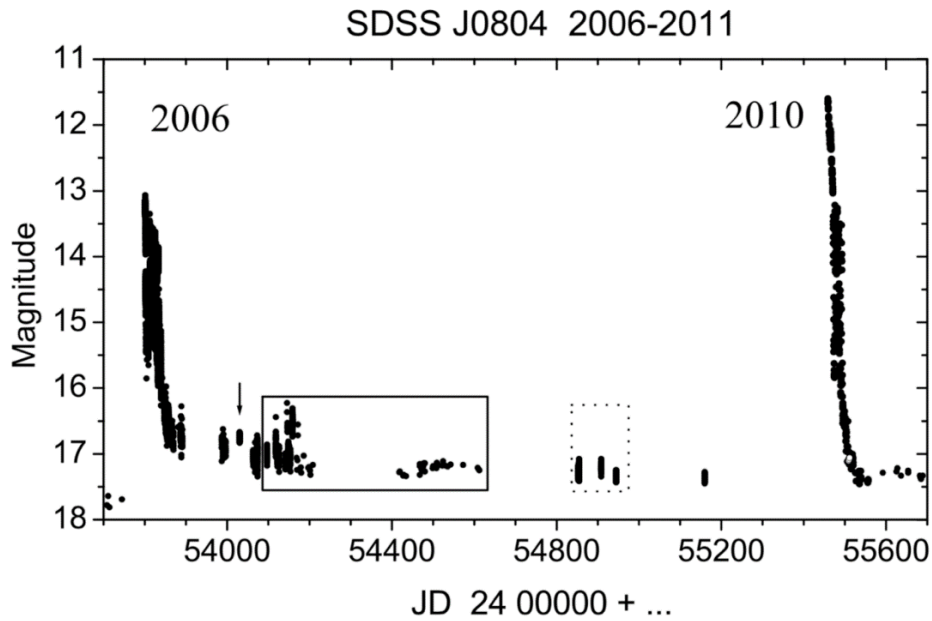


Рисунок 14. Кривая блеска EZ Lyn в 2006–2010 гг. Стрелка указывает на первое обнаружение пульсаций. Прямоугольником обозначен интервал времени, в течение которого наблюдались пульсации. Второй маленький прямоугольник указывает на моменты нестабильного появления наблюдаемых пульсаций.

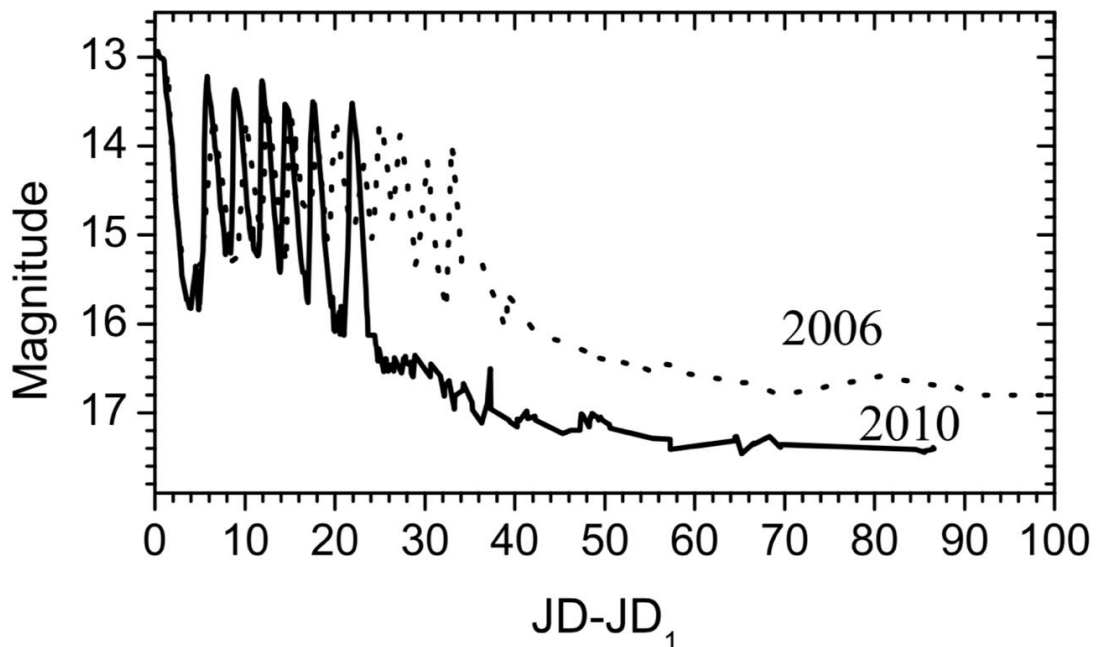


Рисунок 15. Сравнение ребрайтингов после вспышки 2006 г. (пунктирная линия) и 2010 г. (сплошная линия). Нулевая точка оси X начинается с быстрого спада после основного плато. Данные объединены, используя $T_0 = \text{JD } 2453801$ для вспышки 2006 года и $T_0 = \text{JD } 2455470$ для вспышки 2010 года.

В течение 50–60 дней после начала вспышек 2006 и 2010 гг. наиболее мощным сигналом был период сверхгорбов $0,060 d$ с амплитудой $0,15–0,25 m$. [43, 44], в спокойном состоянии регистрировался орбитальный период 0.059004 сут. [23]. Профиль орбитальной кривой блеска до и после вспышки 2010 года аналогичен - двугорбая кривая с частным затмением [23]. Глубина затмения немного уменьшалась от $0,02$ до $0,04$ зв.в. по мере медленного уменьшения яркости объекта. Двугорбый профиль кривой объясняется двух-спиральной структурой аккреционного диска, которую, по мнению Жарикова и др. [48], имеют карликовые новые типа WZ Sge с коричневым карликом – вторичным компонентом.

2.3 Пульсации в мини-вспышках 2007 г. и их окрестностях

Идентификация нерадиальных пульсаций является сложной задачей. Она осложняется тем, что вместе с пульсациями регистрируется и орбитальная модуляция, профиль которой может изменяться со временем [44]. Также может наблюдаться несколько независимых мод пульсаций, комбинации их частот и комбинации частот пульсаций и гармоник орбитального периода. По этой причине мы ограничились анализом только доминирующих пульсаций.

Во время мини-вспышек 2007 г. пульсации продолжали наблюдаться. Однако периодограммы в области частот $10-200 d^{-1}$ во время мини-вспышек 2007 г. и в спокойном состоянии резко различаются (рис. 16).

В течение двух ночей в мини-вспышке (JD 2454117 и 2454118) были обнаружены 12,6-минутные пульсации, но они имеют меньшую значимость, чем наиболее заметная периодичность в 21,7 мин (обозначена как P2 на рис. 3). 21,7-минутный период не связан с гармониками орбитального периода, и, вероятно, это может быть независимой нерадиальной пульсацией белого карлика. Заметим, что в одну из ночей наибольшую значимость имел период P3, происхождение

которого мы не анализируем. Между тем периодограммы после завершения этой мини-вспышки (JD 2454123 и 2454124) показывают самые большие пики, связанные с $P1 = 12,6$ -минутными пульсациями и $2P1$. $21,7$ -минутный пик на периодограмме для данных в спокойном состоянии тонет в шумах.

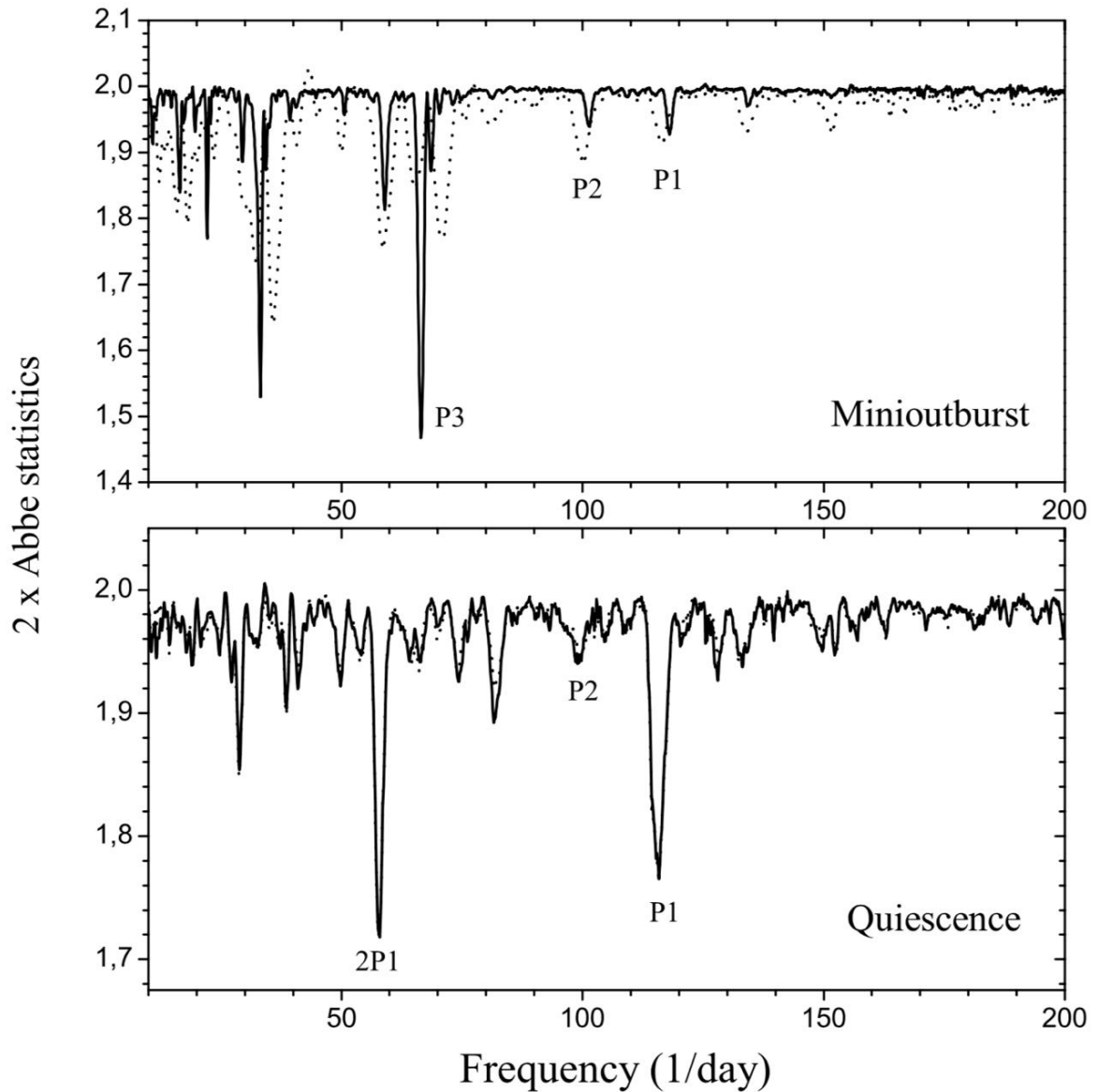


Рисунок 16. Вверху: две периодограммы для данных в мини-вспышке (JD 2454117 и 2454118). Ниже: две периодограммы для данных в спокойном состоянии (JD 2454123 и 2454124). Для каждой пары периодограмм исходные обозначены сплошными и пунктирными линиями. Орбитальный сигнал был вычтен до постройки периодограмм.

Каждую ночь, когда регистрировался 12,6-минутный период, было оценено его текущее значение. Дрейф этого периода в области 732 с - 768 с очевиден. Эта область в 10 раз шире, чем те, которые были найдены [59] для SDSS J161033.64-010223.3. Заметим, что изменения периода, представленные Mukadam [59] относились к шкале времени в 100 раз короче нашей. На Рис. 17 представлены детали дрейфа этого периода.

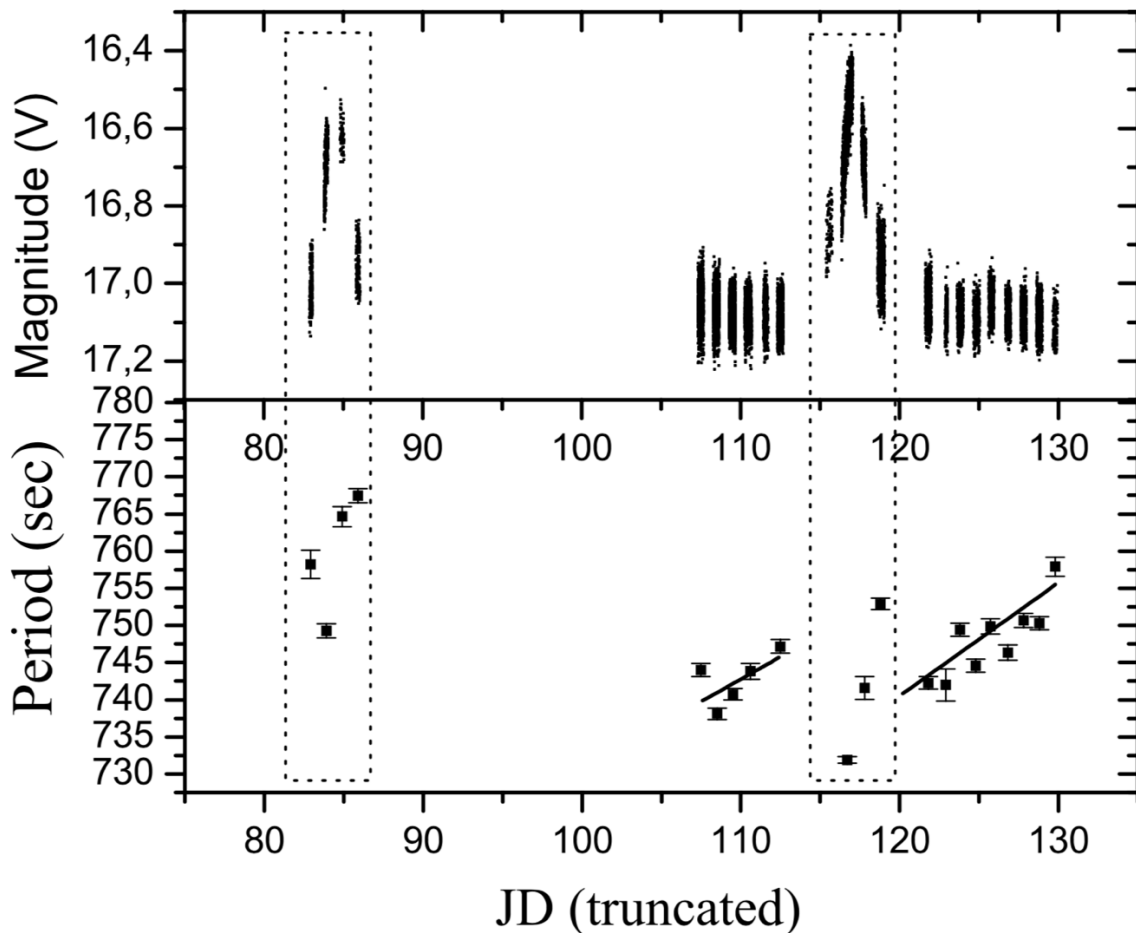


Рисунок 17. Кривая блеска, включающая две мини-вспышки (вверху) и соответствующий дрейф пульсации в 12.6 минут (внизу). Нулевой точкой шкалы времени является JD 2454000.

Видно, что во время самих мини-вспышек наблюдается большой разброс периодов, а после каждой периоды удлиняются. В целом, за 900 дней, 12,6 мин период варьировался в одном и том же диапазоне, независимо от наличия мини-

вспышек. Дрейф этого периода вместе с амплитудой пульсаций показан на Рис. 18. Амплитуды варьировались от 0,013 до 0,030 зв.в. Последние данные JD 600 - 960 показали уменьшение периода вместе с уменьшением амплитуды. Однако не было никакой корреляции между периодами и амплитудами для всех данных.

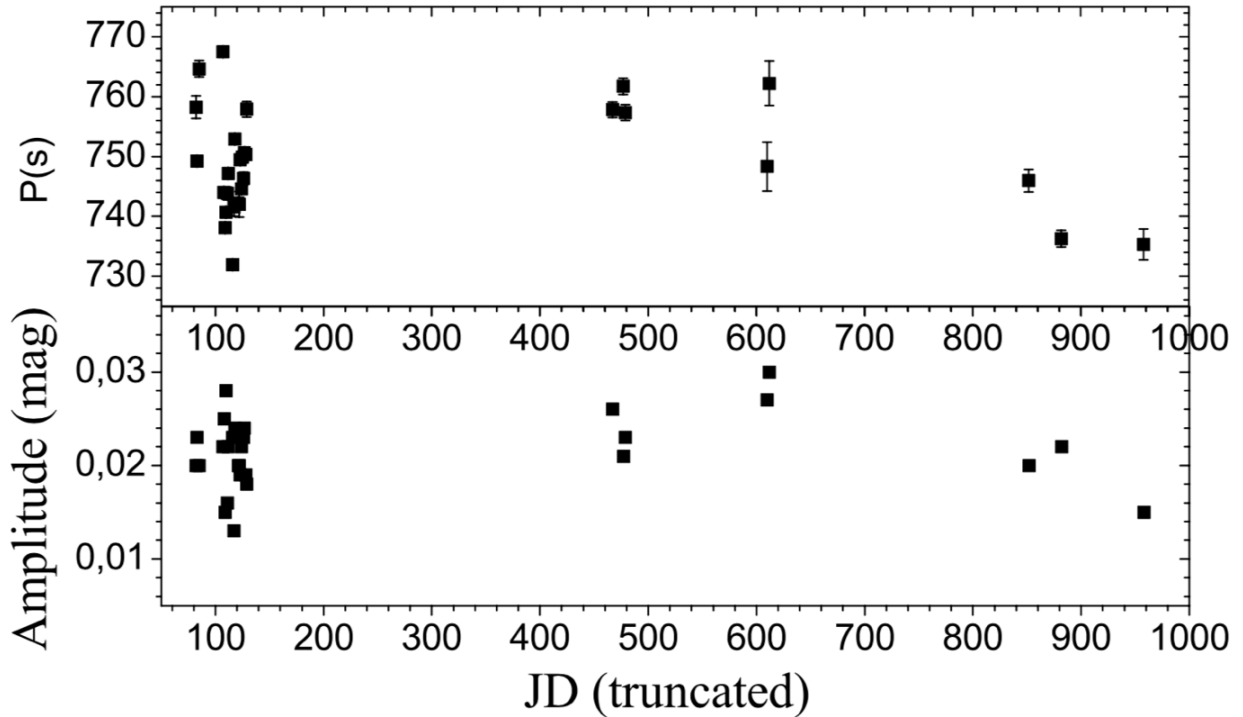


Рисунок 18. Дрейф периодов и амплитуд 12,6-минутных пульсаций SDSS J0804 в течение 900 дней с момента появления пульсаций. Нулевой точкой шкалы времени является JD 245400.

2.4 Второе прохождение полосы нестабильности (2011-2021 гг.)

Спустя ~ 7 мес. после вспышки 2010 г. белый карлик EZ Lyn снова вошёл в полосу нестабильности. Периодограмма, построенная в интервале частот, включающем частоту 114 d^{-1} (12.6 мин.), доминирующую во время первого прохождения EZ Lyn полосы нестабильности, показывает отсутствие этого периода (Рис. 19). В этом интервале частот доминирует вторая гармоника орбитального периода.

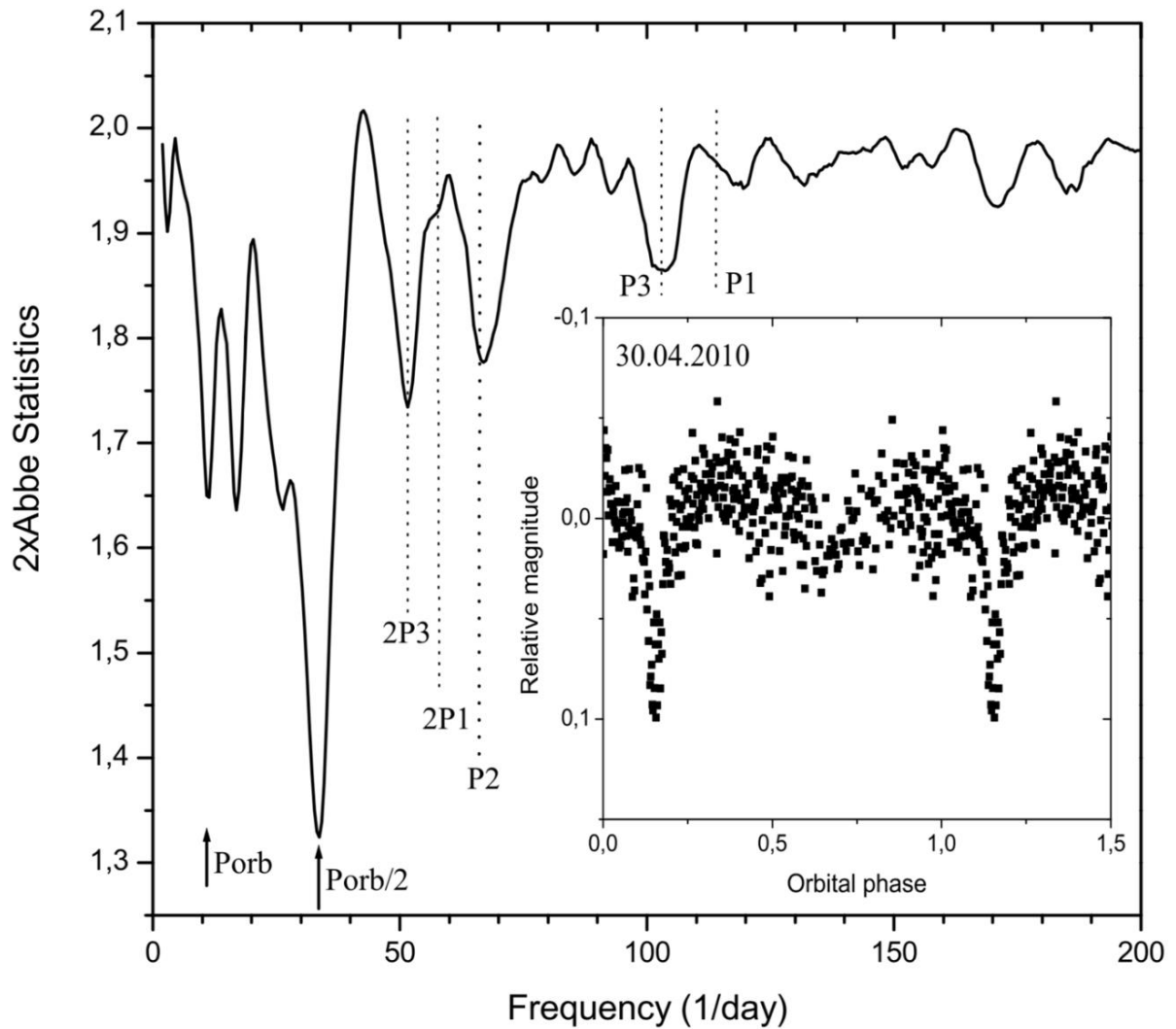


Рисунок 19. Периодограмма для данных в спокойном состоянии (30 апреля 2011 г.). Положение частоты доминирующей пульсации после вспышки 2006 г. обозначена P1. $P1 = 12,6$ мин, $P2 = 21,7$ мин, $P3 = 14,1$ мин. Во врезке дана свёртка с орбитальным периодом.

Напротив, в области коротких периодов обращает на себя внимание пик на 4.28 мин (257 сек). На Рис. 20 показаны периодограммы для данных трех ночей (30 апреля, 5 и 6 сентября 2011 г.), содержащих этот период.

Можно видеть, что частота, соответствующая периоду $P4=4,28$ мин, является наиболее заметной в области частот $5-700 \text{ d}^{-1}$ для всех периодограмм. На 8,56 мин ($2P4$) также имеется менее значимый пик. Заметна также группа наименее

значимых пиков вблизи долгопериодического края периодограмм, группирующихся вокруг частоты, соответствующей периоду $P_3=14.26$ мин.

В том же году через несколько месяцев после нашей регистрации периода, наблюдения EZ Луны были проведены космическим телескопом Хаббл, который зарегистрировал пульсации в ультрафиолетовом диапазоне с периодом 256 сек [60]. Этот период с точностью до секунды совпадает с нашим определением.

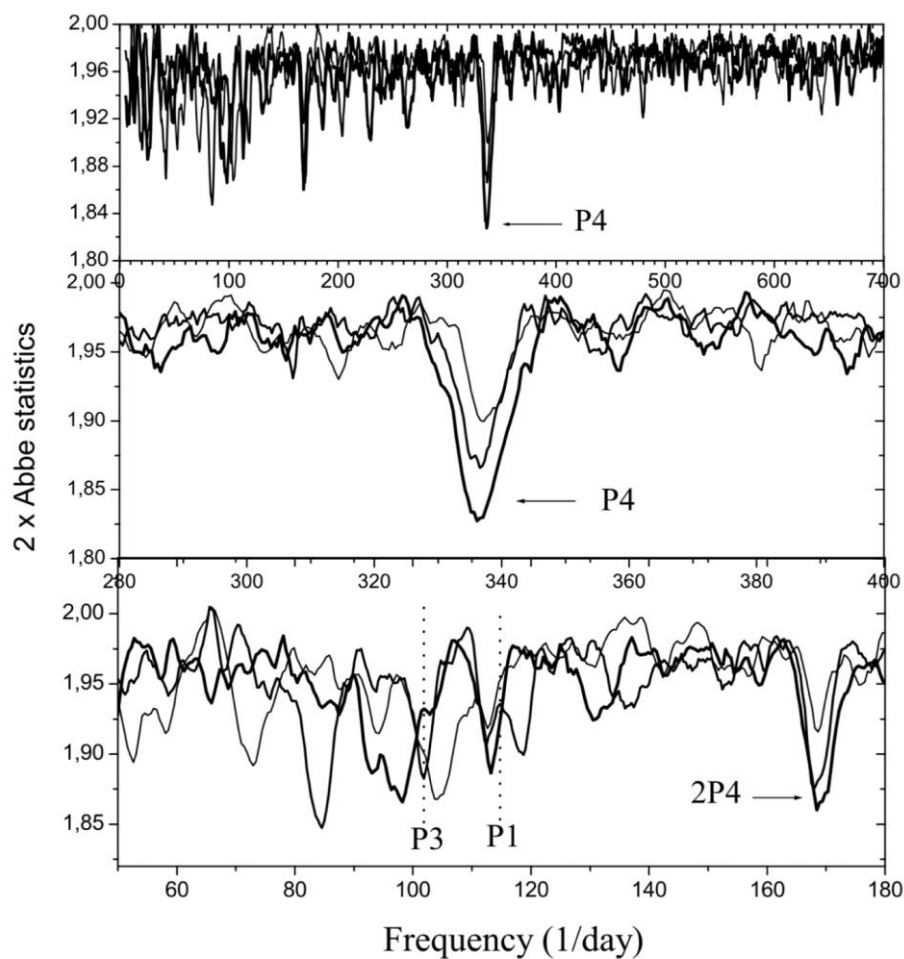


Рисунок 20. Вверху: периодограммы для данных 30 апреля (тонкая линия), 5 сентября (жирная линия) и 6 сентября (самая толстая линия) в области частот 5–700 d^{-1} . Середина: центральная часть периодограмм. Внизу: периодограммы в области долгопериодического края. Положение периодов P_2 и P_3 показано пунктирными линиями. Орбитальный сигнал был удален до создания периодограмм.

2.5. Сезон наблюдений 2012 -2014 гг.

Наблюдения EZ Lyn были продолжены в 2012 году, и охватили более 565 дней (2–3,5 года после вспышки 2010 г.) Пример периодограммы и средняя орбитальная кривая блеска по данным 14 января 2013 г. представлены на Рис. 21. Сильная вторая гармоника орбитального сигнала обусловлена двугорбым профилем кривой. Ее средняя амплитуда составляет $0^m,08$, отчетливо видно частное затмение на фазе 0,7. В эту ночь кривая блеска показывает два горба неравной высоты, горб с меньшей амплитудой, предшествующий затмению, имеет небольшую депрессию. Это «расщепление» одного или обоих горбов иногда может быть более заметным, периодограммы EZ Lyn часто показывают пик на $1/4$ орбитального периода [57, 47]. Для данных каждой ночи была вычтена орбитальная модуляция и рассчитаны спектры мощности. Результат представлен на Рис. 22.

Все периодограммы содержат указания на периодические сигналы как в области низких, так и высоких частот. Сигнал в районе частоты 100 d^{-1} (864 с.) уверенно виден каждую ночь (исключение составляет BJD 2456237, когда значимость этого сигнала была значительно ниже, чем в другие ночи). Сигнал около $1/4$ орбитального периода виден в течение всех ночей. Сигнал на 756 с. который был доминирующей пульсацией после вспышки 2006 г., регистрируется только в BJD 2456306, 2456307 и 2456697. Между тем, поведение на более высоких частотах - более сложное и требует детального анализа.

Первый спектр мощности на этом рисунке соответствует наблюдениям, полученным через ~ 2 года после вспышки в 2010 г. (BJD 2456236). 256-секундная пульсация, обнаруженная Павленко и соавт. [61] через семь месяцев и Шкоди и соавт. [60] через двенадцать месяцев после вспышки 2010 г., является заметной и доминирующей в высокочастотной части периодограммы. Но в следующую ночь спектр заметно изменился. 256-секундная пульсация исчезла (или, по крайней

мере, ее амплитуда упала за предел обнаружения). Вместо нее появились частоты на 279 и 235 секундах.

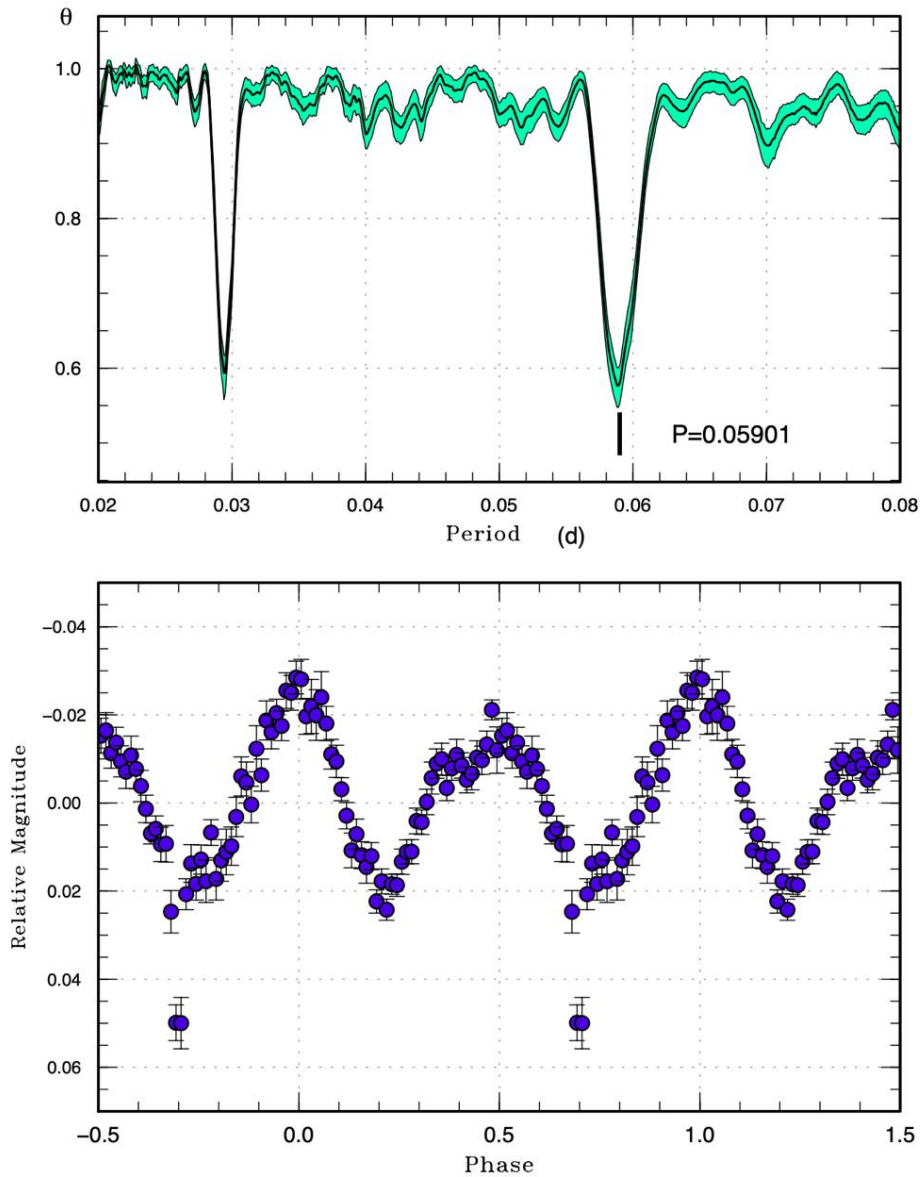


Рисунок 21. Вверху – периодограмма по данным 14 января 2013 г. (BJD 2456307). Внизу – свертка с орбитальным периодом 0.0590048 d.

Через неделю (начиная с BJD 2456244) был обнаружен сильный 235-секундный сигнал. Он оставался доминирующим, по крайней мере, в течение следующей недели (BJD 2456244–2456250). В то же время, начиная с BJD 2456248, частота 279 с стала более заметной, а ее амплитуда росла до BJD

2456248. Вновь этот сигнал упал практически до уровня шума в BJD 2456306 и восстановился на BJD 2456307. С этой даты 279 с. сигнал регистрировался как доминирующий в высокочастотной области периодограммы. Сигнал на 256 с был обнаружен вблизи 0,1% FAR только в даты BJD 2456245 и BJD 2456250. Можно предположить, что все пульсации на частотах 100 d^{-1} , 310 d^{-1} , 338 d^{-1} , 368 d^{-1} (соответствующие периоды 864 с, 279 с, 256 с и 235 с) могли быть независимыми модами. Однако, стоит отметить возможную комбинация частот 100 d^{-1} (F100), 368 d^{-1} (F368) и гармоники орбитального периода, так что эту интерпретацию тоже нельзя исключать.

Аналогичная проблема была с идентификацией нескольких пульсаций у V386 Ser - Вудт и соавт. [62] идентифицировали некоторые пульсации как независимые, Мукадам и соавт. [59] утверждали, что это могло быть вызвано линейной комбинацией орбитальной частоты и частоты других известных пульсаций.

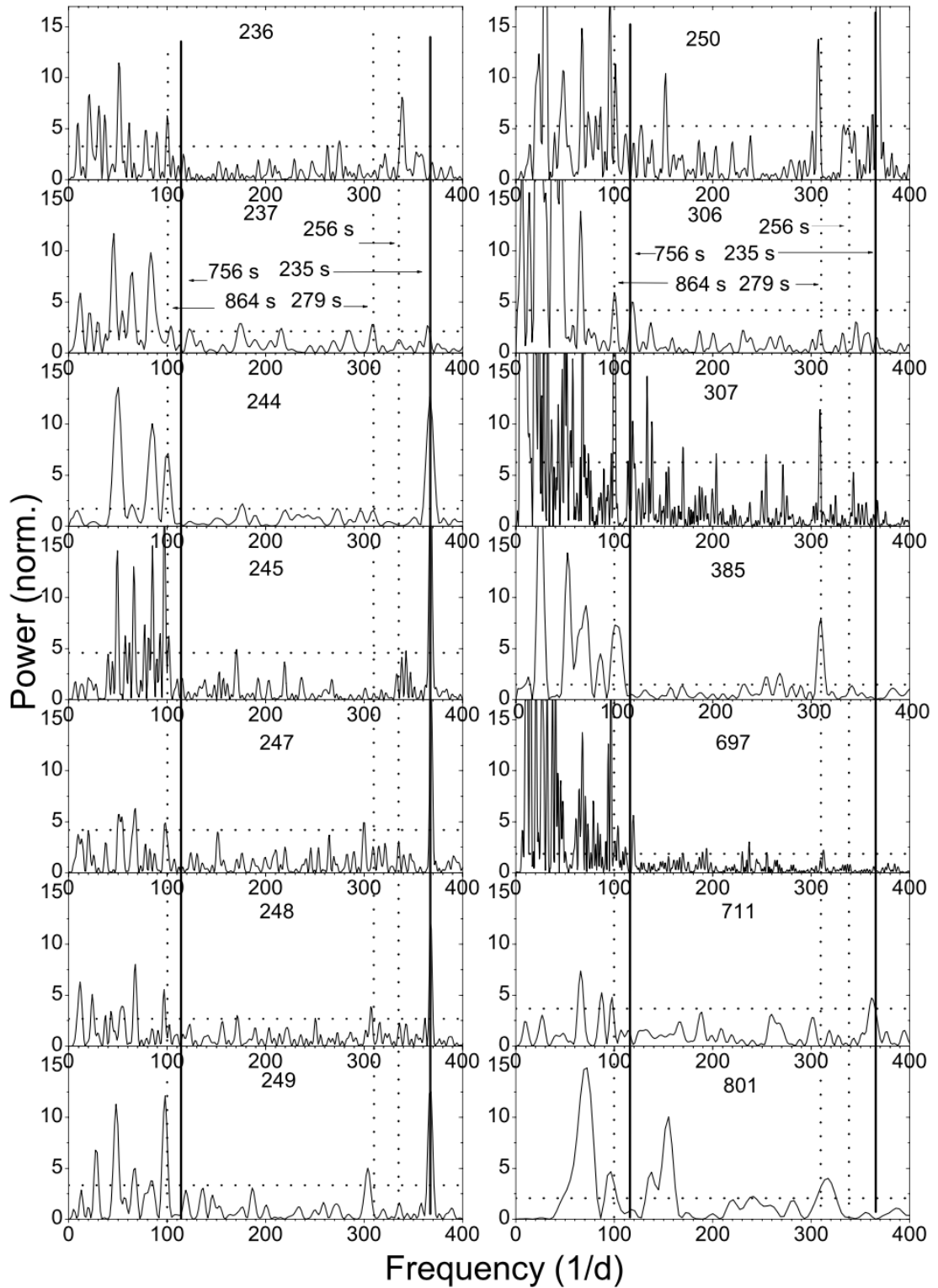


Рисунок 22. Периодограммы за период наблюдений 2012-2014. Номер на каждой периодограмме означает последние три цифры даты (JD). Доминирующие пульсации 864 с. и 235 с. показаны жирной линией, а 756 с., 279 с. и 256 с. – пунктирной. Горизонтальной линией отмечен уровень FAR.

2.5 Быстрые изменения периода и амплитуды пульсаций

Для каждой из 14 ночей, отдельно в области частот около 100 d^{-1} и $275\text{--}400 \text{ d}^{-1}$ были построены двумерные периодограммы методом Lasso [49].

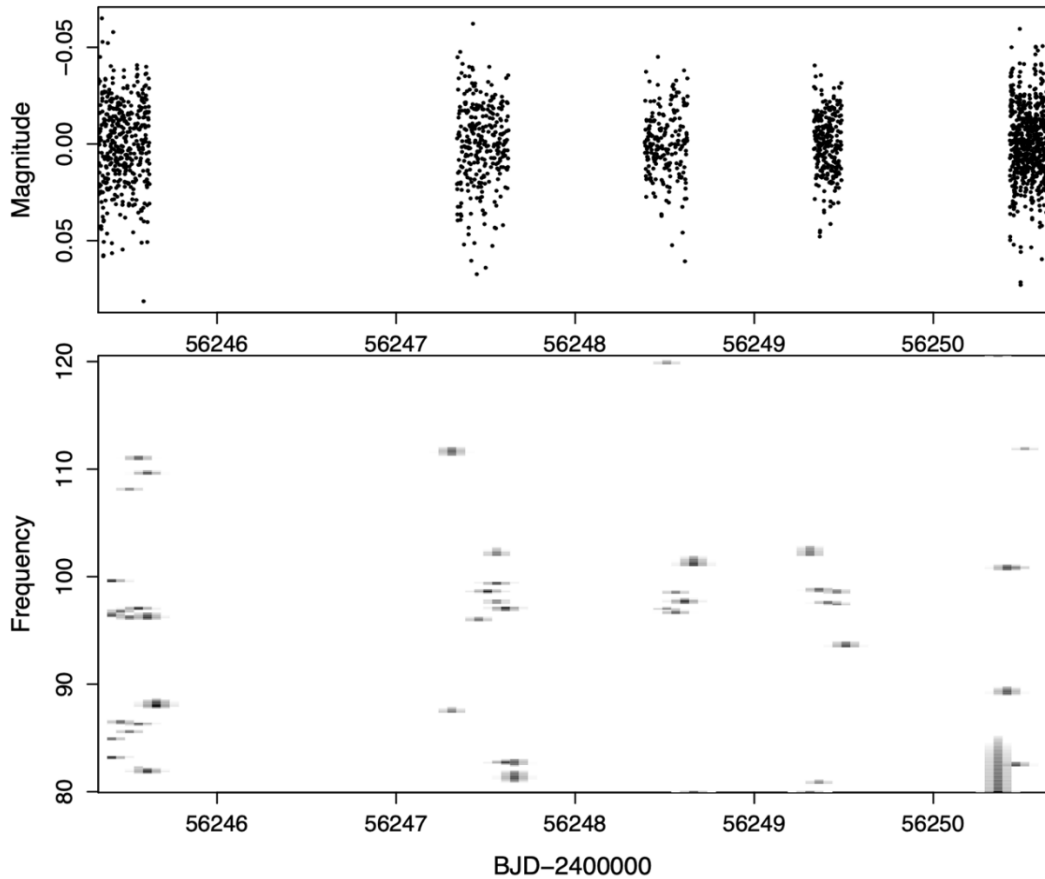


Рисунок. 23. Вверху: Кривая блеска для даты BJD B2456244–2456250. Внизу: Lasso-анализ ($\log \lambda = 2.5$) [49]. Ширина скользящего окна и временного шага использованы 0.15 d и 0.05 d , соответственно.

На рис. 23 показаны периодограммы для пяти близко расположенных ночей в ноябре 2012 г. Создается впечатление, что частоты демонстрируют дрейф как от ночи к ночи, так и в течение ночи. Более подробно поведение этой частоты показано для самого длинного ряда BJD 2456307 (рис. 24). Эта частота демонстрирует плавный квазипериодический дрейф в пределах $98\text{--}100 \text{ d}^{-1}$ (или в пределах $\sim 17 \text{ c}$) с типичным временем ~ 4 часа.

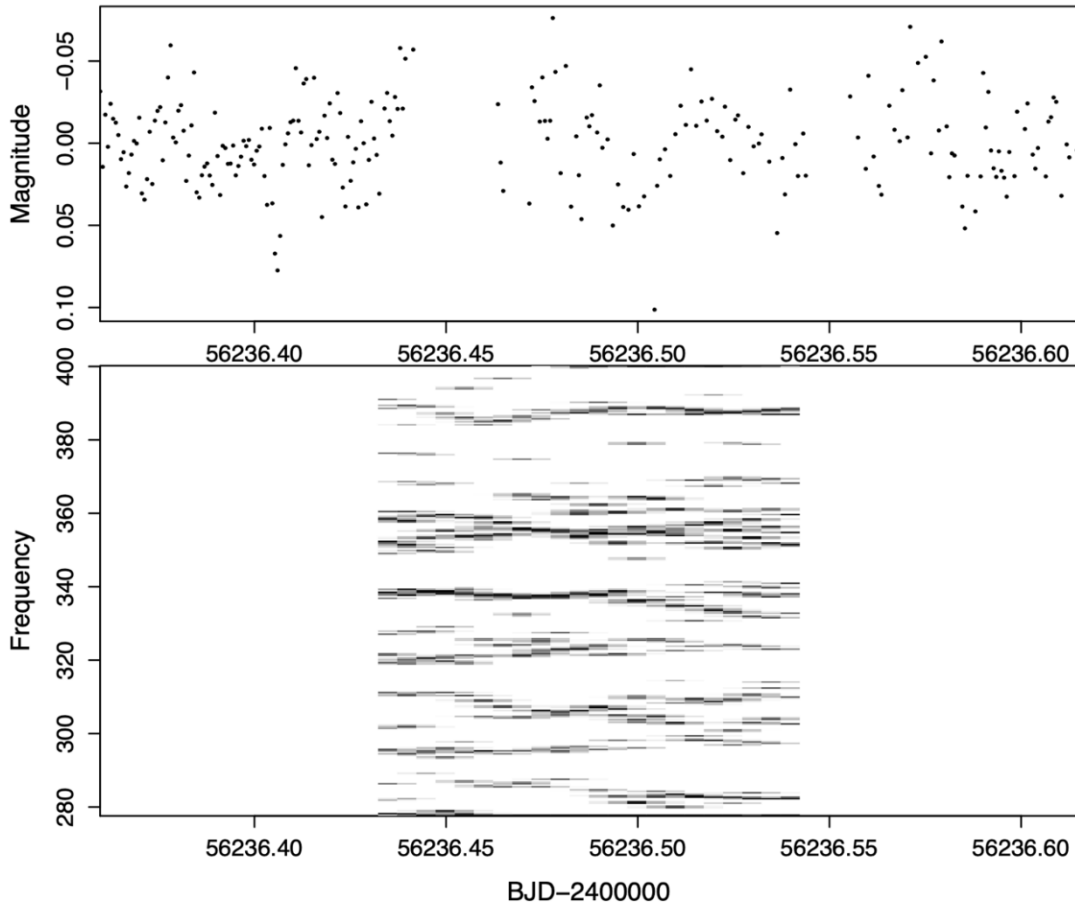


Рисунок 24. Вверху: Кривая блеска для даты JJD 2456236. Внизу: Lasso – анализ [49] ($\log \lambda = -2.8$). Ширина скользящего окна и временного шага использованы 0.15 d и 0.005 d, соответственно.

Для изучения периодов в области высоких частот были отобраны даты наблюдений с наиболее длинными временными рядами (6–12 часов) - JJD 2456236, 2456245, 2456247, 2456248, 2456250, 2456307, 2456697. После рассмотрения двухмерных спектров мощности стало видно, что они дают информацию о поведении периодов в течение нескольких часов. Во-первых, есть указание на одновременное сосуществование всех трех периодов около 279 с, 256 с и 235 с (соответствующие частоты 310 d^{-1} , 338 d^{-1} и 368 d^{-1}) для большинства ночей. Во-вторых, доминирование (и амплитуда) этих периодов могла меняться в течение нескольких часов за счет несинхронного увеличения или уменьшения их амплитуд и некоторого дрейфа периода.

Данные по BJD 2456236 показывают, что амплитуда сигнала на доминирующей частоте около 338 d^{-1} была выше в течение первых нескольких часов. Нет четкого указания на сигнал на частоте 368 d^{-1} , но есть некоторое указание на слабый сигнал на частоте 310 d^{-1} с переменной амплитудой и фазой. Сигнал на доминирующей частоте около 368 d^{-1} выглядит стабильным по амплитуде и периоду на BJD 2456245. Есть более слабый, но отчетливый сигнал на частоте 338 d^{-1} , более сильный в первые часы наблюдения. Частота этого сигнала несколько уменьшается со временем. Сигнал на частоте около 368 d^{-1} для BJD 2456247, 2456248 и 2456250 остается доминирующим. Сигнал на частоте 338 d^{-1} довольно нестабилен на BJD 2456247 и BJD 2456248, но отчетливо заметен на BJD 2456250. Частота 310 d^{-1} отчетливо видна все эти ночи.

Самый длинный 12-часовой ряд данных (BJD 2456307) выявил сигнал с частотой 310 d^{-1} переменной амплитуды с почти постоянным периодом, который дает доминирующий пик на периодограмме. Наиболее необычным является поведение мощного сигнала, который квазипериодически изменяется в диапазоне частот $340\text{--}352 \text{ d}^{-1}$ (это изменение соответствует периоду 245 - 254 сек.) на типичном временном масштабе ~ 7 часов, что приводит к «размытому» пику на периодограмме. Можно предположить, что этот сигнал связан с сигналами на частоте 338 d^{-1} .

Двумерный спектр мощности на BJD 2456697 показывает только сигнал на частоте 310 d^{-1} с сильно меняющейся амплитудой и возрастающей частотой от ~ 305 до $\sim 325 \text{ d}^{-1}$, что соответствует 17,5 с. дрейфу периода на шкале ~ 5 часов.

Наши знания о быстром изменении периода и амплитуды пульсаций до данного исследования были весьма ограничены. Утхас и соавт. [64] сообщили, что пульсации аккрецирующих белых карликов BW Scl и SDSS J145758.21+514807.9 меняют частоту на несколько процентов в течение нескольких недель или меньше;

Нами выявлено одновременное существование всех трех частот (310 d^{-1} , 338 d^{-1} и 368 d^{-1}) для большинства ночей наблюдений, но с переменными амплитудами и дрейфом частот на 2–6 процентов на временной шкале 5-7 часов.

2.6. Сезон наблюдений 2015-2022 гг.

Сосновский и соавт. [65] показали, что пульсации после вспышки 2010 года с частотой 338 d^{-1} [51], подтвержденные также наблюдениями в ультрафиолетовом диапазоне [60], в последующие годы исчезли, и были заменены на 310 d^{-1} . А по еще более новым данным (2015–2016 гг.) было показано, что и эта пульсация (310 d^{-1}) больше не является доминирующей. Основной сигнал, как лучше всего видно на периодограммах, построенных для самой длинной серии наблюдений, составляет $300\text{--}302 \text{ d}^{-1}$. Тем не менее, в течение нескольких ночей была зарегистрирована частота $307\text{--}310 \text{ d}^{-1}$, но с меньшей значимостью.

Периодограммы для наиболее длинных рядов наблюдений 2015-2021 гг. приведены на Рис. 25.

Периодограммы за первые пять лет после вспышки указывают на наиболее значительные пульсации с коротким периодом $\sim 234\text{--}235$ сек. и амплитудами 0,02-0,04 зв.в., а за последние пять лет (и по настоящее время) - на пульсации с относительно длинными периодами 1500-1680 сек. и такими же амплитудами. Отметим, что это удвоенное значение периода пульсации, доминировавшего после вспышки 2006 г. в течение ~ 2.5 лет.

На периодограммах можно заметить не только некоторый дрейф периода пульсаций, но и быстрое их исчезновение и быстрое восстановление (пульсации, исчезнувшие 24 декабря, восстановились в течение суток 25 декабря).

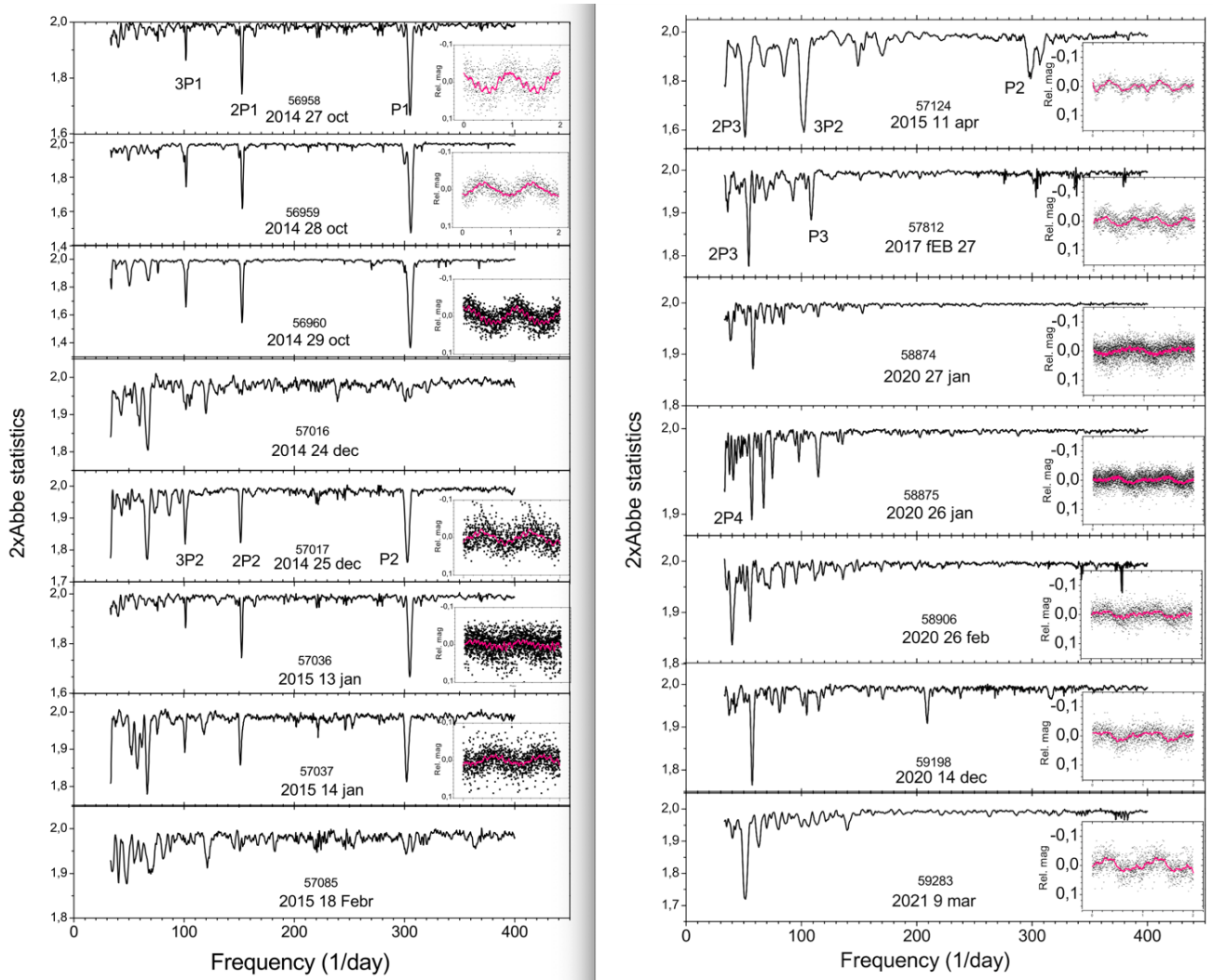


Рисунок 25. Периодограммы для наиболее длинных ночей наблюдений (2015-2021) в хронологическом порядке. Свертки с наиболее значимым периодом приведены справа.

Таким образом, 10-летний мониторинг нерадиальных пульсаций белого карлика у EZ Lyn показал, что белый карлик продолжает пульсировать, а значит, находится в полосе нестабильности не менее 10 лет и продолжает остывать. Если руководствоваться предположением, что эмпирическая зависимость «период пульсаций – эффективная температура белого карлика» для изолированных белых карликов справедлива и для аккрецирующих белых карликов, то можно предположить возможные температуры: $T \sim 12000\text{K}$ для $P=234$ сек и $T \sim 11400\text{K}$ для $P=756$ сек. Заметим, что если период $\sim 1500-1680$ с. соответствует

действительности, а 756 сек. является его второй гармоникой, то температура белого карлика должна быть < 10800 К, где зависимость «температура-период» не определена. Поэтому мы считаем более достоверным период пульсаций равным 756 сек. Соответствующая оценка температуры согласуется с независимыми оценками по спектральному моделированию [50].

Фотометрический мониторинг не выявил плавного увеличения периода пульсаций (а значит, и плавного снижения температуры БК), чего следовало бы ожидать в соответствии с теоретическими предсказаниями для одиночных белых карликов. Точно такое же «немонотонное» охлаждение белого карлика после вспышки, а также смена режимов пульсации были обнаружены у GW Lib [40].

Необходимо продолжить мониторинг пульсаций EZ Lyn вплоть до их полного исчезновения, чтобы определить полосу неустойчивости аккрецирующих пульсаторов и шкалу времени остывания белых карликов в системах карликовых новых после вспышки.

2.7 Обсуждение

В 2006-2010 гг. EZ Lyn претерпела две вспышки. Во время самих вспышек наблюдались только положительные сверхгорбы, а нерадиальные пульсации были замечены только через 7-8 месяцев после вспышки 2006 г. в спокойном состоянии (включая мини-вспышки) и через 6-7 месяцев после вспышки 2010 г. Это означает, что температура белого карлика во вспышках была выше «голубого» края полосы неустойчивости, а в мини-вспышках существенного нагрева белого карлика не происходило. В течение первого прохождения EZ Lyn полосы неустойчивости после вспышки 2006 г., доминирующим был период 12.6 мин (756 сек) и/или его удвоенная величина. Второе прохождение полосы неустойчивости после вспышки 2010 г. началось с обнаружения более короткого периода пульсаций 4.28 мин. (257 сек). Этот период был подтверждён наблюдениями,

проведёнными несколькими месяцами позже в ультрафиолете обсерваторией Кеплер [60]. В течение последующих 10 лет период доминирующей пульсации вырос с 257 сек до 864 сек., однако это увеличение происходило во времени не равномерно, а скачкообразно. Такое поведение предполагает, что или белый карлик остывает неравномерно, или период пульсации не может быть надёжным температурным маркером полосы неустойчивости для аккрецирующих белых карликов.

На Рис. 26 приведено поведение доминирующих пульсаций (по нашим данным) в течение 10 лет во время второго пребывания EZ Lyn в полосе неустойчивости.

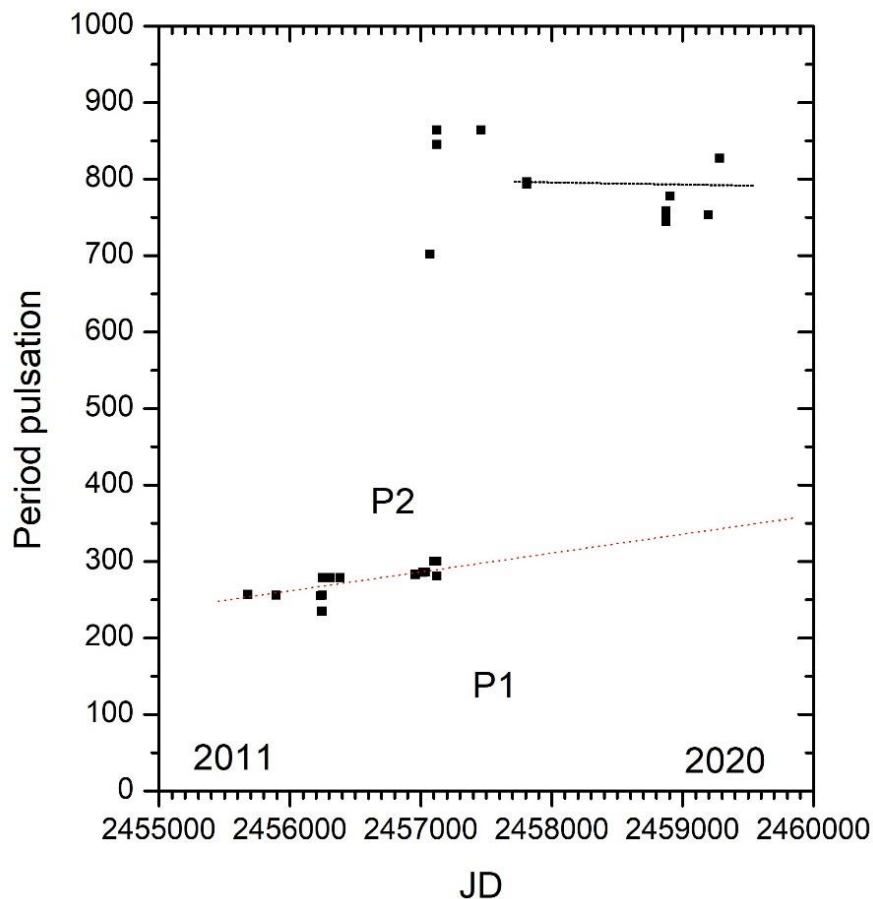


Рисунок 26. Периоды нерадиальных пульсаций белого карлика EZ Lyn в 2011 – 2021 гг.

Подобное неравномерное увеличение периода пульсаций в процессе остывания белого карлика после вспышки наблюдалось у GW Lib [66]. Это одно из основных отличий поведения пульсаций одиночных белых карликов от аккрецирующих в тесных двойных системах, однако обнаружение его требует длительного мониторинга.

На Рис. 27 приведены оценки температуры белого карлика в зависимости от времени, выполненные как по спектральным наблюдениям [50], так и по нашим – фотометрическим. Видно, что эти оценки находятся в хорошем согласии друг с другом. Таким образом, за 10 лет после вспышки БК EZ Lyn всё ещё не вышел из полосы нестабильности, хотя прошёл бóльшую её часть.

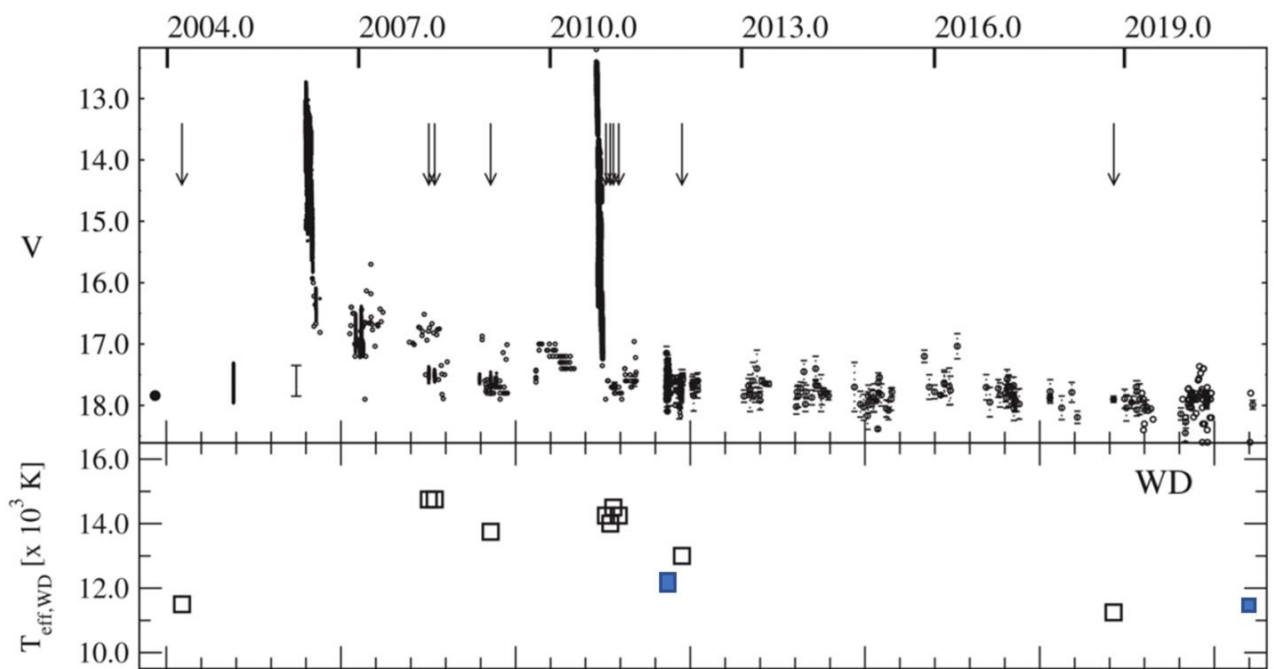


Рисунок 27. Вверху: долговременная кривая блеска, включающая вспышки 2006 г. и 2010 г., мини-вспышки 2011 г. и спокойное состояние. Внизу: эффективная температура белого карлика, определённая из спектральных наблюдений (открытые квадраты) и наших фотометрических наблюдений (закрытые квадраты) в предположении, что эмпирическая зависимость «период

пульсаций – эффективная температура белого карлика» для изолированных белых карликов справедлива и для аккрецирующих белых карликов.

2.8 Выводы к главе 2

1. Представлены **наблюдения** карликовой новой типа WZ Sge EZ Lyn, содержащей пульсирующий белый карлик, в **течение 57 ночей**, проведённые с 2007 по 2021 гг.

2. **Определены доминирующие пульсации в мини-вспышках и их окрестностях** в 2007 г. Пульсации показывали дрейф на различных временных шкалах. Показано, что за 10 лет **период пульсаций увеличивался от 257 сек. до 756 сек.** и это увеличение происходило **неравномерно**.

3. Показано, что **увеличение периода** (согласно эмпирическому соотношению «Период-температура» для изолированных БК) **соответствует уменьшению температуры** белого карлика от $\sim 12\,000$ К до $\sim 11\,400$ К за 10 лет после вспышки 2010 г., и хорошо согласуется со спектральными оценками. В отдельные ночи зарегистрирован дрейф пульсаций **~ 17 сек.** на шкале около пяти часов.

Результаты, приведённые в главе, опубликованы в статьях:

Sosnovskij, A., Antonyuk, O., Pavlenko, E. EZ Lyn: 5 Years of ``Quiescence''. // Astronomical Society of the Pacific, p.205, 2017.

Sosnovskij, A., Pavlenko, E. EZ Lyn: White Dwarf fast cooling after 2010 outburst. // ASTRONOMY AT THE EPOCH OF MULTIMESSENGER STUDIES Proceedings of the VAK-2021 conference, Aug 23–28, 200, 2021.

Amantayeva, A., Zharikov, S., ... , **Sosnovskij, A.** et al. *Period Bouncer Cataclysmic Variable EZ Lyn in Quiescence.* // The Astrophysical Journal, Volume 918, Issue 2, id.58, 16 pp., 2021.

Pavlenko, E. ; Kato, T. ; **Sosnovskij, A.** et al. *Dwarf nova EZ Lyncis second visit to instability strip.* // Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, Issue 6, id.113 11 pp., 2014.

Pavlenko, E.; Malanushenko, V.; Tovmassian, G.; Zharikov, S.; Kato, T.; Katysheva, N.; Andreev, M.; Baklanov, A.; Antonyuk, K.; Pit, N.; **Sosnovskij, A.**; Shugarov, S. *SDSS J080434.20 +510349.2: cataclysmic variable witnessing the instability strip?* // Memorie della Societa Astronomica Italiana, Volume 83, p.520, 2012.

Личным вкладом диссертанта в данную главу является:

Получение и обработка 45 ночей наблюдений данного объекта на 2.6 м телескопе ЗТШ. Участие в постановке задачи. Проведение частотного анализа с использованием методов, описанных в Главе 1. Анализ данных, представление, интерпретация и обсуждение полученных результатов, написание статей в которых автор является первым автором.

Глава 3. Затменная карликовая новая типа SU UMa 1RXS J003828.7+250920 в «пробеле периодов».

3.1 Введение.

Звезда была открыта К. Итагаки в ноябре 2007 года, во время вспышки. Он отметил ее переменность в пределах 14.6 – 18.6 зв.в. Следующее сообщение о том, что объект находится во вспышке (около 14.6 зв. в), было получено от Муллаэрта 21 октября 2010 году [67]. 22 октября 2010 в сети VSNet Таичи Като разместил информацию о вспышке 1RXS J003828.7 +250920 с призывом присоединиться к наблюдениям. 27 октября Ошима из Киотской обсерватории, объявил, что звезда все еще находится на стадии вспышки. По обзорным наблюдениям они отметили переменность в пределах 0.2 зв.в. 28 октября Йохан Питц присоединился к наблюдениям и вскоре опубликовал результаты наблюдений, в которых указал на наличие четких сверхгорбов (0.3 зв.в.) [10, 86] и на предполагаемый период, равный 0.0985(6) дней, который попадает в «пробел периодов». Однако окончательным доказательством этому было бы определение орбитального периода. Поэтому мы поставили задачу поиска орбитального периода (и других возможных периодичностей) по наблюдениям в спокойном состоянии.

3.2. Наблюдения 2010-2012 гг.

Наблюдения объекта проводились в КрАО как во время сверхвспышки 2010 г., так и в спокойном состоянии (включая нормальную вспышку) в 2011-2012 гг. Для проведения наблюдений в 2010г. был задействован 38-см телескоп К-380 НИИ КрАО. Наблюдения, ввиду низкой светимости, проводились без применения светофильтров.

В 2011-2012 годах исследования объекта проводились на нескольких телескопах: 2.6-м телескопе ЗТШ Крымской астрофизической обсерватории с

ПЗС-камерой FLI 1001E, 1-м телескопе Специальной астрономической обсерватории с ПЗС камерой EEV CCD 42-40, 60-см телескопе Крымской обсерватории МГУ (ПЗС-камера AP-47p) и 28-см телескопе университета Нотр Дам (США). Данные наблюдений приведены в Таблице 3.

Пример зависимости точности единичного измерения блеска от звездной величины в полосах BVRC для одной из ночей наблюдений на ЗТШ, приведен в Главе 1, а конкретные величины – в последнем столбце Табл. 3.

Таблица 3. Журнал наблюдений 1RXS J0038 в 2010-2012 гг.

Дата/телескоп	Начало набл. HJD 2400000+	Конец набл. HJD 2400000+	Кол-во снимков	Эксп. (сек.)	Фотом. полоса	Точность (зв.в. вел.)
28.10.2010/0.38	18:53:15	21:10:14	45	180	Без ф.	0.05-0.07
29.10.2010/0.38	16:27:17	23:18:34	100	180	Без ф.	0.05-0.07
25.08.11/2.6м	55799.42	55799.57	233	60	Без ф.	0.04-0.06
01.09.11/2.6м	55806.49	55806.73	148	180	V	0.02-0.05
			147		Rc	0.02-0.03
02.09.11/2.6м	55807.31	55807.48	145	30	B	0.08-0.12
			148		V	0.06-0.11
			146		Rc	0.03-0.07
03.09.11/2.6м	55808.35	55808.56	154	30	B	0.06-0.09
			168		V	0.06-0.12
			159		Rc	0.03-0.06
04.09.11/2.6м	55809.33	55809.60	189	30	B	0.05-0.13
			195		V	0.03-0.11
			189		Rc	0.03-0.07
05.09.11/2.6м	55810.36	55810.47	100	30	B	0.04-0.09
			101		V	0.06-0.09
			100		Rc	0.02-0.06
10.10.12/28см	56211.69	56211.87	381	30	Без ф.	0.02
13.11.12/600см	56245.28	56245.38	67	160	Rc	0.03

Таблица 3. Продолжение						
14.11.12/1000см	56246.34	56246.39	19	160	Rc	0.03
16.10.12/1000см	56248.33	56248.41	35	180	Rc	0.03
29.10.12/600см	56261.21	56261.34	119	90	Rc	0.05

Таблица 4. Характеристики звезды сравнения и контрольных звезд в окрестности 1RXS J0038.

Обозначение	№ по USNO A2.0	B	Sigma	V	Sigma	Rc	Sigma
Ref. Star	1125-00234536	17,59	0.02	16,75	0.02	16,27	0.01
R2	1125-00233915	16,91	0.02	16,109	0.02	15,63	0.01
R3	1125-00234481	16,66	0.02	15,68	0.01	15,14	0.01
R4	1125-00234022	18,28	0.03	17,45	0.01	17,01	0.01

На Рис. 28 представлена поисковая карта с указанием переменной звезды, звезды сравнения, ряда контрольных звезд, масштаба и направления на север. Звездные величины звезды сравнения ($B = 17^m.59$, $V = 16^m.75$, $R = 16^m.27$) и контрольных звезд (см. Табл. 4) были определены нами путем фотометрического сравнения с известными величинами нескольких звезд в окрестности звезды V455 And, когда обе площадки - 1RXS J003828.7 +250920 и V455 And находились практически на одной воздушной массе.

Фотометрическая привязка была выполнена по специально проведенным наблюдениям 25 сентября 2011 г. на телескопе Цейсс-600 Крымской обсерватории МГУ. В таблице даны обозначение звезды и ее номер в каталоге USNO, звездные величины в полосах BVRcI со среднеквадратичными ошибками их определения.

Всего наблюдения объекта проводились в течение 23 ночей, из них диссертантом – в течение 18 ночей.

3.3 Период сверхгорбов во время сверхвспышки 2010 г.

28 и 29 октября 2010 г. соискателем были проведены первые наблюдения этого объекта в рамках международной кампании VSNET, когда звезда находилась на стадии сверхвспышки, на Рис. 29 приведена пример кривой блеска в эти даты.

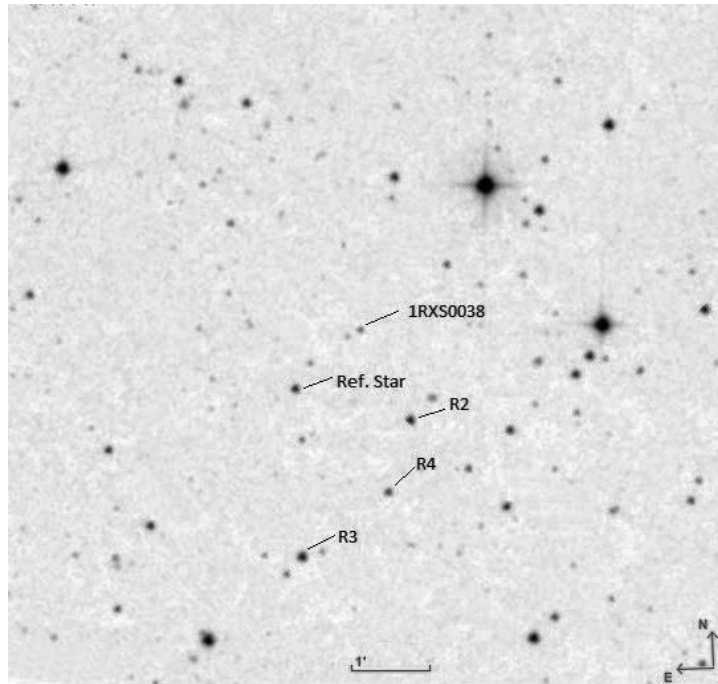


Рисунок 28. Поисковая карта 1RXS J003828.7 +250920, масштаб 7'x7', север вверху. Указаны звезда сравнения и контрольные звезды.

Наблюдения выявили наличие колебаний блеска с амплитудой 0.3 зв. в. и периодом 0.0985(6) сут. Средний период по всем данным, полученным во время сверхвспышки, включая стадию после быстрого её ослабления, оказался равным 0.0972(2) сут. (Рис. 30). Колебания блеска были интерпретированы как сверхгорбы, а объект был классифицирован как карликовая новая типа SU UMa. Полученный период дал основание заподозрить, что эта карликовая новая может находиться в пробеле периодов. Средняя кривая блеска, полученная по данным международной кампании, приведена на рис. 5. Обращает на себя внимание затменнообразная деталь на фазе 0.5.

3.4 Обнаружение орбитального периода в спокойном состоянии 2011 г.

Вспышки у этого объекта регистрируются очень редко. По архивным данным Каталинского обзора CRTS [18] за 8 лет наблюдений (97 ночей) было зарегистрировано всего три вспышки вблизи дат JD 2454117, 2454265 и 2454414.

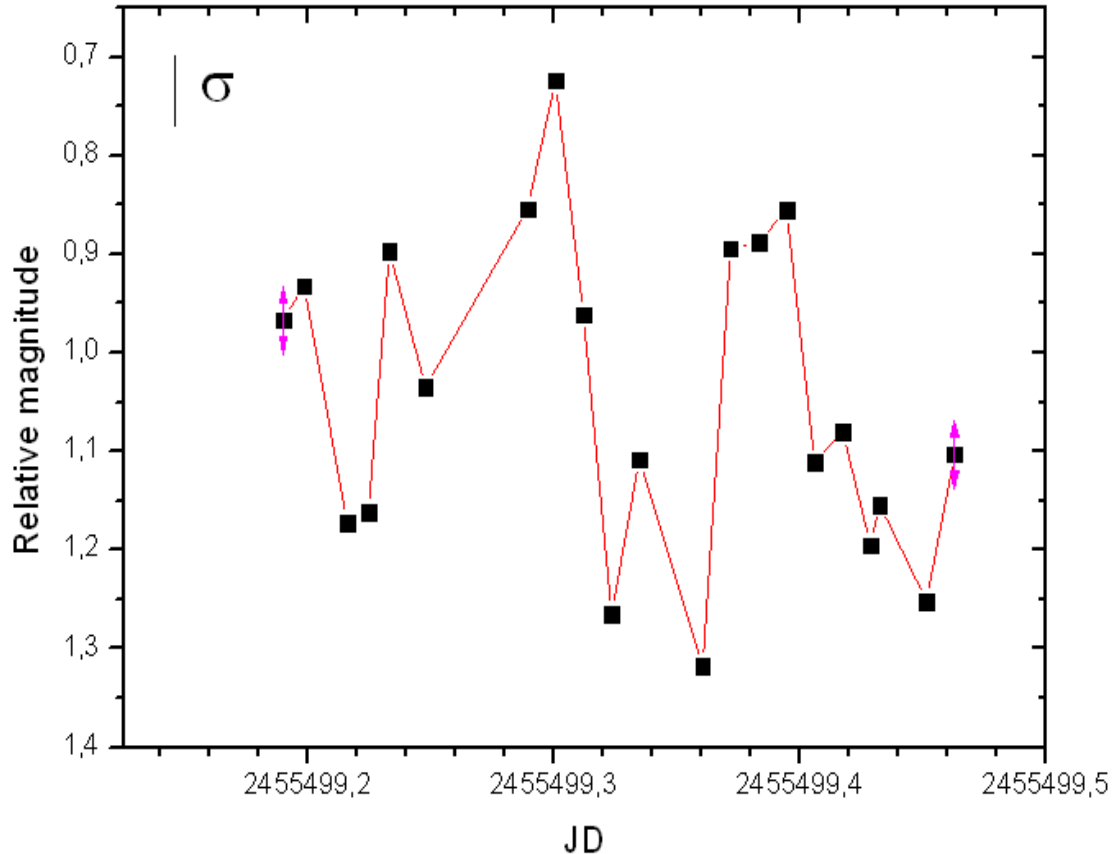


Рисунок 29. Кривая блеска, полученная 29 октября 2010. Вертикальной линией указана ошибка единичного составного снимка.

Поскольку в наблюдениях были пропуски, можно говорить о том, что вспышки происходили не реже одного раза в 150 сут. Какие-то из них могли быть и сверхвспышками. В 2012 г. была зарегистрирована нормальная вспышка (VSNET-alert 14995), во время которой в течение одной ночи нам удалось получить достаточно длинный ряд наблюдений.

Последующие наблюдения 1RXS J0038 были выполнены нами в 2011-2012 гг. – примерно через год после сверхвспышки 2010 г., когда объект находился в

минимуме блеска, и в 2012 г. – во время вспышки и неактивного состояния на 2.6 м. ЗТШ (Таблица 3).

Исходные кривые блеска для каждой из ночей наблюдений 2011–2012 гг. приведены на Рис. 31-32. Их отличительной особенностью является наличие частного затмения глубиной около 0.6 маг во всех фотометрических полосах. Затмение зарегистрировано не только на кривых в неактивном состоянии, но заметно также и во вспышке.

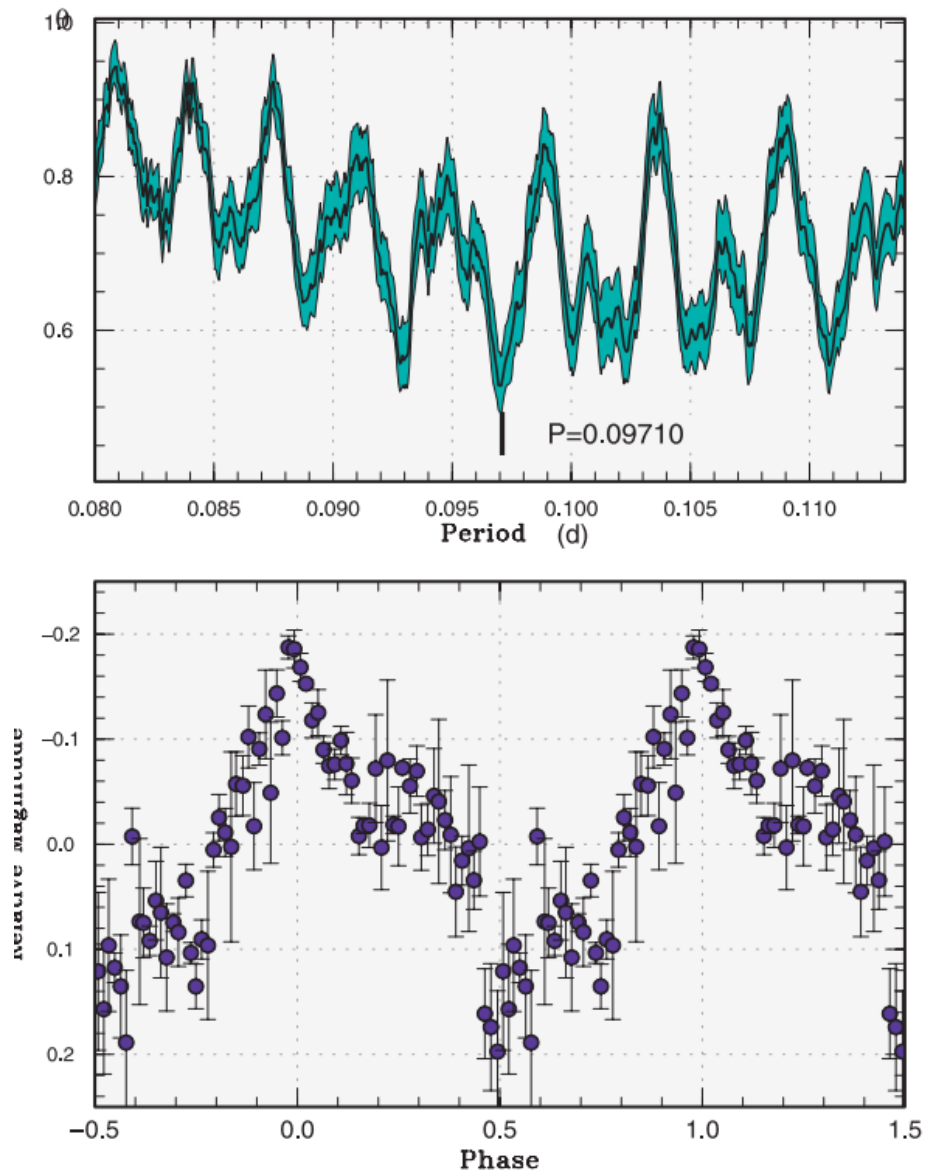


Рисунок 30. Средний профиль кривой блеска сверхгорбов во вспышке 2010 г.

Приведенные кривые блеска в отдельные ночи напоминают классическую кривую типа U Gem [4]– «хрестоматийный» образец модели тесной двойной системы с горячим пятном на аккреционном диске, которое частично затмевается вторичным компонентом системы. Наиболее сильно это сходство проявилось в ночи 25 августа и 1 сентября 2011 г. Другой отличительной особенностью кривых блеска является большая переменность их профиля от ночи к ночи и даже от цикла к циклу, а также изменение среднего блеска в пределах $\sim 0^m.5$. Из рисунка видно, что изменения профиля кривых одинаково во всех полосах.

Наличие затменной детали на кривых блеска дало возможность однозначно определить орбитальный период системы для всей базы данных 2011–2012 гг., мы получили эфемериду для середины затмения:

$$\text{Min (HJD)} = 2455799.48867(8) + 0.09451001(4) E.$$

Полученный результат идентифицирует карликовую новую как попадающую в «пробел» периодов.

На Рис. 33 для примера приведены фазовые кривые для каждой ночи наблюдений 2011 г. в полосе Rc, построенные согласно эфемериде (1), где хорошо видны изменения профиля орбитальной кривой от ночи к ночи. В отдельные ночи было замечено некоторое изменение профиля кривой даже от одного орбитального периода к другому (JD 2455807 и 2455809).

Используя все данные многоцветной фотометрии 1–5 сентября 2011 г. в полосах BVRC, мы также построили средние профили кривых блеска (Рис. 34). Кривые во всех полосах похожи, но имеют небольшие различия. В среднем, амплитуда кривых максимальна в полосе В ($0^m.62$), в V она составляет $0^m.60$, а в Rc – $0^m.55$. Видно, что высота горба, если ее измерять от среднего уровня на фазах 0.25–0.45, в полосе В равна $0^m.38$, в V – $0^m.34$, в Rc – $0^m.27$.

На кривых блеска, как во вспышке 2012 г., так и в минимуме блеска, явно видны затмения, однако, их профиль совершенно различен, это хорошо видно на фазовых кривых 2012 г., полученных путем свертки данных с орбитальным периодом (Рис. 35).

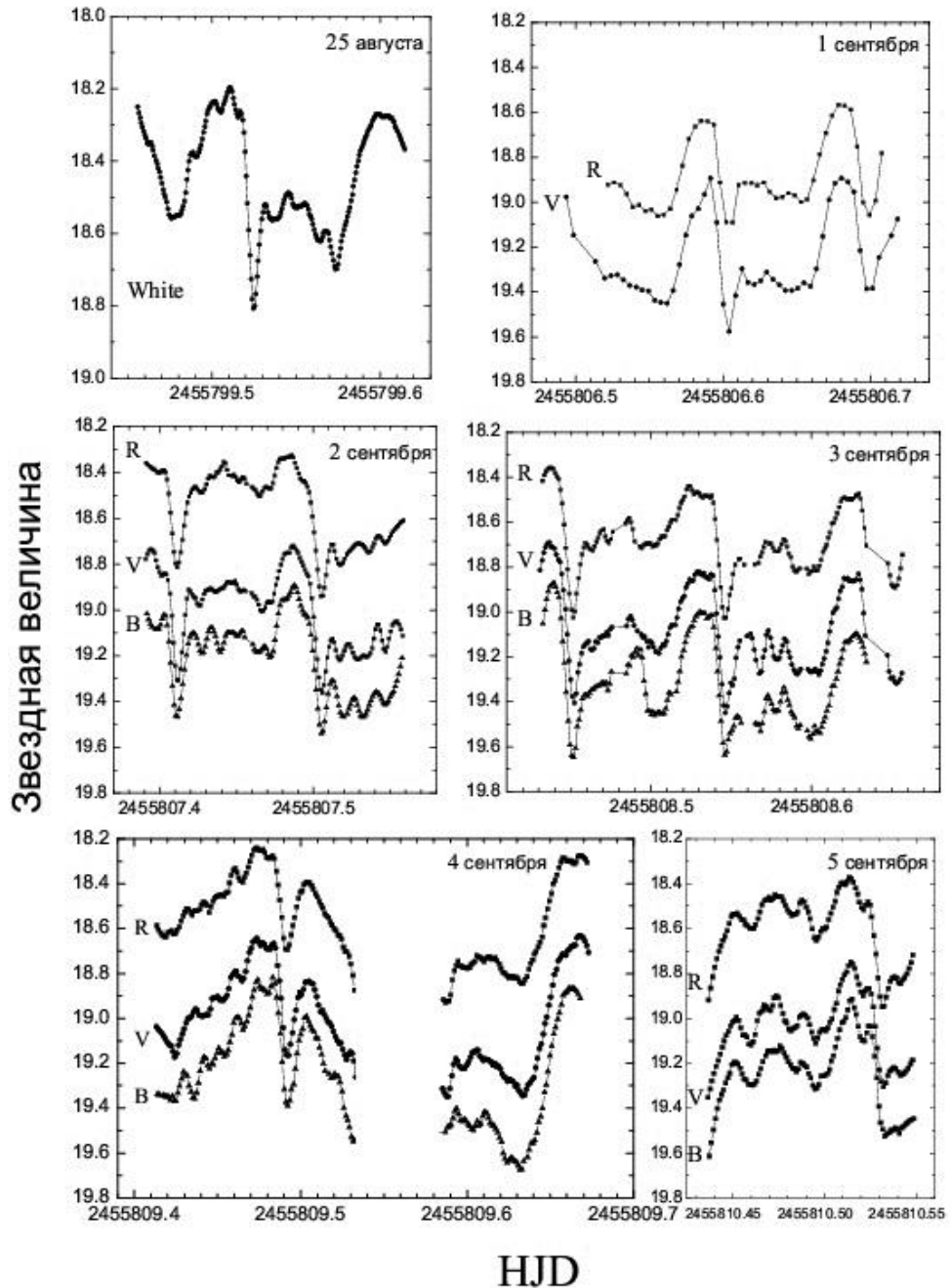


Рис. 31. Кривые блеска 1RXS J0038 в спокойном состоянии 2011 г.: в полосах В (черные треугольники), V (черные кружки), R (черные квадраты) 1–5 сентября и без применения светофильтров 25 августа.

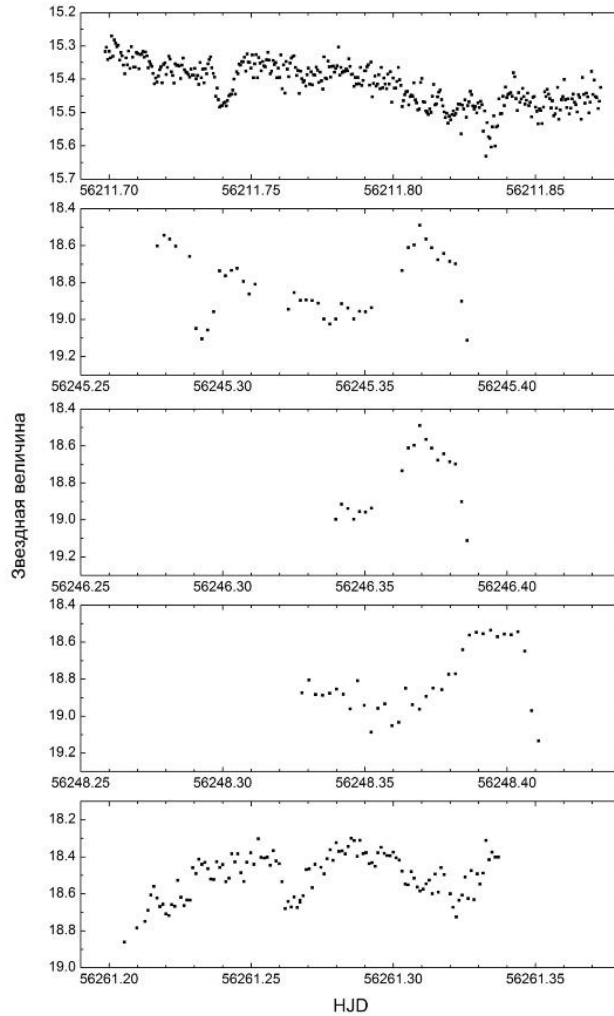


Рисунок 32. Кривые блеска 1RXS J0038 в 2012 г.: во время вспышки в интегральном свете, нуль-пункт взят в системе V (верхняя панель) и в спокойном состоянии в полосе Rс. По горизонтальной оси дана гелиоцентрическая дата HJD.

Фазовые кривые в спокойных состояниях блеска 2011 и 2012 гг. похожи: они содержат горб с максимумом на фазе 0.8. Однако этот горб отсутствует на кривой блеска во время вспышки. Это естественно, так как в соответствии с теорией тепловой неустойчивости вспышка происходит не вследствие усиления темпа аккреции от вторичного компонента (и, следовательно, увеличения яркости горячего пятна, ответственного за горб на кривой блеска), а вследствие достижения диском критических условий [38].

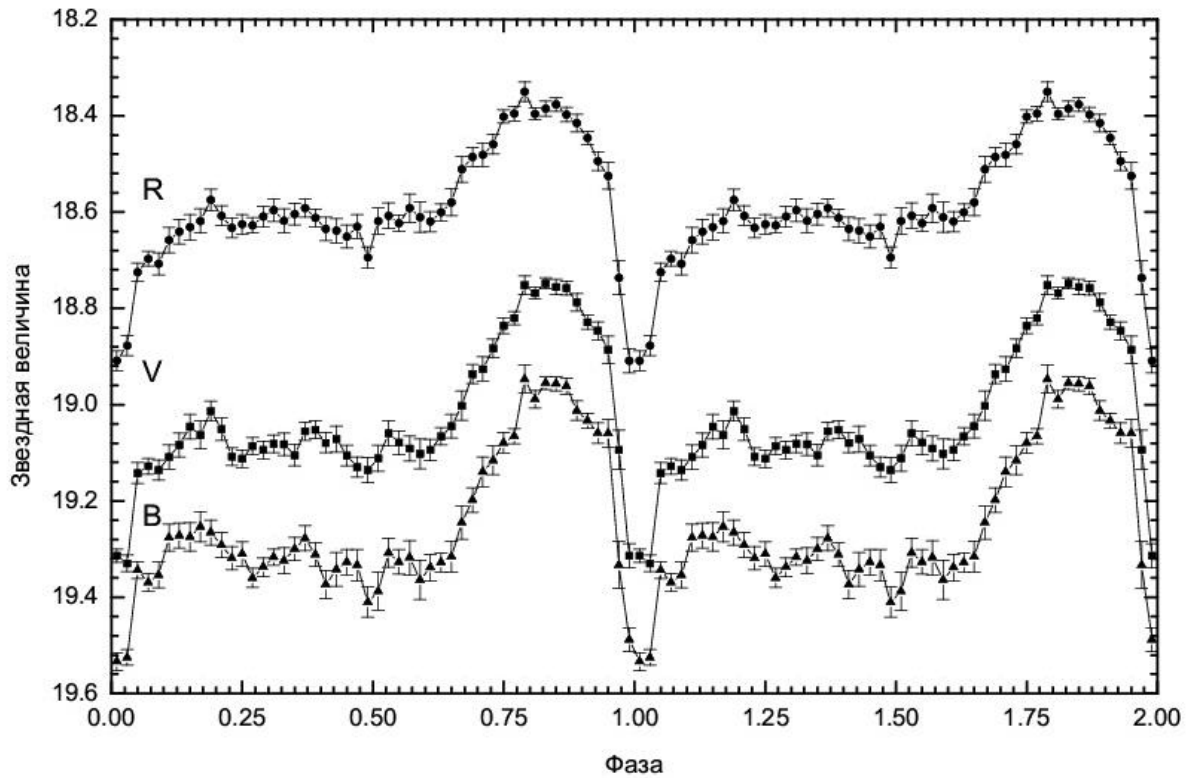


Рисунок 34. Средние фазовые кривые 1RXS J0038 в минимуме 2011 г. в полосах BVRc по всем ночам. Для удобства рассмотрения кривые воспроизведены дважды.

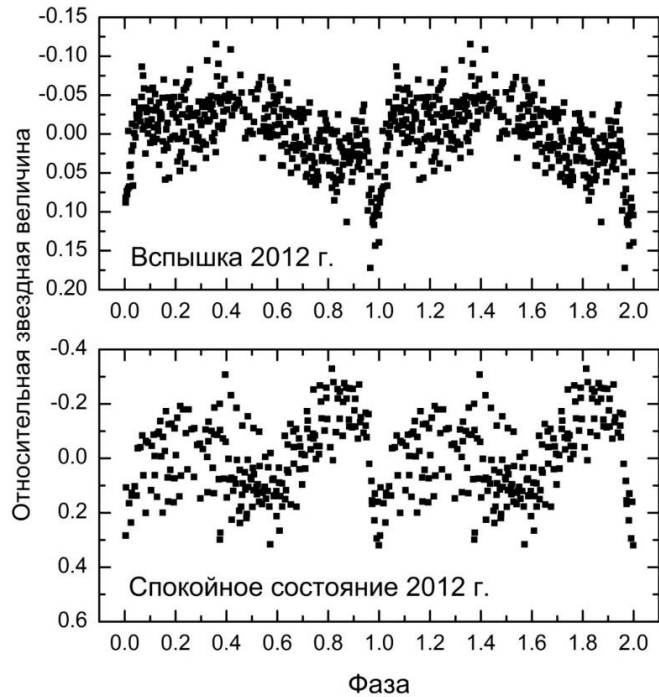


Рисунок 35. Фазовые кривые 1RXS J0038 для данных во вспышке 2012 г. (вверху) и в минимуме 2012 г. (внизу).

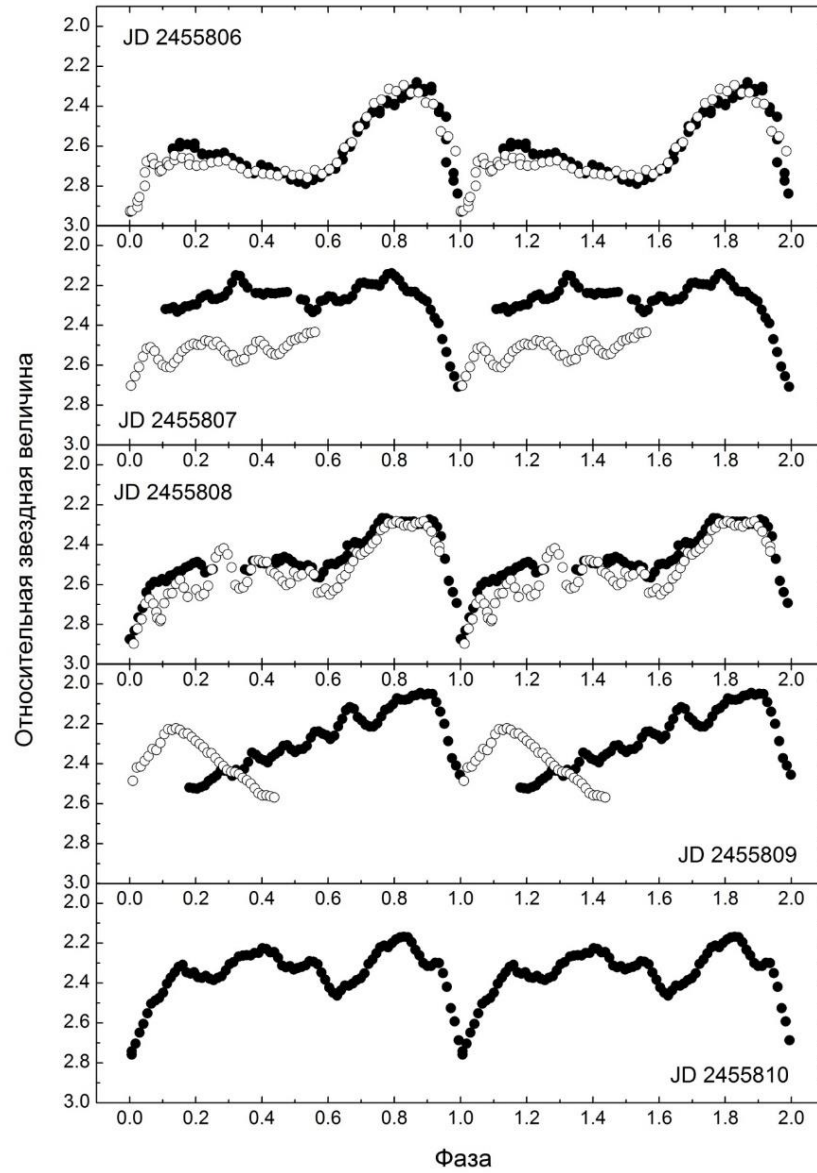


Рисунок 33. Фазовые кривые 1RXS J0038 в минимуме 2011 г. в полосе R_c , построенные методом скользящего среднего с окном 5 точек. Для каждой ночи указана Юлианская дата наблюдений. Точность единичной оценки блеска не превосходит размера кружка. Данные соседних циклов обозначены заполненными и открытыми кружками. Для удобства рассмотрения кривые воспроизведены дважды. Заметим некоторую невоспроизводимость кривых в соседних циклах для дат 2455807 и 2455809.

3.5 Обнаружение отрицательных сверхгорбов

Изменение профилей кривых блеска, на которые было обращено внимание выше, происходит от ночи к ночи, а в некоторые из них – от цикла к циклу. Причиной этому могут быть как быстрые неперидические колебания, предположительно связанные с изменениями структуры аккреционного диска, так и/или наличие периодических сигналов, отличных от орбитального. Быстрые неперидические изменения в структуре диска отмечались у некоторых катаклизмических переменных, например, у V1108 Her [70], V1239 Her [71]. Для проверки гипотезы о наличии дополнительного периодического сигнала, был проведен периодограммный анализ отдельно для 2011 и 2012 гг. Для 2011 г. были проанализированы данные в полосах В, V и Rс, а чтобы улучшить значимость результата, использовались данные четырех ночей, когда наблюдения проводились во всех полосах. Для этого предварительно из данных в каждой из полос была убрана периодическая волна, соответствующая среднему профилю кривой блеска в данной фотометрической полосе (Рис. 34), после чего данные были объединены. Для них был проведен поиск периодичности методом Стеллингверфа [42] с использованием пакета программ ISDA [52]. Результат представлен на Рис. 36.

Обращает на себя внимание группа пиков на периодограмме, разделенных суточной скважностью вокруг наиболее значимого пика, соответствующего 0.1009(1) сут, и третьей гармоники этих пиков. Таким образом, мы получили свидетельство того, что вариации профиля орбитальных кривых блеска вызваны наличием колебаний с периодом 0.1009 сут, или суточно-сопряженным периодом (0.0917 сут, или 0.1122 сут.).

Чтобы отдать предпочтение одному из этих периодов, рассмотрим, насколько реальны они могут быть с физической точки зрения. Интерес представляют два периода, один из которых больше орбитального (0.1009 сут.) и может быть

периодом положительных сверхгорбов, а другой – меньше (0.0917 сут.) и может быть периодом отрицательных сверхгорбов. Однако, в соответствии с эволюцией положительных сверхгорбов (см. Главу 1), их период на последней стадии сверхвспышки (С) и непродолжительное время после её окончания у некоторых систем не может быть больше, чем в течение предыдущей стадии В. Существование положительных сверхгорбов в спокойном состоянии вне сверхвспышки противоречит теории приливно-тепловой неустойчивости.

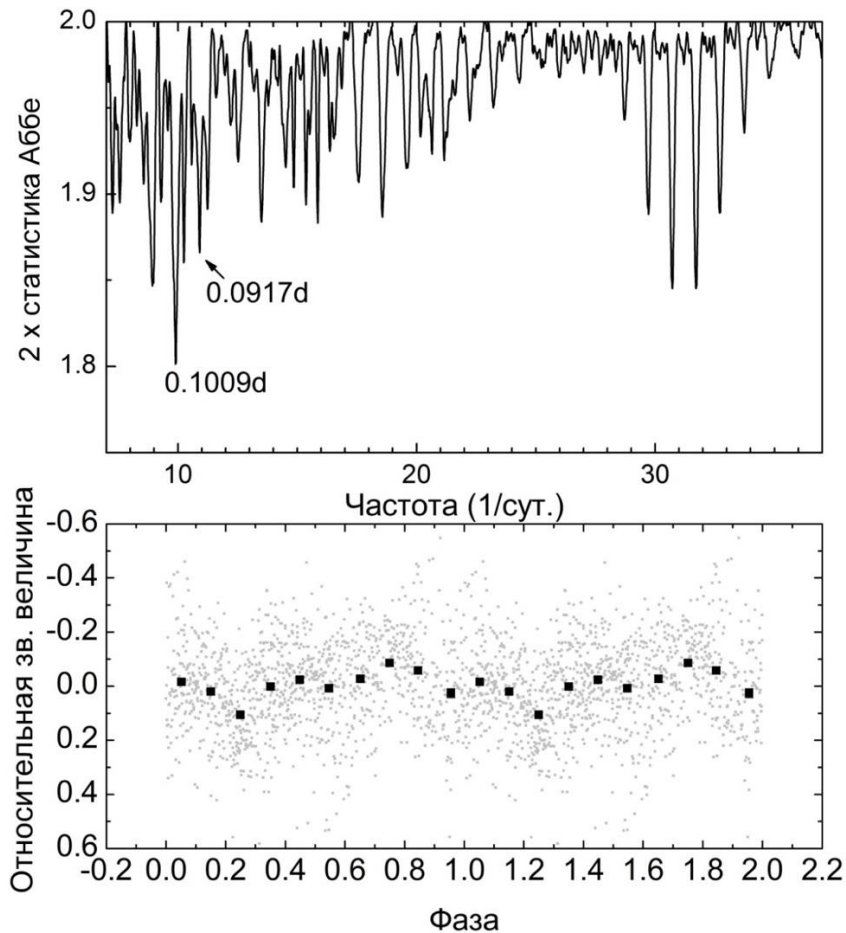


Рисунок 36. Периодограммы для данных 1RXS J0038 в минимуме 2011 г. в полосах В, V и Rc после вычета орбитального периода (вверху) и соответствующие свертки данных с периодом 0.0917 сут. (внизу). Серыми точками обозначены индивидуальные измерения, а черными квадратами – средние в каждом из десяти интервалов фаз орбитального периода. Ошибка среднего значения соизмерима с размером квадрата. Для удобства рассмотрения данные воспроизведены дважды.

Следовательно, период 0.0917 сут. представляется более вероятным и может быть интерпретирован как период отрицательных сверхгорбов.

Проведя аналогичную процедуру вычитания орбитального периода для данных в минимуме блеска 2012 г., была построена периодограмма для остатков (Рис. 37). Сравнивая ее с периодограммой, приведенной на рис. 8 для 2011 г., можно увидеть совпадение наиболее значимых пиков. Любопытно, что данные 2012 г. во вспышке (освобожденные от линейного тренда, соответствующего ослаблению блеска в течение ночи) и в спокойном состоянии (освобожденные от орбитальной модуляции), будучи объединены в одну выборку, показывают синфазность с одним и тем же периодом 0.091523(8) сут. (рис. 38). Такая синфазность кривых может говорить о постоянстве найденного периода на шкале времени порядка месяца.

В целом, период отрицательных сверхгорбов в 2011 и 2012 гг. в среднем был равен 0.092 сут., а небольшое различие в периодах, вероятно, вызвано эволюцией отрицательных сверхгорбов (зависимость периода отрицательных сверхгорбов от фазы нормального цикла была найдена у V1504 Cyg [26], MN Dra [37], NY Her [65, 72]).

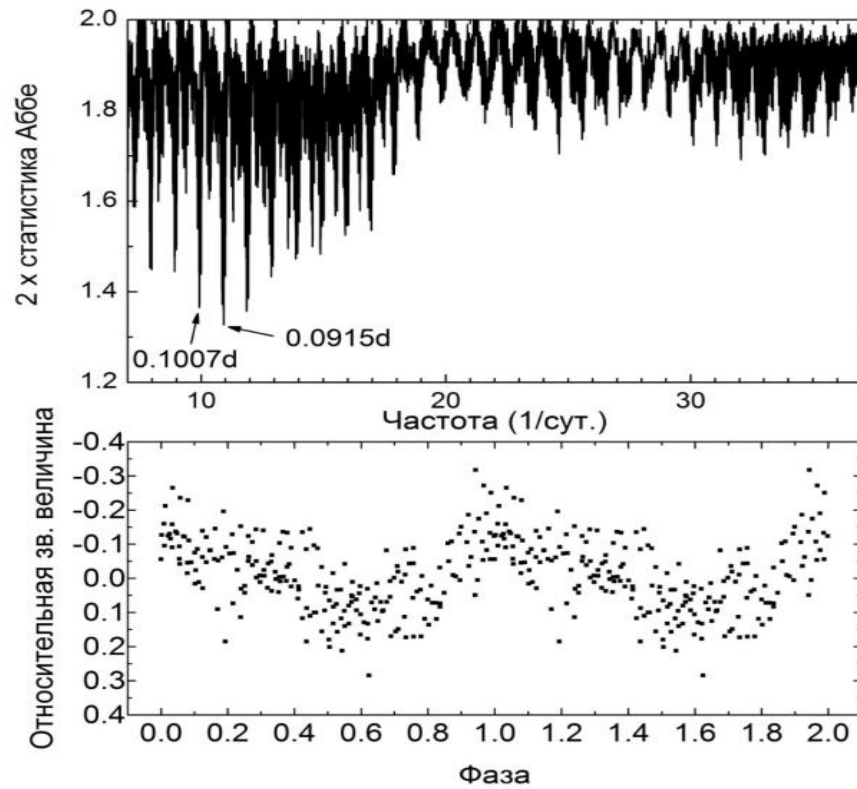


Рис. 37. Периодограмма для данных 2012 г. в спокойном состоянии после вычета орбитальной волны (вверху) и свертка данных с периодом 0.0915 сут.

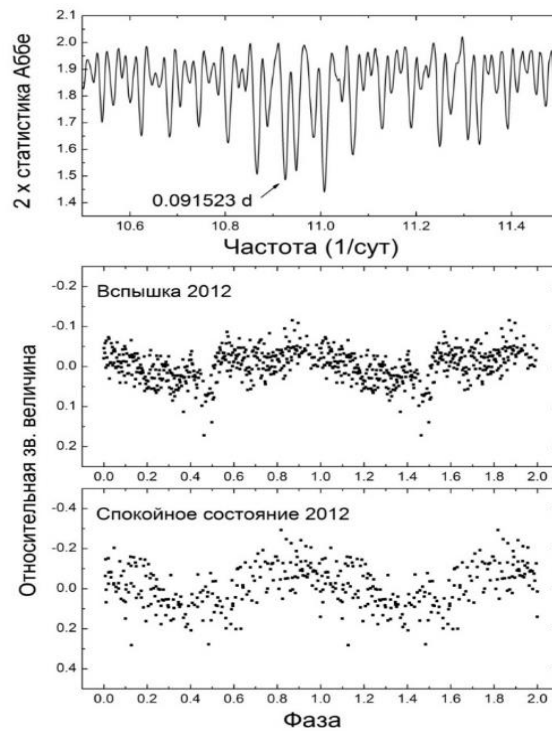


Рис. 38. Периодограмма для всех данных 2012 г. (верхняя панель) и свертки с периодом 0.091523 сут. (средняя и нижняя панели) для данных во вспышке и

спокойном состоянии. В качестве начальной эпохи была взята HJD=2456211.69863.

3.6 Избыток периода во время сверхвспышки и дефицит периода в спокойном состоянии

Полученные нами величины орбитального периода $P_{orb}=0.09451$ сут., $P_{sh}^+ = 0.0985$ и 0.0972 сут. для положительных сверхгорбов только по нашим данным и средний период по четырём ночам соответственно, а также период отрицательных сверхгорбов $P_{sh}^- = 0.0917$ сут. позволяют определить избыток и дефицит орбитального периода эpsilon во время сверхвспышки и спокойном состоянии соответственно, используя формулу $\epsilon = (P_{sh}-P_{orb})/P_{orb}$ [78]. Для сверхвспышки превышение периода составило $\epsilon_1 = 0.042$ (по нашей ночи) и $\epsilon_2 = 0.029$ (по среднему из четырёх ночей), а для спокойного состояния эpsilon = -0.030. На Рис. 39 показано положение 1RXS J0038 на эмпирической диаграмме для положительных и отрицательных сверхгорбов, построенной по [78]. Наши данные показывают хорошее согласие с эмпирическими данными.

3.7 Оценка отношения масс

Зная ϵ для положительных сверхгорбов и орбитальный период, можем получить оценку отношения масс компонентов $q=m_2/m_1$, где m_1 – масса белого карлика, а m_2 – компонента, теряющего вещество. Согласно [8] отношение масс зависит от избытка периода положительных сверхгорбов (7):

$$q(\epsilon) = (0.114 \pm 0.005) + (3.97 \pm 0.41) \times (\epsilon - 0.025) \quad (7)$$

В случае только нашей оценки периода получаем $\epsilon = 0.042$ и $q_1 = 0,21$, а средняя величина периода даёт $\epsilon=0,029$ и $q_2=0.13$. На Рис. 40 показано положение 1RXS J0038 на диаграмме « $P_{orb} - q$ » [78].

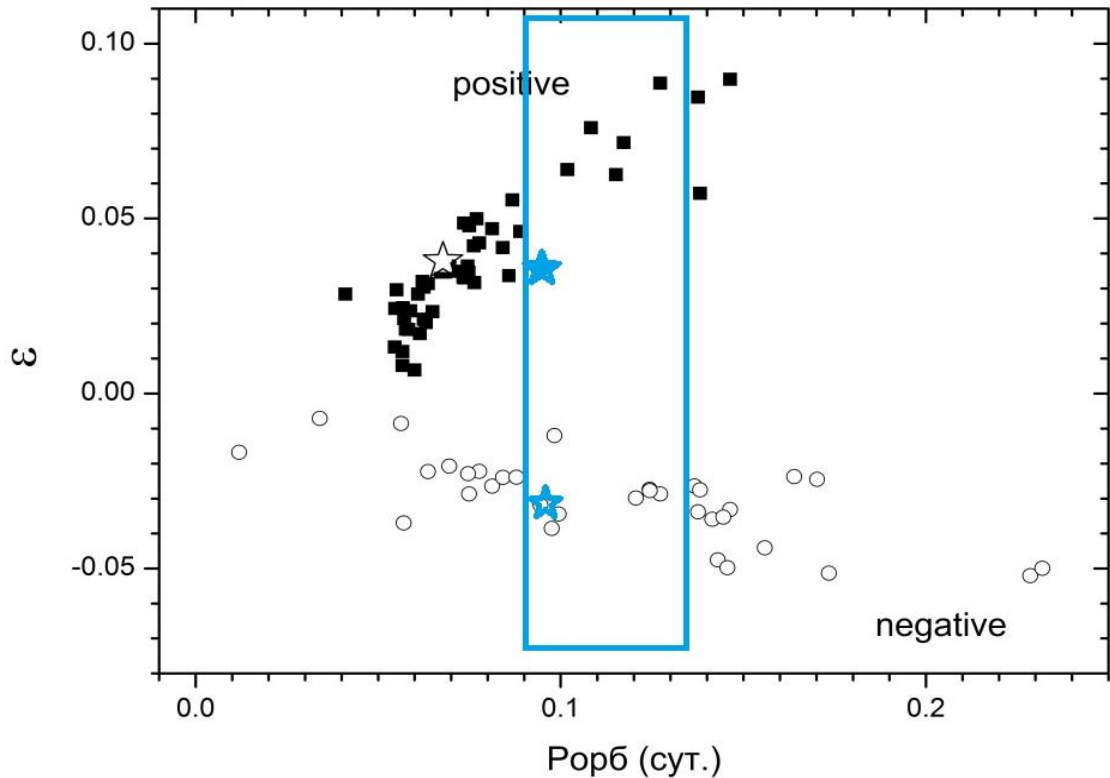


Рисунок 39. Положение 1RXS J0038 на диаграмме « P_{orb} - ϵ » (голубые звездочки). Прямоугольником обозначен пробел периодов.

Оценка $q=0.21(3)$, полученная для $\epsilon = 0.042$ только по одной ночи, лучше согласуется с теоретической зависимостью (на рисунке приведены именно эта оценка и соответствующее q), в то время как оценка по нескольким ночам – хуже. Такое расхождение можно объяснить тем, что орбитальная переменность давала больший вклад в общее излучение по мере ослабления сверхвспышки, таким образом, наблюдаемый период оказывался «не совсем» периодом сверхгорбов (вспомним затменообразную деталь на кривой блеска сверхгорбов). Заметим, что наша оценка, как и большинство остальных оценок отношения масс, лежит ниже теоретической зависимости.

3.8. Колориметрия.

На рис. 41 представлено положение 1RXS J0038 и контрольных звезд на двухцветной диаграмме $B-V$, $V-R_c$. В то время, как контрольные звезды поля располагаются в непосредственной близости от Главной последовательности,

положение 1RXS J0038, в среднем, смещено относительно нее и линии абсолютно черного тела вправо.

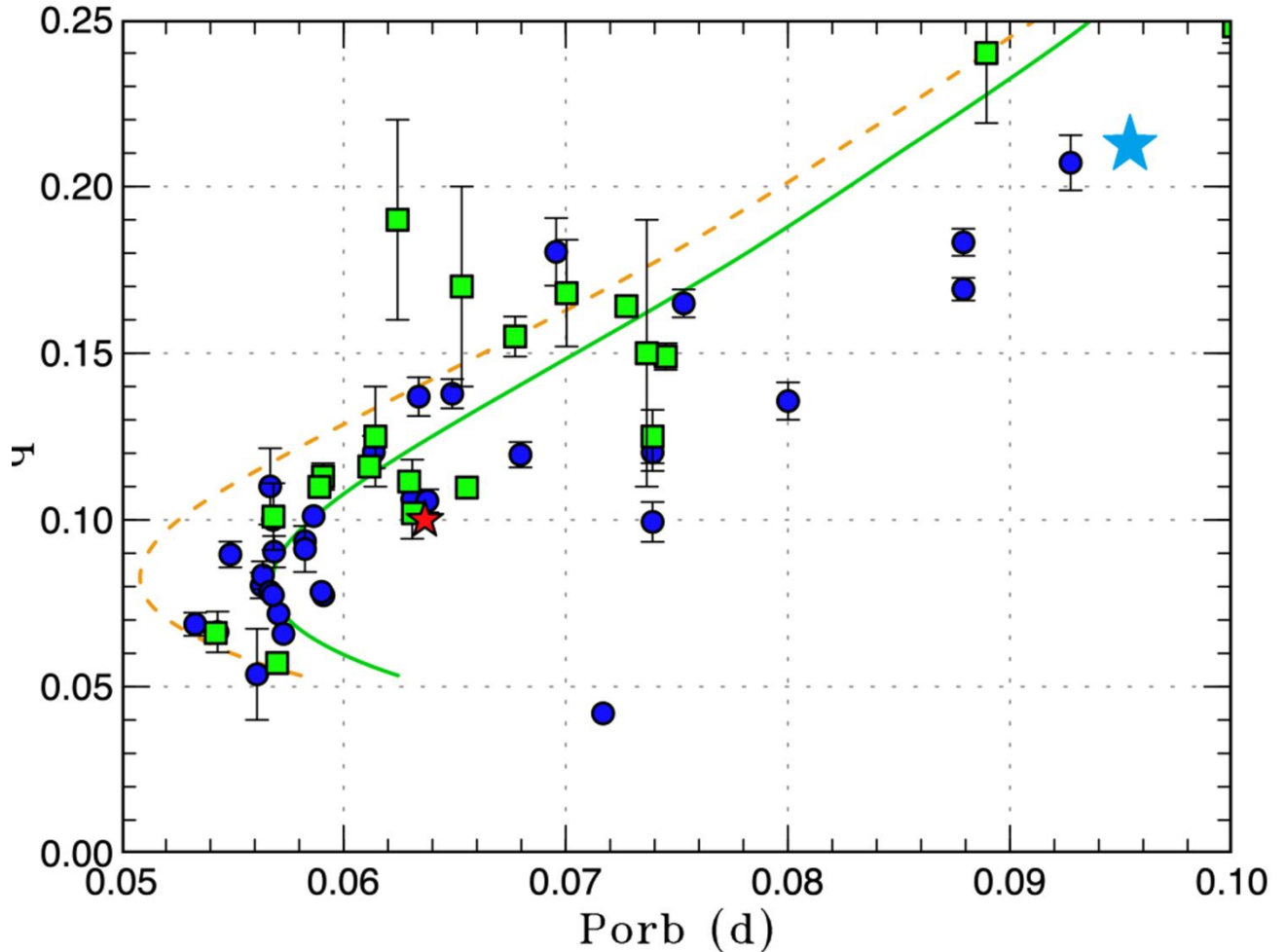


Рисунок 40. Положение 1RXS J0038 (голубая звёздочка) на зависимости « P_{orb} - u ». Значками обозначены данные наблюдений, приведённые в [74], сплошными линиями – теоретические кривые.

Такое положение объекта, вероятно, указывает на наличие в системе нескольких источников излучения – относительно горячего, ответственного за показатель цвета $B-V = 0^m.19 - 0^m.26$ и более холодного, чему соответствуют показатели цвета $V-Rc = 0^m.37 - 0^m.47$. Горячее излучение, очевидно, ассоциируется с самыми внутренними частями диска, а более холодное – с

внешними. Кроме того, можно видеть небольшие изменения показателей цвета в зависимости от фазы орбитального периода. Наиболее голубым в полосах В–V и V–Rc оказывается излучение системы на фазах 0.8–0.9, что, скорее всего, соответствует максимуму видимости горячего пятна (однако на фазе 0.75 показатели цвета более красные, чем можно было бы ожидать), а самым красным – на противоположных фазах.

Примечательно, что в минимуме затмения не обнаружено существенного изменения показателей цвета.

Таким образом, подтверждается предположение о том, что определяющий вклад в излучение этой системы, находящейся в пробеле периодов, вносит не белый или красный карлик, а горячее пятно и аккреционный диск.

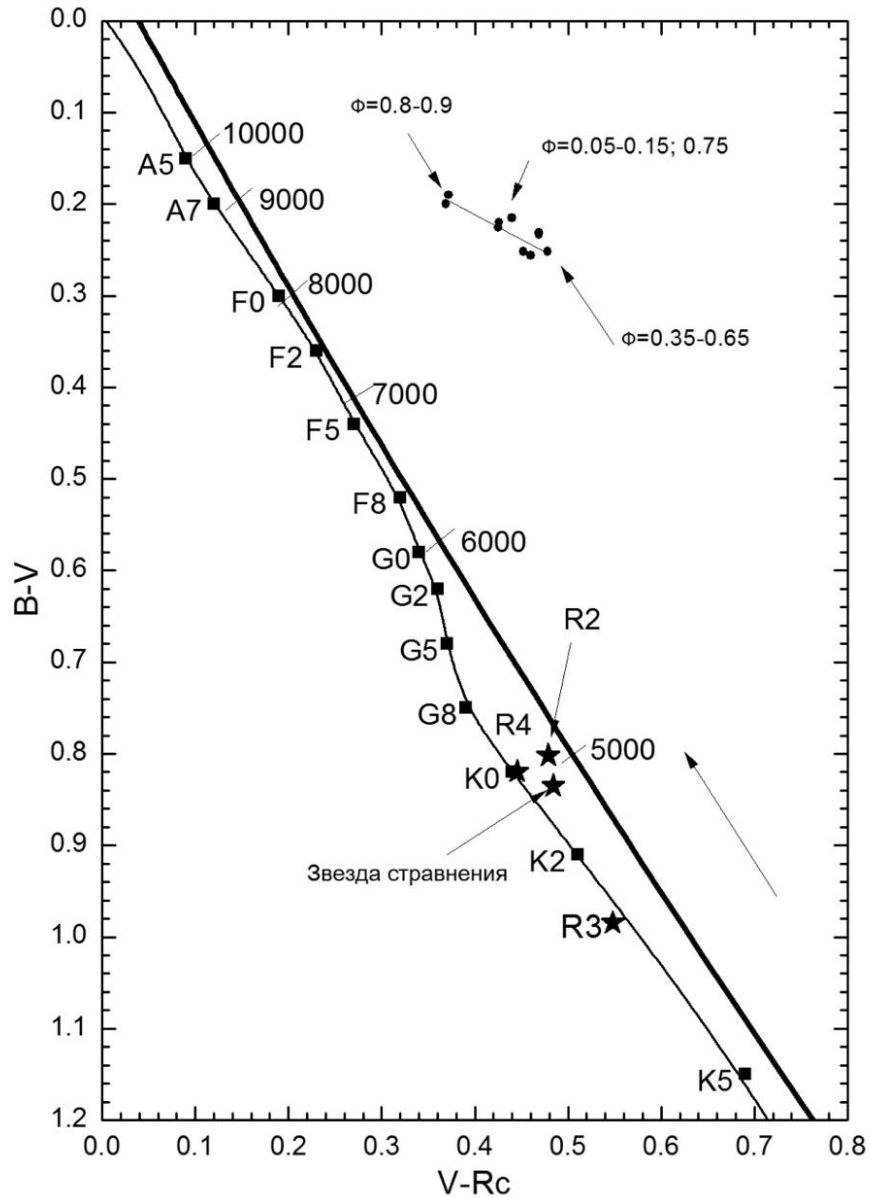


Рисунок 41. Положение 1RXS J0038 в спокойном состоянии 2011 г. и контрольных звезд в его окрестности на диаграмме V–R_c, B–V. Главная последовательность обозначена тонкой линией, абсолютно черное тело – жирной, цифрами нанесена температура (K). Стрелочкой указано направление межзвездного поглощения в соответствии с [87]. Звездочками отмечены контрольные звезды, их номер соответствует номеру в таблице 2. Заполненные кружки указывают на положение 1RXS J0038 в зависимости от фазы орбитального периода (Ф). Каждый кружок – это среднее значение показателя цвета по данным 4-х ночей (2–4 сентября), когда были BVRCI наблюдения.

3.9 Выводы к Главе 3.

1. Было обнаружено, что 1RXS J0038 - система с частным затмением горячего пятна в спокойном состоянии и частным затмением диска во время вспышки и, вероятно, во время сверхвспышки.
2. Открыт орбитальный период, равный 0.09451 сут., что соответствует положению объекта в «пробеле» орбитальных периодов.
3. Впервые обнаружен период отрицательных сверхгорбов 0.092 сут. по данным в спокойном состоянии и в нормальной вспышке 2011 и 2012 гг.
4. Получена оценка отношения масс компонентов $q \sim 0.21$.
5. Колориметрические данные выявили многокомпонентное излучение 1RXS J0038, источниками которого, предположительно, являются горячие и холодные части аккреционного диска и горячего пятна на аккреционном диске.

Результаты, приведённые в главе, опубликованы в статьях:

Pavlenko, E., Sosnovskij, A., Katysheva, N. et al. *Eclipsing SU UMa-Type Dwarf Nova 1RXS J003828.7+250920 During the "Period Gap". I. Multiperiodicity and Color Features in 2011-2012.* // *Astrophysics*, Volume 59, Issue 3, pp.304-320, 2016.

Личным вкладом диссертанта в данную главу является:

Из всех 23 ночей наблюдений, использованных в работе, диссертантом лично получено 18 ночей на двух телескопах КрАО 2.6 м ЗТШ и 0.38 м. К-380. Получение и обработка все данных наблюдений данного объекта. Участие в постановке задачи. Проведение частотного анализа, с использованием методов, описанных в Главе 1. Анализ данных, представление, интерпретация и обсуждение полученных результатов, в том числе на российских и международных конференциях.

Глава 4. Периодические явления у карликовых новых NY Her и J161700.81+620024.9

4.1 Введение

Анализ архивных данных ASAS-SN вспышечной активности нескольких карликовых новых [75] выявили, что два объекта - NY Her и 1RXS J1616 с очень короткими сверхциклами 63.5(2) сут. и 89(1) сут. соответственно, имеют, тем не менее, аномально длинные циклы. Это неожиданный факт, поскольку короткий сверхцикл подразумевает высокий темп переноса вещества [76] и высокую частоту нормальных вспышек. Като и др. предположили, что вероятная разгадка этого противоречия «находится» в наклонном аккреционном диске (следует помнить, что обычные диски лежат в плоскости орбиты). Из многих моделей, пытающихся объяснить отрицательные сверхгорбы, наиболее популярна модель нодальной прецессии диска, наклонённого к плоскости орбиты, следствием которой являются отрицательные сверхгорбы [32, 77]. Согласно Като и др. [75], увеличение интервала между вспышками NY Her и 1RXS J1616 могло произойти из-за наклона аккреционного диска над орбитальной плоскостью (в этом случае аккреционная струя большую часть времени попадает не в край диска, а в его центральные части и требуется больше времени для достижения критических условий, необходимых для запуска тепловой неустойчивости). Вследствие этого можно было бы ожидать появления нодальной прецессии диска и отрицательных сверхгорбов на кривых блеска. Это мотивировало нас предпринять наблюдения NY Her и 1RXS J1616 с целью поиска предполагаемого периода отрицательных сверхгорбов и подтверждения (или опровержения) связи наклона диска с изменением интервала между нормальными вспышками.

4.2 NY Her: обнаружение отрицательных сверхгорбов

4.2.1 Основная информация об объекте.

NY Her ($\alpha = 17:52:52,60$ $\delta = +29:22:18,8$) была первоначально открыта Хоффмайстером (1949) как переменная типа Миры. Като и др. [75] идентифицировали этот объект как карликовую новую типа SU UMa с коротким сверхциклом. Использование данных о сверхвспышках, полученных из обзора ASASSN, наблюдения Пойнера и результаты последующей международной кампании (75) показали наличие положительных сверхгорбов с периодом 0,075525 сут. и значительно меньшей амплитудой ($0.^m10$ зв.в.) чем у большинства карликовых новых типа SU UMa с подобным орбитальным периодом (или близким к нему периодом сверхгорбов) Они определили возможный сверхцикл $\sim 63,5$ сут. и примерную продолжительность сверхвспышки около 10 дней. Длина сверхцикла $\sim 63,5$ сут. находится между звездами типа ER UMa (44; 79), отличающийся самыми короткими (20-50 сут.) сверхциклами, и обычными звездами типа SU UMa, сверхциклы которых длинее 100 сут. Длительность сверхвспышки 10 сут. значительно меньше длительности сверхвспышек, наблюдаемых у ER UMa. Като и др. [75] отметили, что NY Her можно отнести к ряду уникальных объектов с коротким сверхциклом и малой амплитудой сверхгорба.

4.2.2 Наблюдения.

Фотометрические ПЗС-наблюдения NY Her проводились в течение 6 ночей в июне 2017 г. в Крымской астрофизической обсерватории в интегральном свете, дающем систему близкой к полосе Rc, на двух телескопах: 2.6-м ЗТШ с APOGEE Alta E47 и 1.25-м АЗТ-11 с ProLine PL230.

Приоритетом было получение временных рядов с высоким временным разрешением для анализа временных рядов. Использовалась стандартная апертурная фотометрия (вычитание плоского поля, темнового шума и плоского

поля) для измерения переменной звезды и звезды сравнения из каталога USNO B1 1193-0272323 ($R=17.97$).

Точность единичного измерения яркости сильно зависела от телескопа и времени экспозиции, погодных условий и яркости NY Her и достигала 0.01-0.03 зв.в. для экспозиции 60 с. (ЗТШ) и 0.08-0.15 для экспозиции 180 с. (АЗТ-11).

4.2.3 Анализ данных

В спокойном состоянии блеск NY Her колебался в пределах $18^m.5 - 19^m.8$. Пример двух исходных кривых блеска показан на Рис. 42. Как видно, профиль кривой меняется от ночи к ночи и он не содержит признаков затмения. На кривых блеска отчётливо видна переменность блеска с периодом $\sim 1,7$ часа и большой амплитудой, изменяющейся от ночи к ночи в диапазоне 0.7-1.3 зв.в.

В первую ночь (Рис.42, верху) виден двугорбый профиль с амплитудами и небольшим провалом в большей горбы. Во вторую ночь (Рис. 42, нижний) профили кривых блеска становятся более сглаженными, меньший горб больше не виден.

Для поиска точной периодичности был проведен анализ периодограмм с использованием метода Стеллингверфа [42] реализованного в пакете ISDA [52]. Точность искомым периодов, а также статистика Аббе, также известная как статистика Лафлера-Кинмана, была рассчитана с использованием пакета ISDA. Перед анализом переменности так же был вычтен долгосрочный тренд.

Наиболее значимый пик периодограммы указывает на период 0,07141(5) сут., окруженный суточными пиками. Периодограмма и средняя фазовая кривая для этого периода показаны на Рис. 43.

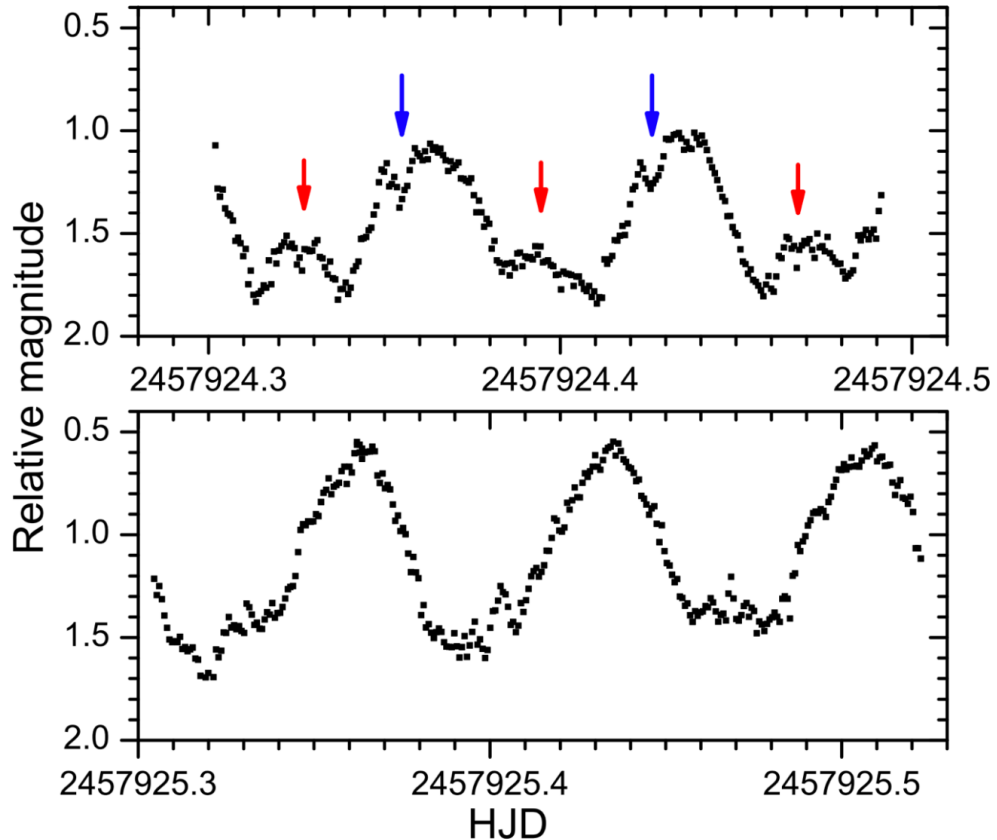


Рисунок 42. Пример кривой блеска NY Her для двух ночей: 19-20 июня 2017 г. Меньшие горбы и кратковременные «провалы» на кривой отмечены красным и синим цветом соответственно.

Исходные данные показывают небольшое рассеяние в минимуме, вызванное как большими ошибками, так и собственной переменностью объекта. Средняя кривая блеска показывает плоский минимум длительностью 0,4 периода и амплитудой около $0^m.7$.

Как показывает эмпирически установленная связь (см. Рис 39, 40), все звезды типа SU UMa с известными P_{orb} и P_{sh} [78] удовлетворяют уравнению (8):

$$\varepsilon = (P_{sh} - P_{orb}) / P_{orb} \quad (8)$$

где P_{sh} – период положительных сверхгорбов, P_{orb} – предположительно орбитальный период, найденный по полученным данным.

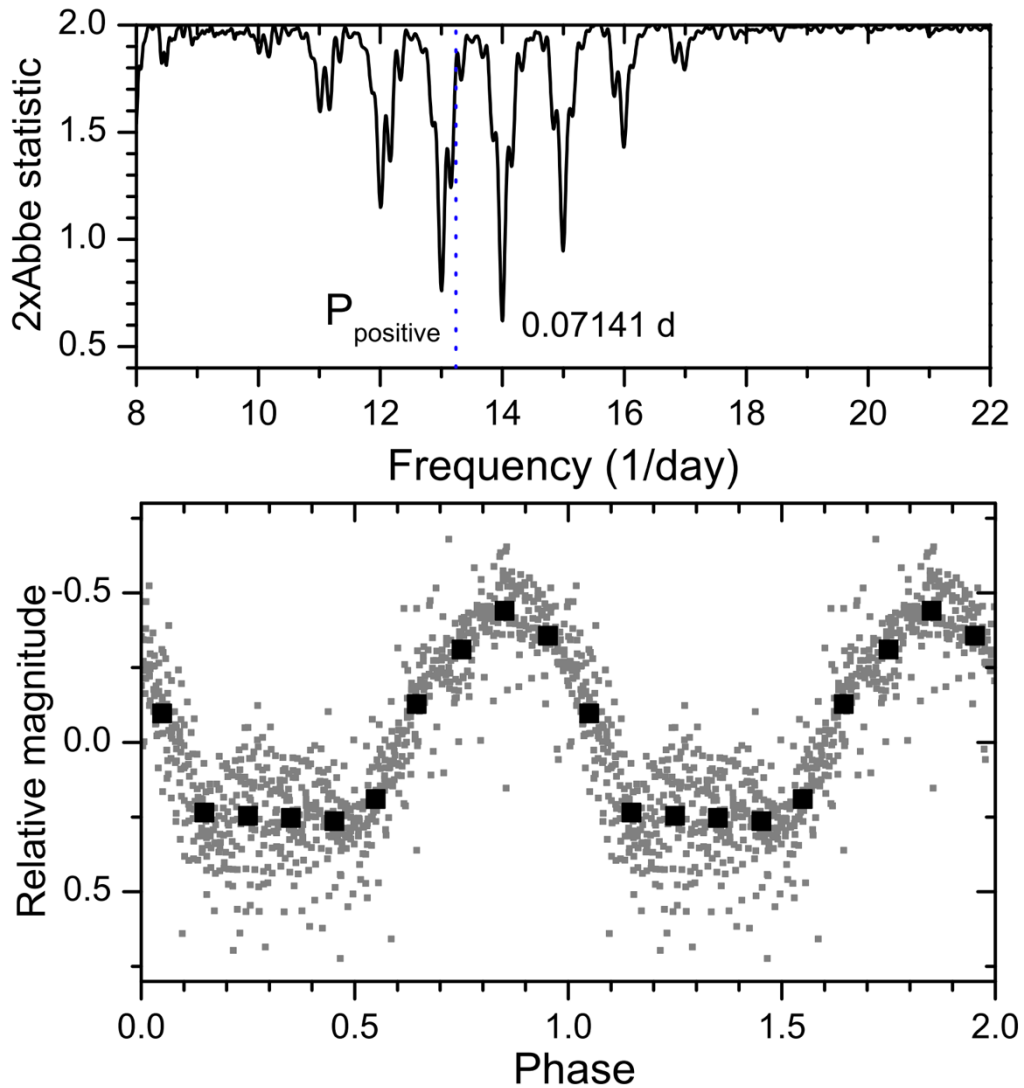


Рисунок 43. Вверху: Периодограмма для объединенных данных по всем шести ночам. Период сверхгорбов, обнаруженный ранее [75] показан синим пунктиром. Внизу: свертка данных с периодом 0,07141 сут. Исходные данные показаны серыми кружками. Черные квадраты обозначают среднюю кривую.

Полученный период (в спокойном состоянии) не может быть орбитальным, поскольку в этом случае $\varepsilon=0,057$ находится выше эмпирической зависимости «Орбитальный период – ε ». Согласно этому соотношению, соответствующий орбитальный период должен быть несколько больше и располагаться между 0,0722-0,0736 сут., при $\varepsilon = 0,025-0,045$.

Большая амплитуда колебаний блеска, зарегистрированная нами, не может быть вызвана изменением аспекта горячего пятна на диске в незатменных системах (и, следовательно, найденный период не может быть орбитальным). В то же время, отрицательные сверхгорбы у большинства известных карликовых новых с нодальной прецессией, отличаются большой амплитудой.

Исходя из этих фактов, мы полагаем, что период 0,07141(5) сут. является периодом отрицательных сверхгорбов NY Her. Его появление **согласуется** с предсказанием Осаки и Като [75] о появлении отрицательных сверхгорбов с увеличением интервала между вспышками.

4.3 1RXS J161659

4.3.1 Основная информация

Первоначально объект был выделен как рентгеновский, он занесен в каталог ROSAT. Объект также известен как MASTER OT J161700.81+620024.9 [85] (далее - *1RXS J1616*), авторы обнаружили его в ярком состоянии 11 сентября 2012 г. и предположили, что это карликовая новая. Через несколько лет было подтверждено, что объект является карликовой новой типа SU UMa [75]. Его блеск во сверхвспышке 2017 г. был 14^m.9. Период сверхгорбов на стадии В оказался равен 0.071370 сут., а на стадии С – 0.071063 сут.

Орбитальный период к моменту проведения наших наблюдений был неизвестен.

4.3.2 Наблюдения

Наблюдения были выполнены на двух телескопах КрАО: 2.6-м телескопе им. Г.А. Шайна (ЗТШ) с ПЗС камерой Apogee Alta E47 и 1.25-м телескопе (АЗТ-11) с ПЗС камерой ProLine PL230. Журнал наблюдений представлен в Таблице 5, где указано начало-конец наблюдений, число экспозиций, телескоп, цветовая система

и статус вспышечной активности. В качестве звезды сравнения использовалась звезда USNO B1 = 1519-0236952 ($B=14.74$, $R=13.00$, $I=12.53$). Все наблюдения 2017 г. проводились без применения светофильтров, а во время сверхвспышки – в полосах фотометрической системы Джонсона – Кузинса BVRCI (за исключением первой ночи, когда объект наблюдался в интегральном свете). Кривые реакции обоих ПЗС-фотометров имеют максимумы чувствительности в красной области спектра. Точность единичной оценки блеска по наблюдениям на ЗТШ составила $0^m.005 - 0^m.07$, а на АЗТ-11 – $0^m.02 - 0^m.07$ в зависимости от яркости объекта и погодных условий наблюдений.

Таблица 5. Журнал наблюдений.

Начало-конец наблюдений HJD 2458000+...	N	Телескоп	Цветовая система	Статус вспышечной активности
038.17486-038.32644	223	ЗТШ	Без фильтра	Минимум
039.17447-039.36167	257	ЗТШ	Без фильтра	Минимум
043.20146-043.36860	77	АЗТ-11	Без фильтра	Вспышка
044.22010-044.37231	72	АЗТ-11	Без фильтра	Вспышка
045.19102-045.28075	43	АЗТ-11	Без фильтра	Минимум
046.20416-046.28762	40	АЗТ-11	Без фильтра	Минимум
050.18918-050.27813	41	АЗТ-11	Без фильтра	Минимум
051.19126-051.31055	57	АЗТ-11	Без фильтра	Минимум
053.25747-053.28090	12	АЗТ-11	Без фильтра	Вспышка
054.20112-054.33112	61	АЗТ-11	Без фильтра	Вспышка
262.29500-262.37608	543	ЗТШ	Без фильтра	Сверхвспышка
264.27756-264.54642	1152	ЗТШ	BVRC	Сверхвспышка

Таблица 5. Продолжение				
265.26600-265.54503	1209	ЗТШ	BVRc	Сверхвспышка
266.25976-266.54530	1212	ЗТШ	BVRc	Сверхвспышка
268.30443-268.31101	10	АЗТ-11	Без фильтра	Сверхвспышка
269.35477-269.36144	10	АЗТ-11	Без фильтра	Сверхвспышка

4.3.3 Нормальные вспышки и горбы на кривых блеска в спокойном состоянии – 2017 год.

Наблюдения в 2017 г. вне сверхвспышки охватили две нормальные вспышки и фрагменты спокойного состояния между ними. Кривая блеска приведена на Рис. 44. (слева). Амплитуда вспышек, как видно из рисунка, была не менее $2^m.0$. Пропуски в наблюдениях не дают возможности точно определить длину цикла (интервал между соседними вспышками). Если предположить, что они хорошо воспроизводятся, то их появление не противоречит ~ 11 -дневному циклу (Рис. 44, справа).

Для анализа переменности блеска в спокойном состоянии, были исключены данные трех ночей, приходящиеся на нормальные вспышки, вычтен тренд, соответствующий небольшим колебаниям среднего блеска от ночи к ночи и проведен анализ временных рядов, используя метод Стеллингверфа, реализованный в пакете программ ISDA [52]. Результат приведен на Рис. 45.

Периодограмма указывает на наиболее значимый пик $0.06888(2)$ сут. среди пиков, разделенных суточной скважностью.

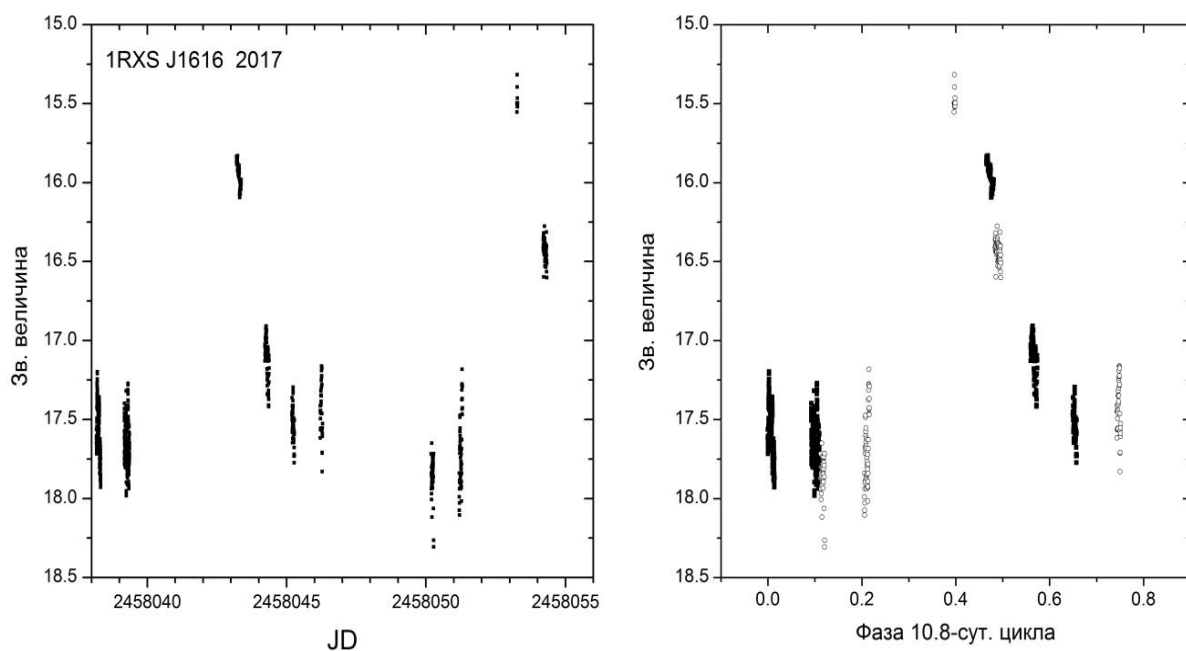


Рисунок 44. Слева: кривая блеска 2017 г., охватившая две вспышки и спокойное состояние. Справа: свертка данных с вероятным циклом вспышек 10.8 сут. Заполненными кружками показаны данные первого цикла, а открытыми – второго. Поскольку кривые реакции светоприемников имеют максимальную чувствительность в красной области спектра, нуль-пункт шкалы звездных величин условно принят для R_c .

Средняя кривая блеска, построенная по этим ночам, имеет один горб с амплитудой около $0^m.4$, длящийся ~ 0.4 периода и резкое (затменнообразное) кратковременное ослабление блеска на фазе 0.55, напоминая своим видом известные орбитальные кривые, приведенные, например, в [4, 81]. На этих кривых горб объясняется различными условиями видимости горячего пятна на диске в процессе движения по орбите. Для проверки предположения, является ли обнаруженный период $0.06888(2)$ орбитальным периодом, была определена величина избытка периода ε [4] согласно уравнению (8), используя величину периода сверхгорбов на стадии В Psh=0.07137, взятую из [78].

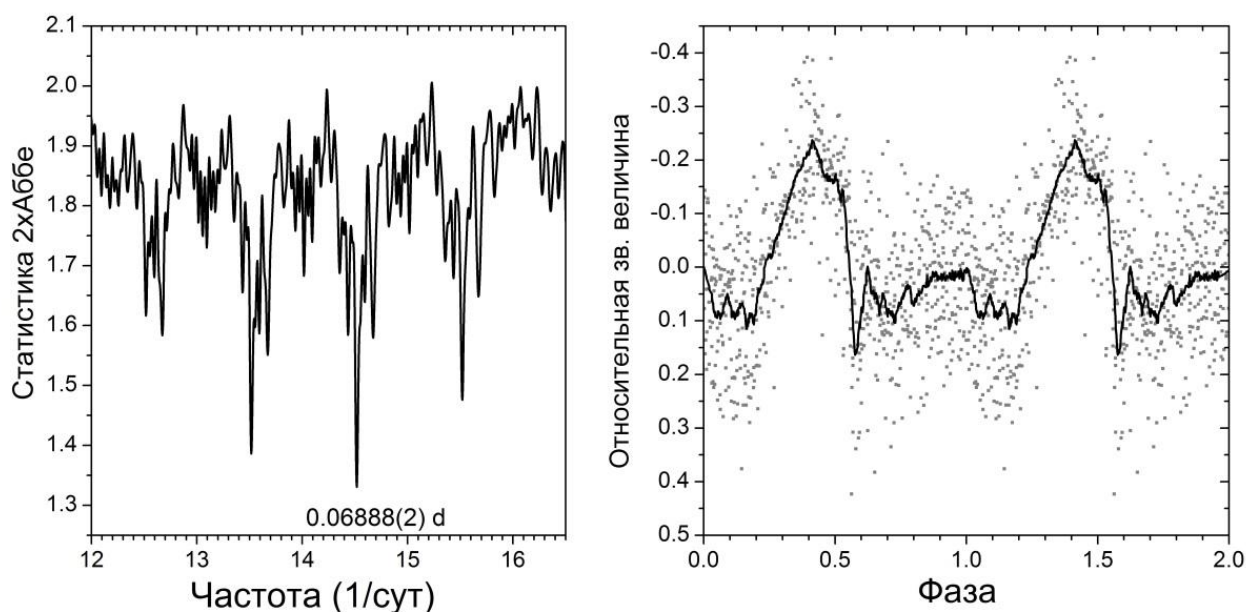


Рисунок 45. Периодограмма для данных семи ночей спокойного состояния 2017 г. (слева) и свертка данных с периодом 0,06888(2) сут. (справа). Серые точки – индивидуальные значения. Сплошной линией проведена сглаженная кривая. Начальная эпоха соответствует HJD 2458038.17486.

По нашим данным было получено значение $\varepsilon = 0.036$. На Рис. 46 приведена эмпирическая зависимость между величинами орбитального периода и ε для положительных и отрицательных сверхгорбов, куда также нанесена найденная величина для 1RXS J1616 в предположении, что обнаруженные периодические изменения блеска происходят с орбитальным периодом. Из рисунка видно, что положение ε для 1RXS J1616 хорошо укладывается на эмпирическую зависимость и, следовательно, гипотеза орбитального периода верна. Таким образом, не были обнаружены отрицательные сверхгорбы в минимуме блеска при цикле 11 сут.

Кратковременное ослабление блеска на фазе 0.58 вероятно связано с касательным затмением диска вторичным компонентом. На Рис. 47 показаны свертки с орбитальным периодом для наиболее точных данных, полученных на ЗТШ по двум ночам. Поскольку в течение ночи ряд наблюдений охватывал несколько орбитальных циклов, свертки приведены для каждого цикла. Видно,

что профиль кривой блеска несколько изменяется от цикла к циклу, причем эти изменения больше в интервале фаз $0.62 - 0.22$, чем в интервале $0.22 - 0.62$, где наблюдается горб. Подобная нестабильность кривых была отмечена нами ранее для другой карликовой новой с частным затмением 1RXS J0038 [81].

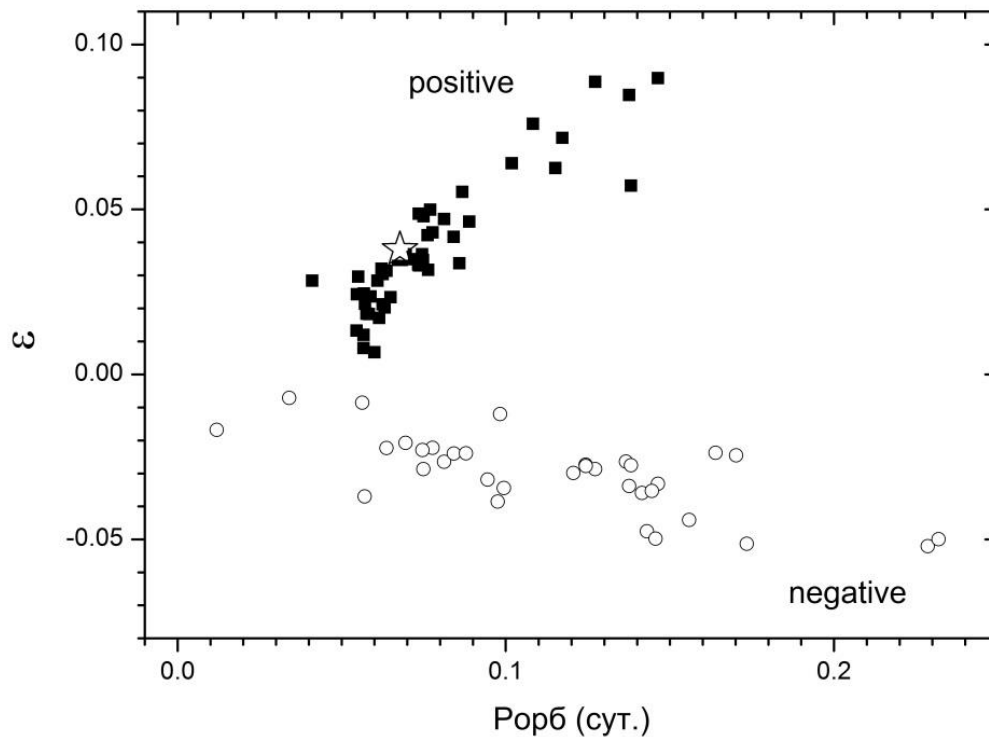


Рисунок 46. Избыток периода ϵ для положительных (positive) и отрицательных (negative) сверхгорбов (заполненные кружки и квадраты соответственно). Данные взяты из [79, 81, 78]. Звездочкой обозначено положение 1RXS J1616, полученное по нашим данным.

Аналогично с Главой 3.7 предыдущей главы, зная ϵ для положительных сверхгорбов, найденный во сверхвспышке на стадии C - 0.071063 сут. и орбитальный период, найденный нами - 0.06888 сут, можем получить ϵ и оценку отношения масс компонентов q , согласно уравнению (7).

Согласно [8] получаем $\varepsilon_c = 0.032$ на стадии С, а $q = 0.14(1)$. Эта величина также хорошо согласуется с теоретико-эмпирическими зависимостями, показанными на Рис. 46Б.

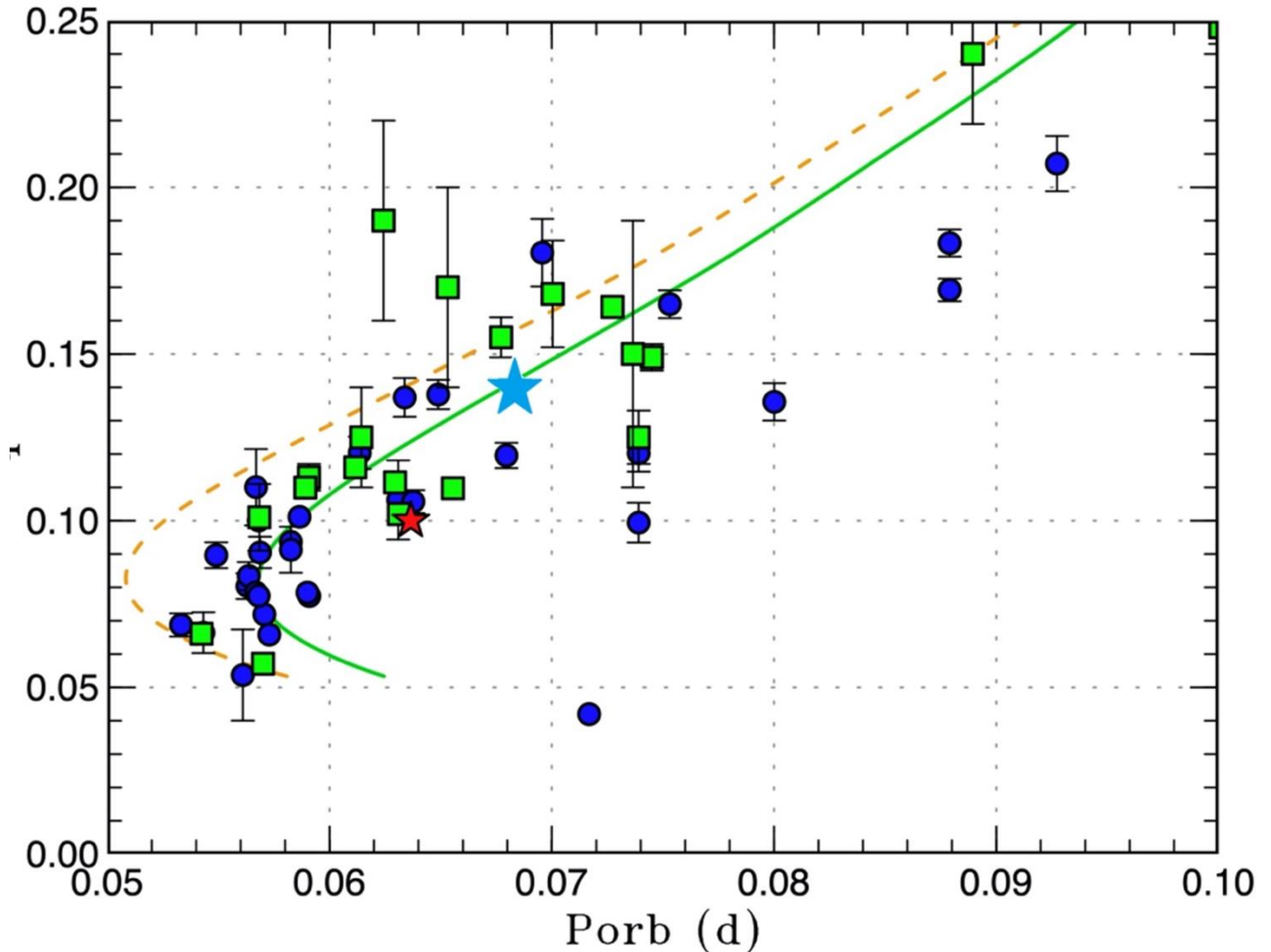


Рисунок 46Б. Положение 1RXS J1616 (голубая звёздочка) на зависимости « P_{orb} - q ». Значками обозначены данные наблюдений, приведённые в [74], сплошными линиями – теоретические кривые.

4.3.4 Период сверхгорбов и сверхвспышка 2018 г.

Большая часть наблюдений 2018 г. пришлась на вторую половину плато вспышки. Периодограмма, построенная в окрестности ожидаемого периода сверхгорбов по всем данным плато и свертка с наиболее значимым периодом приведена на Рис. 48. Средний период сверхгорбов оказался равен 0.071164(60) сут. Профиль

фазовой кривой блеска асимметричен, представляет собой резкий подъем блеска и небольшой вторичный горбик на нисходящей ветви. Средняя амплитуда профиля сверхгорба – около $0^m.15$. В Таблице 6 приведены гелиоцентрические моменты максимумов сверхгорбов.

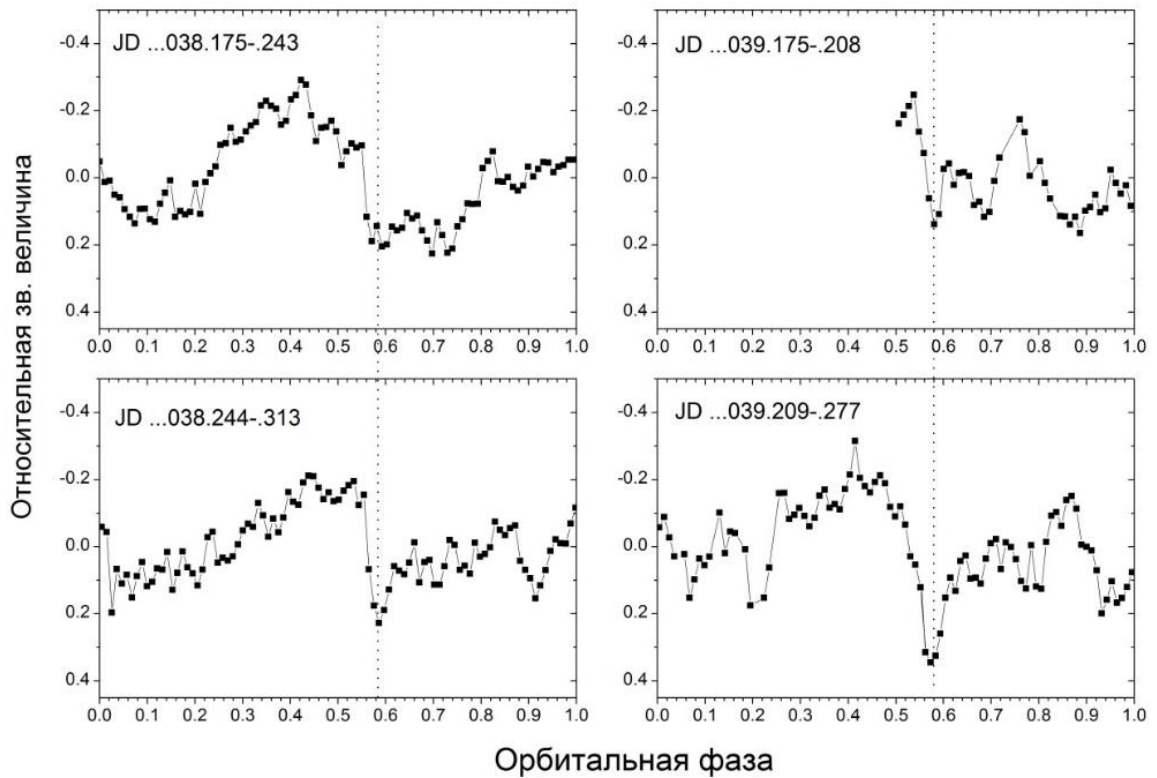


Рисунок 47. Примеры фазовых кривых блеска для отдельных орбитальных циклов двух ночей наблюдений. Указаны интервалы юлианской даты (три последние цифры) для соответствующих кривых. Пунктирная линия на фазе 0.58 соответствует фазе затменнообразного минимума.

Таблица 6. Моменты максимумов сверхгорбов в полосе R_c .

HJD 2458000+...

262.325	264.466	265.461	266.386
264.324	265.32	265.532	266.455
264.395	265.388	266.313	266.525

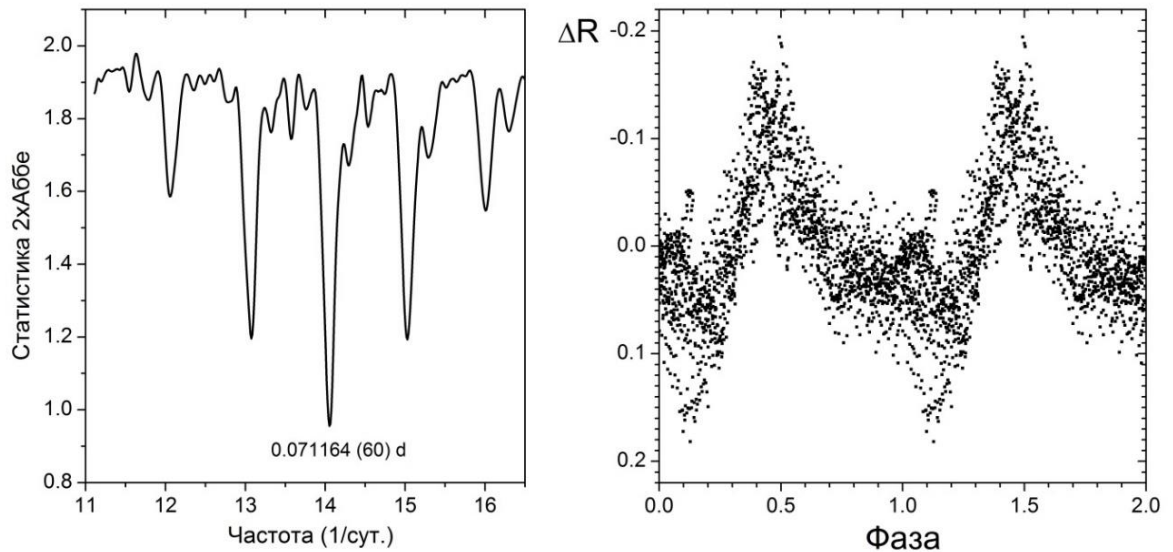


Рис. 48. Периодограмма в окрестности периода сверхгорбов, построенная по данным трех ночей сверхвыспышки 2018 г. в полосе Rс и соответствующая свертка с периодом 0.071164 сут.

Далее были определены величины О-С (разности наблюдаемых (О) и рассчитанных (С) моментов максимумов блеска сверхгорбов), рассчитанные для периода 0.071373 сут., с которым определялись аналогичные величины О-С для сверхвыспышки 2017 г. [24]. Было проведено сравнение хода О-С для различных сверхвыспышек, наблюдавшихся в 2016, 2017 [75] и 2018 гг. Результат представлен на Рис. 49. Там же приведена полученная и кривая блеска сверхвыспышки 2018 г. Наблюдения, очевидно, пришлось на ее вторую половину.

Из диаграммы видна хорошая воспроизводимость данных О-С для различных сверхвыспышек. В частности, по всем данным определен излом зависимости О-С от номера цикла в районе $E=0$, соответствующий переходу от стадии В к стадии С в эволюции периода сверхгорбов. Период на стадии С, определенный с помощью метода О-С по всем доступным данным 2016-2018 гг., оказался равен 0.071044(15) сут. Он меньше периода, полученного периодограммным методом, поскольку в последнем случае в выборку данных были включены и данные первой ночи,

приходящейся на стадию В с бóльшим периодом. Существенное отклонение последней точки на диаграмме вызвано, очевидно, тем, что она приходится на окончание стадии С (или после нее), когда основной (если не единственный) вклад в изменение блеска уже вносил орбитальный период.

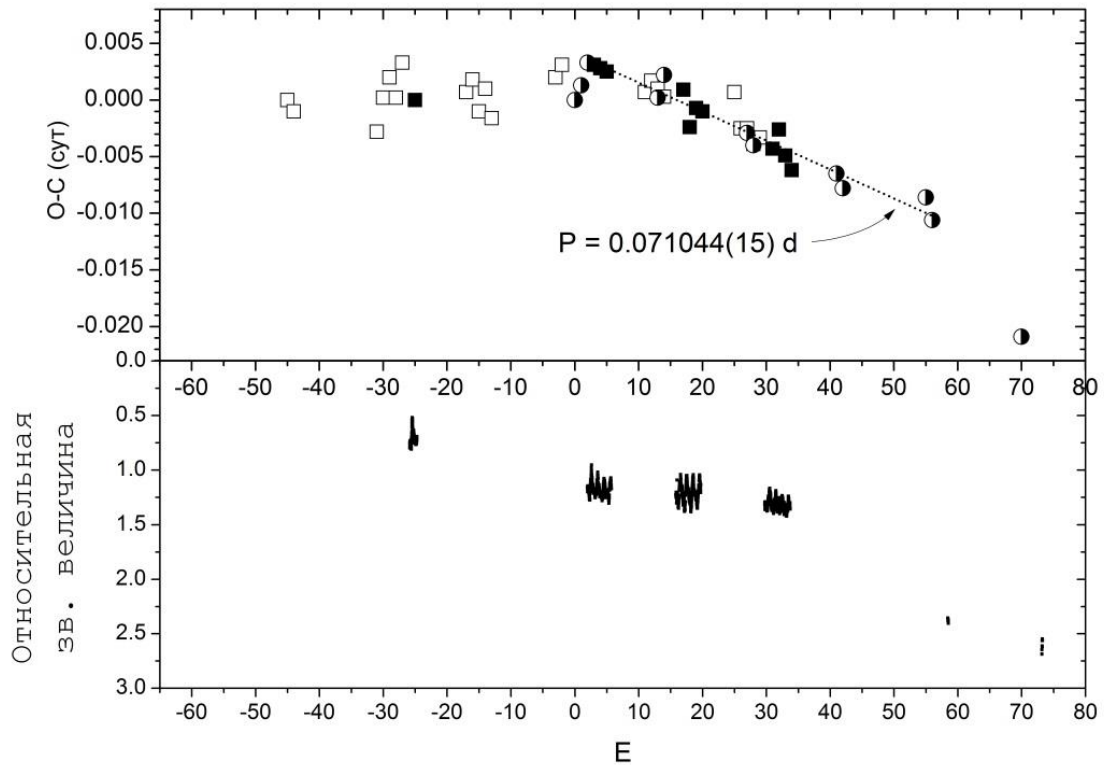


Рисунок 49. Вверху: ход О-С для моментов максимумов блеска в зависимости от номера цикла E . Заполненными квадратами обозначены наши данные 2018 г., кружками и открытыми квадратами – данные 2016 и 2017 гг. соответственно. Начальные эпохи для разных сверхвыпешек смещены до наилучшего совпадения О-С. Внизу: Кривая блеска 2018 г. Цикл $E = -25$ соответствует $JD = 2458262.3$, а $E = -40 - JD=2458268.3$.

4.3.5. Колориметрия сверхгорбов

Исходные кривые блеска в полосах $BVRcI$ приведены для каждой из трех ночей плато сверхвыпешки на Рис. 50.

Видно, что средние амплитуды кривых сверхгорбов слегка изменяются от ночи к ночи в пределах $0^m.25 - 0^m.13$ в полосе В, $0^m.27 - 0^m.17$ в полосе V и $0^m.29 - 0^m.16$ в полосе Rс, т.е., амплитуда немного увеличивалась с длиной волны. Чтобы сравнить полученные результаты с данными исследований показателей цвета других авторов (которые представлены в крайних полосах из наблюдавшихся полос спектра), были вычислены показатели цвета В-Rс по всем трем ночам (Рис. 51). Усредненная картина выглядит так: средняя амплитуда кривой в полосе Rс по трем ночам составила 0.17^m , а показателя цвета В-Rс всего 0.027^m , причем, показатель цвета В-Rс имеет тенденцию быть наиболее «голубым» в минимуме блеска сверхгорба и наиболее «красным» в его максимуме (более точно – он наиболее «красный» от максимума до середины нисходящей ветви, и наиболее «голубой» от минимума до середины восходящей ветви профиля сверхгорбов).

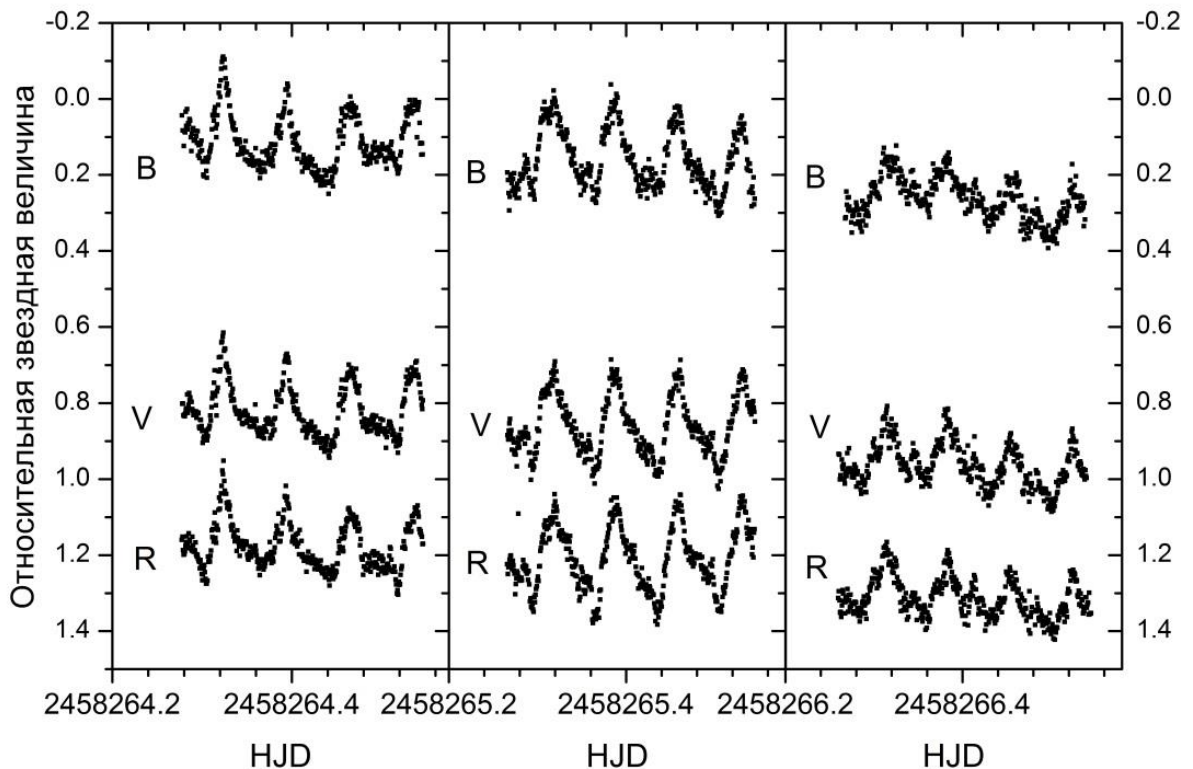


Рисунок 50. Кривые блеска для трех последовательных ночей плато сверхвспышки в полосах BVRCI.

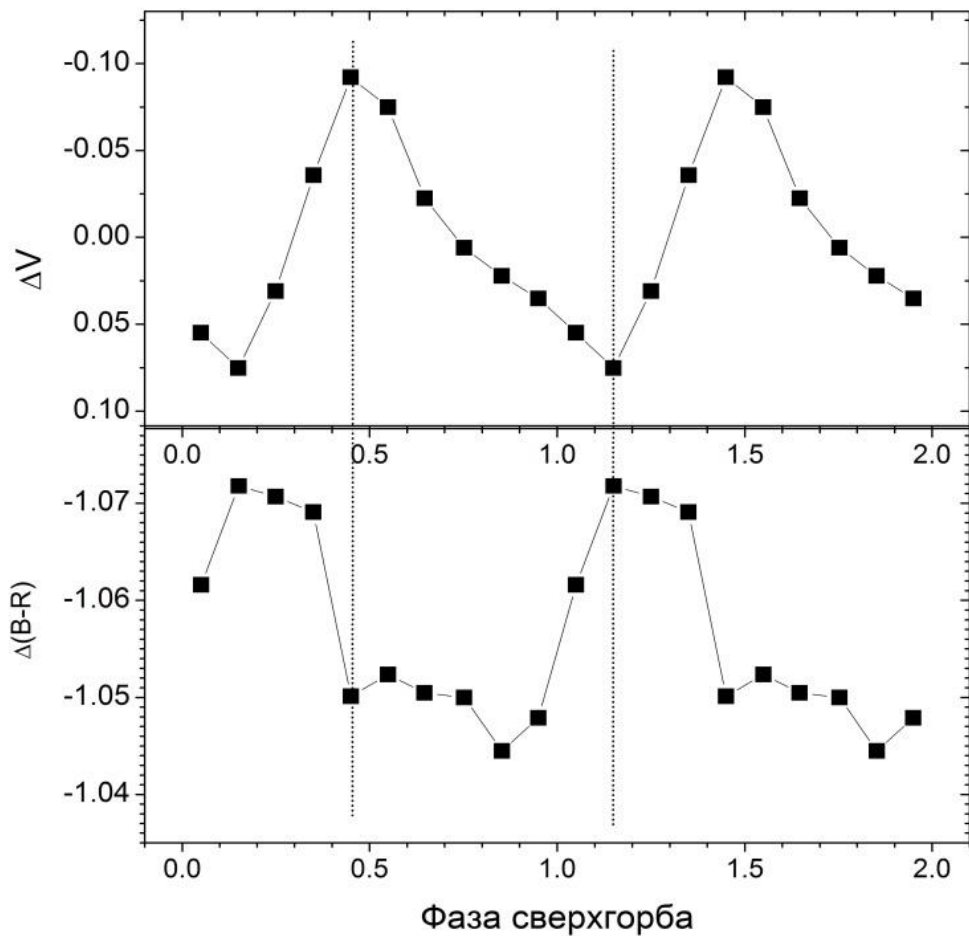


Рис. 51. Средний профиль кривой блеска в полосе Rc и показателя цвета B-Rc по трем ночам сверхвспышки 2018 г. Размер значка соизмерим с ошибкой. Линии проведены через максимум и минимум кривой блеска.

На сегодняшний день в литературе имеется не очень много данных по колориметрии положительных сверхгорбов. Однако известно, что для систем типа WZ Sge голубой пик показателя цвета имеет тенденцию совпадать с минимумом на кривой блеска положительного сверхгорба, например, показатели цвета $g'-Ic$ для CSS130418:174033+414756 [35], HV Vir и OT J012059.6+325545 [36]; $g'-I'$ для EZ Lyn [37]; B-I для SSS J122221.7-311525 [84]). В то же время, Мацуи и др. [82] сообщил о том, что голубой пик на кривой показателя цвета $g'-Ic$

приходится на восходящую ветвь профиля положительного сверхгорба у V455 And.

Подобное поведение замечено Шугаровым и др. [83] у RZ Leo для показателя цвета В-Рс. Отметим, что полученный результат согласуется с данными из литературы. Вышеупомянутые авторы замечают, что различное поведение показателей цвета может зависеть от стадии развития сверхгорбов. По их мнению, особенности показателей цвета могут иметь разную причину – эффект давления в аккреционном диске или указывать на холодную область во внешних его частях за пределами 3:1 резонансного радиуса. Совершенно очевидно, что необходимо продолжение колориметрических исследований положительных сверхгорбов на разных стадиях их развития у разных систем для увеличения статистики и в конечном итоге – для понимания особенностей аккреционного диска.

4.3.6 Выводы к главе 4

1. У карликовой новой 1RXJ1616 впервые обнаружен орбитальный период 0.06888 сут, система определена как карликовая новая с частным затмением, определены цветовые характеристики для стадии С сверхгорбов, найден интервал между соседними нормальными вспышками - 11 сут.

2. Вопреки предположению, у 1RXS J1616 мы не обнаружили наличия отрицательных сверхгорбов. Вероятно, их появление должно было бы соответствовать циклу нормальных вспышек больше 11 сут., а данный цикл можно классифицировать как относительно короткий цикл “S”.

3. В то же время у карликовой новой NY Her обнаружен период 0.01141(5) сут., который мы идентифицировали как период отрицательных сверхгорбов. Таким образом, было подтверждено предположение о том, что появление отрицательных сверхгорбов (и, видимо, переход аккреционного диска в наклонное состояние) вызывает увеличение интервала между вспышками.

Результаты, приведённые в главе, опубликованы в статьях:

Pavlenko, E., **Sosnovskij, A.**, Antoniuk, K., et al. *Humps and Superhumps in the SU UMa-Type Dwarf Nova System IRXS J161659.5+620014*. // *Astrophysics*, Volume 63, p. 491–503, 2020.

Kato, T., ... , **Sosnovskij, A.** et al. *Survey of Period Variations of Superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae. IX: The Ninth Year (2016–2017)*. // *PASJ* 69, 75, 2017.

Sosnovskij, A., Pavlenko, E., Pit, N., Antoniuk, K. *NY Her: possible discovery of negative superhumps*. // *Information Bulletin on Variable Stars*, No. 6216, #1, 2017.

Личным вкладом диссертанта в данную главу является:

Из 20 ночей наблюдений, использованных в работе, диссертантом лично получено 13 ночей на телескопе КрАО 2.6 м ЗТШ. Получение и обработка все данных наблюдений данного объекта. Участие в постановке задачи. Проведение частотного анализа, с использованием методов, описанных в Главе 1. Анализ данных, представление, интерпретация и обсуждение полученных результатов, в том числе на российских и международных конференциях.

Заключение

В работе представлены результаты и интерпретация следствий аккреционных явлений у четырёх карликовых новых типа SU UMa, имеющих различный эволюционный статус, полученные по фотометрическим наблюдениям в основном в спокойном состоянии. Это - долгопериодическая КП, находящаяся в пробеле периодов 1RXS J0038; короткопериодическая КП EZ Lyn; две КП с «промежуточным» орбитальным периодом NY Her и 1RXS J0038. В этом состоянии объекты характеризуются пониженным блеском, поэтому основные наблюдения выполнялись на 2.6-м телескопе ЗТШ КрАО в первичном фокусе. Для реализации этих наблюдений диссертантом была сконструирована и установлен в прямом фокусе ЗТШ узел приемной аппаратуры. Наблюдения проводились в течение 82 ночей. Из них диссертантом лично – 70. В анализе этих КП использовались также данные других обсерваторий, полученные в рамках международных кампаний. Задачи наблюдений были акцентированы на исследование малоизученных явлений в области КП – эволюции нерадиальных пульсаций белого карлика, особенностей поведения карликовой новой в «запрещённом» с точки зрения стандартной теории эволюции, «пробеле периодов», на поиск неизвестных ранее орбитальных периодов (ведущим к определению отношения масс) и периодов отрицательных сверхгорбов, на тестирование новых критериев поиска КП с наклонными аккреционными дисками.

В ходе исследований были получены следующие важнейшие результаты:

1. Представлены наблюдения карликовой новой типа WZ Sge EZ Lyn, содержащей пульсирующий белый карлик, в течение 57 ночей, проведённых с 2007 по 2021 гг.

2. Определены доминирующие пульсации в мини-вспышках и их окрестностях в 2007 г. после вспышки 2006 г. Их наличие указывает на то, что они не вызывали достаточный нагрев белого карлика, чтобы он покинул полосу неустойчивости. Показано, что за 10 лет после вспышки 2010 г. период пульсаций увеличивался от 257 сек. до 756 сек. и это увеличение происходило неравномерно.

3. Показано, что увеличение периода (согласно эмпирическому соотношению «Период-температура» для изолированных БК) соответствует уменьшению температуры белого карлика от $\sim 12\,050$ К до $\sim 11\,400$ К за 10 лет после вспышки 2010 г., и хорошо согласуется со спектральными оценками. В отдельные ночи зарегистрирован дрейф пульсаций на ~ 17 сек. в течение \sim пяти часов.

5. Было обнаружено, что 1RXS J0038 - система с частным затмением горячего пятна в спокойном состоянии и частным затмением диска во время вспышки и, вероятно, во время сверхвспышки.

6. Открыт орбитальный период у этой системы, равный 0.09451 сут., что соответствует положению объекта в «пробеле» орбитальных периодов. Впервые обнаружен период отрицательных сверхгорбов 0.092 сут. по данным в спокойном состоянии и в нормальной вспышке 2011 и 2012 гг.

7. Для карликовых новых 1RXS J0038 и 1RXS J1616 впервые определены отношения масс компонентов, находящиеся в хорошем согласии с теорией стандартной эволюции КП.

8. Колориметрические данные выявили многокомпонентное излучение 1RXS J0038, источниками которого, предположительно, являются горячие и холодные части аккреционного диска и горячего пятна на аккреционном диске.

9. У карликовой новой 1RXS J1616 впервые обнаружен орбитальный период 0.06888 сут., система определена как карликовая новая с частным затмением,

определены цветовые характеристики для стадии С сверхгорбов, найден интервал между соседними нормальными вспышками - 11 сут.

10. Вопреки предположению, у 1RXS J1616 мы не обнаружили наличия отрицательных сверхгорбов. Вероятно, их появление должно было бы соответствовать циклу нормальных вспышек больше 11 сут., а данный цикл можно классифицировать как относительно короткий цикл “S”.

11. В то же время, у карликовой новой NY Her обнаружен период 0.01141(5) сут., который мы идентифицировали как период отрицательных сверхгорбов. Таким образом, было подтверждено предположение о том, что появление отрицательных сверхгорбов, вызванное переходом аккреционного диска в наклонное к орбитальной плоскости состояние, вызывает увеличение цикла (интервала между вспышками).

Благодарности

Автор диссертации выражает особую благодарность научному руководителю и соавтору совместных публикаций, доктору физико-математических наук Е.П. Павленко - без ее чуткого отношения, руководства, внимания и заботы о своем коллективе эта работа была бы невозможна. Отдельно диссертант благодарит группу технического обслуживания ЗТШ под руководством инженера Дроздова И.В. – Петров С.П, Долгополов В.А., Немцев Ф.С., Зубко Н.Н., Фролов В.Б. за помощь в разработке и обслуживании аппаратуры и проведении наблюдений. Шляпникову А.А. за помощь в каталогизации и размещении базы данных на сайте КраВО. А так же ученому секретарю совета Шолуховой Ольге Николаевне за помощь и невероятное терпение!

Список литературы

1. Patterson, J. et al. “Superhumps in Cataclysmic Binaries. XXV” // 2005, PASP, 117, 1204.
2. Osaki, Y. “Dwarf-Nova Outbursts” // PASP, 108, 39, (1996).
3. Kraft, R. “Binary Stars among Cataclysmic Variables. I. U Geminorum Stars (dwarf Novae)” // ApJ, 135, 408, (1962).
4. Warner, B. “Cataclysmic Variable Stars” // Cambridge University Press, (1995).
5. Patterson, J. “The Evolution of Cataclysmic and Low-Mass X-Ray Binaries” // BAAS 15, 991, (1983).
6. Smak, J. “Eruptive Binaries. I. Hot Spots and Distorsions of the Radial Velocity Curves” // Acta Astr. 20, 311 (1970).
7. Shakura, N.I. & R.A. Sunyaev, “Black holes in binary systems. Observational appearance” // Astron. Astroph. 24, 337 (1973).
8. Knigge, C. “The donor star of cataclysmic variables” // MNRAS 373, 484 (2006).
9. Lubow, S.H. “A model for tidally driven eccentric instabilities in fluid disks” // Astrophys. J. 381, 259 (1991).
10. Whitehurst, R. “Numerical simulations of accretion disks. I – Superhumps – A tidal phenomenon of accretion disks” // MNRAS 232, 35 (1988).
11. Balbus, S.A. & J.F. Hawley, “A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis. II - Nonlinear evolution” // Astrophys. J. 376, 214 (1991).

12. Meyer, E. Meyer-Hofmeister, “On the elusive cause of cataclysmic variable outbursts” // *Astron. Astroph.* 104, L10 (1981).
13. Hoshi, R. “Progress of Theoretical Physics” // book (1979).
14. Bisikalo, D.V., Boyarchuk A.A., Kaigorodov P.V., O.A. Kuznetsov, “Morphology of the Interaction Between the Stream and Cool Accretion Disk in a Semidetached Binary System” // *Astron. Rep.* 47, 809 (2003).
15. Tapia, . S. “Discovery of a magnetic compact star in the AM Herculis/3U 1809+50 system” // *Astrophys. J.* 212, 125 (1977).
16. Hellier, C. “Cataclysmic variables. How and why they vary” // book (2001).
17. Tovmassian, G. & S. Zharikov “Accretion Disks of Bounce-Back CVs” // *IAU Symp.* 290, 149 (2013).
18. Vogt, N., Bateson, F. M. “An atlas of southern and equatorial dwarf novae.” // *A&AS*, 48, 383V, (1982).
19. Warner, B. “Observations of Rapid Blue Variables—XV: VW HYDRI” // *MNRAS*, 170, 219, (1975).
20. Bisikalo, D. V., Boyarchuk A. A., Chechetkin V. M. et al. “Three-dimensional numerical simulation of gaseous flow structure in semidetached binaries” // *MNRAS*, 300, 39, (1998).
21. O’Donoghue, D. “Observational evidence for tidal effects in cataclysmic variable accretion discs.” // *MNRAS*, 246, 29, (1990).
22. Hirose M., Osaki Y., “Hydrodynamic simulations of accretion disks in cataclysmic variables - Superhump phenomenon in SU UMa stars” // *PASJ* 42, 135 (1990).

23. Kato T., Imada A., Uemura M. et al. “Survey of period variations of superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae” // Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, SP2, S395, (2009).
24. S.H. Lubow, “A model for tidally driven eccentric instabilities in fluid disks” // *Astrophys. J.* 381, 259 (1991).
25. Murray, J. R. “The precession of eccentric discs in close binaries” // *MNRAS*, 314, L1, (2000).
26. Osaki Y. & T. Kato, “Study of Superoutbursts and Superhumps in SU UMa Stars by the Kepler Light Curves of V344 Lyrae and V1504 Cygni” // *PASJ* 65, 95 (2013).
27. Howell, S., Hoard, D.W. , Brinkworth C. et al., ““Dark matter” in the accretion disks” // *Astrophys. J.* 685, 418 (2008).
28. Uemura, M., Arai, A., Kraici, T. et al., “Discovery of a WZ Sge-Type Dwarf Nova, SDSS J102146.44+234926.3: Unprecedented Infrared Activity during a Rebrightening Phase” // *PASJ* 60, 227 (2008).
29. Horne K. & M.C. Cook, “UBV images of the Z Cha accretion disc in outburst” // *MNRAS* 214, 307 (1985).
30. Neustroev, V.V., Marsh, T.R. , S.V. Zharikov et al., “The remarkable outburst of the highly evolved post-period-minimum dwarf nova SSS J122221.7-311525” // *MNRAS* 467, 597 (2017).
31. Matsui, R., Uemura, M., Arai A. et al., “Optical and Near-Infrared Photometric Observation during the Superoutburst of the WZ Sge-Type Dwarf Nova, V455 Andromedae” // *PASJ* 61, 1081 (2009).
32. Wood, M.A., Burke, C.J. “The Physical Origin of Negative Superhumps in Cataclysmic Variables” // *Astrophys. J.* 661, 1042 (2007).

33. Smak J. “New Interpretation of Superhumps” // *Acta Astronomica*, 59, 121 (2009).
34. Pavlenko, E.P., Samsonov, D.A., Antonyuk O.I. et al., “Photometry of the dwarf nova V503 Cyg in 2010. Orbital and other periods” // *Astrofizika* 55, 494 (2012).
35. Pit N., Pavlenko, E., Antoniuk, K. et al. // *RAA*, 2020, in press.
36. Sklyanov, A., Pavlenko, E. et al., “NY Ser: Outburst Activity and Multiperiodic Processes in its Various Stages During 2014 and 2016” // *Astrophysics*, 61, 64 (2018).
37. Pavlenko, E., Kato, T., Andreev M. et al., “MN Dra—In-the-Gap Dwarf Nova With Negative Superhumps” // *AIPC* 1273, 320 (2010).
38. Pavlenko, E.P., Kato T., Antonyuk O. et al., “NY Serpentis: SU UMa-type nova in the period gap with diversity of normal outbursts” // *Publ. Astron. Soc. of Japan*, 66, 111 (2014).
39. Mukadam A.S. et al. “Mean ZZ Ceti Pulsation Period Gauges Stellar Temperature” // *ASPC* 372, 587M (2007).
40. Szkody, P., Mukadam, A., Gänsicke, B. et al. “GW Librae: Still Hot Eight Years Post-outburst” // *AJ* 152, 48S (2016).
41. Szkody, P. “A Mini-Review of Accreting Pulsating White Dwarfs” // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Volume 8, id.184 (2021).
42. Stellingwerf R. F. “Period determination using phase dispersion minimization” // *The Astrophysical Journal*, 224, 953 (1978).
43. Szkody, P., Henden, Arne, Agüeros, Marcel et al. “Cataclysmic Variables from Sloan Digital Sky Survey. V. The Fifth Year (2004)” // *AJ*, 131, 973 (2006).
44. Pavlenko, E., Shugarov S. Yu., Katysheva N.A. et al. “Discovery of the New WZ Sge Star SDSS J080434.20+510349.2” // *ASPC*, 372, 511 (2007).

45. Shears, J., Klingenberg, G., & de Ponthiere, P. "Observations of the first confirmed superoutburst of SDSS J080434.20+510349.2 in 2006 March" // J. Br. Astron. Assoc., 117, 331 (2007).
46. T. Kato, "WZ Sge-type dwarf novae" // PASJ 67, 108 (2015).
47. Mendoza, E. E. "Multicolor Photometry of Stellar Aggregates" // BOTT 4, 149M (1967).
48. Zharikov, S. , G. H. Tovmassian, V. V. Neustroev et al. "Cyclic brightening in the short-period WZ Sge-type cataclysmic variable SDSS J080434.20+510349.2" //A&A, 486, 505 (2009).
49. Kato, T., & Uemura, M. "Period Analysis using the Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (Lasso)" // PASJ, 64, 122 (2012).
50. Amantayeva, A., Zharikov, S., Page, K. L et al. "Period Bouncer Cataclysmic Variable EZ Lyn in Quiescence" // ApJ, 6918, 58A (2021).
51. Pavlenko, E., Kato, T.; Sosnovskij, A., et al "Dwarf nova EZ Lyncis second visit to instability strip" // PASJ, 66,113P (2014).
52. Pel't, Ya. "Frequency analysis of astronomical time series." // Tallin: Valgus (1980).
53. Cleveland // (1979).
54. Fernie, J. D. "Uncertainties in Period Determinations" // PASP, 101, 225 (1989).
56. Scargle, J. D. "Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data." // ApJ, 263, 835 (1982).
57. Pavlenko, E. "The white dwarf in dwarf nova SDSS J080434.20+510349.2: Entering the instability strip?" // J. of Physics Conference Series, 172, 2071, (2009).

59. Mukadam et al. “Multi-site Observations of Pulsation in the Accreting White Dwarf SDSS J161033.64-010223.3 (V386 Ser)” // *ApJ*, 714, 1702 (2010).
60. Szkody, P., Mukadam, A. S., Sion et al. “Hubble Space Telescope and Optical Data on SDSSJ0804+5103 (EZ Lyn) One Year after Outburst” // *AJ*, 145, 121 (2013).
61. Pavlenko, E.; Malanushenko, V.; Tovmassian, G. “SDSS J080434.20+510349.2: cataclysmic variable witnessing the instability strip?” // *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 83, 520, (2012).
62. Woudt, P. A., & Warner, B. “SDSS J161033.64-010223.3: a second cataclysmic variable with a non-radially pulsating primary” // *MNRAS*, 348, 599 (2004).
64. Uthas, H., Patterson, J., Kemp, J. et al. “Two new accreting, pulsating white dwarfs: SDSS J1457+51 and BW Sculptoris” // *MNRAS*, 420, 379 (2012).
65. Sosnovskij A., Pavlenko E., Pit N., Antoniuk K., “NY Her: possible discovery of negative superhumps” // *IBVS* 6216, 1 (2017);
66. Toloza, O., Szkody, P., “GW Librae: a unique laboratory for pulsations in an accreting white dwarf” // 42nd COSPAR Scientific Assembly (2018).
67. VSNET-alert 122951
68. Hirose M. and Y. Osaki, “Hydrodynamic Simulations of Accretion Disks in Cataclysmic Variables: Superhump Phenomenon in SU UMa Stars” // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 42, 135, (1990).
70. Pavlenko E.P., Kato T., Antonyuk O.I. et al., “Features of the orbital variability in the brightness of the WZ Sge type dwarf nova V1108 Her” // *Astrophysics*, 54, 483 (2011).
71. Khruzina T.S., Golysheva P.Yu., Katysheva N.A. et al., “The dwarf nova V1239 herculis in quiescence” // *Astonomy Reports*, 59, 288 (2015).

72. Sosnovskij A., Pavlenko E., Pit N., Antoniuk K.. “NY Her: possible discovery of negative superhumps” // IBVS 6216, 1 (2017).
74. Oshima T., Kato T., Pavlenko E., et al. “Discovery of Negative Superhumps during a Superoutburst of 2011 January in ER Ursae Majoris” // Publ. Astron. Soc. of Japan, 64L, 3, (2012)
75. Kato, T., Isogai, T. et al., “Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. IX. The ninth year (2016-2017)” // PASJ, 69, 75 (2017).
76. Osaki Y. “Dwarf-Nova outbursts” // Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 108, 39, (1996).
77. Montgomery M., Martin E. L. “A Common Source of Accretion Disk Tilt” // The Astrophysical Journal, 722, 989 (2010).
78. Ohshima, T., Kato, T., Pavlenko, E. “Study of negative and positive superhumps in ER Ursae Majoris” // Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, Issue 4, (2014).
79. Kato T., Osaki Y. “New Method of Estimating Binary's Mass Ratios by Using Superhumps” // Publ. Astron. Soc. of Japan, 65, 115 (2013).
81. Pavlenko E. P., Sosnovskij A.A., Katysheva N.A. et al., “Eclipsing SU UMa-Type Dwarf Nova 1RXS J003828.7+250920 During the “Period Gap”. I. Multiperiodicity and Color Features in 2011-2012” //Astrophysics, 59, 304 (2016).
82. Matsui, R., Uemura, M., Arai, A. et al., “Optical and Near-Infrared Photometric Observation during the Superoutburst of the WZ Sge-Type Dwarf Nova, V455 Andromedae” // PASJ 61, 1081 (2009).
83. Shugarov S.Y., Katysheva N.A., Chochol D., et al. “Superhump and outburst activity of the cataclysmic variable RZ LMi in the U- and optical passbands” // Astrophys Space Sci, 363, 100, (2018).

84. Neustroev, V.V., Marsh, T.R., S.V. Zharikov et al., “The remarkable outburst of the highly evolved post-period-minimum dwarf nova SSS J122221.7-311525” // MNRAS 467, 597 (2017).
85. Balanutsa P., Denisenko D., Gorbovskoy E., Lipunov V., “New Cataclysmic Variable 1RXS J161659.5+620014 in Draco” // ArXiv, 1307.7396 (2013).
86. Kato, T. et al. “Survey of Period Variations of Superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae. III. The Third Year (2010-2011)” // Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.64, No.1, article id.21, 80 pp. (2012).
87. Schlegel, D., Finkbeiner, D., Davis, M. “Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds”// ApJ, 500, 525, 1998.
88. Stehle, R. ; Ritter, H. “The chemical pollution of the secondary of a cataclysmic variable by novae” // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 309, Issue 1, pp. 245-252. (1999).