

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

На правах рукописи

**Склянов Александр Сергеевич**

**ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПЕРИОДА СВЕРХГОРБОВ НА РАЗНЫХ  
СТАДИЯХ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ КАРЛИКОВЫХ НОВЫХ  
ЗВЕЗД**

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 сотр. ФГБУН «КрАО РАН»

Павленко Е.П.

Казань – 2022

# Оглавление

<b>Введение</b> .....	4
<b>Глава 1. Обзор современного состояния проблемы. Методика ведения наблюдений и анализ данных</b> .....	24
1.1. Карликовые новые типа SU UMa.....	24
1.2. Карликовые новые типа WZ Sge.....	25
1.3. Актуальные теории возникновения сверхвыпшек и сверхгорбов .....	27
1.3.1. Модель теплового ограниченного цикла .....	28
1.3.2. Модель усиленной передачи массы .....	29
1.3.3. Модель приливно-тепловой неустойчивости.....	30
1.4. Эволюция периода сверхгорбов во время сверхвыпшки .....	32
1.5. Отрицательные сверхгорбы .....	35
1.6. Зависимость отношения масс от избытка периода.....	39
1.7. Наблюдения, их обработка и анализ. ....	40
1.7.1. Наблюдения .....	40
1.7.2. Обработка наблюдений .....	42
1.7.3. Частотный анализ .....	44
<b>Глава 2. Эволюция сверхгорбов карликовой новой звезды типа WZ Sge ASASSN-14cv на стадии повторных поярчаний (ребрайтенингов).</b> .....	46
2.1. Наблюдения и редукция данных.....	47
2.2. Анализ кривых блеска .....	49
2.3. Диаграмма O – C .....	55
2.4. Обсуждение.....	58
2.5. Выводы .....	59
<b>Глава 3. Долгопериодические катаклизмические переменные в пробеле периодов MN Dra, NY Ser и V1006 Cyg</b> .....	62
3.1. NY Ser: Выпшечная активность и мульти периодические процессы на разных её стадиях в 2014 и 2016 гг. ....	62
3.1.1. Наблюдения и редукция данных .....	63
3.1.2. Выпшечные кривые блеска 2014 и 2016 гг. ....	64
3.1.3. Выпшечная активность, циклы и сверхцикл .....	65
3.1.4. Сверхвыпшка 2014 г. ....	68
3.1.5. Короткопериодические колебания блеска на разных фазах развития нормальных выпшек и в неактивном состоянии. ....	68
3.1.6. Сверхвыпшка: анализ эволюции сверхгорбов во время сверхвыпшки 2014 г. ....	71
3.1.7. Обсуждение .....	77

3.1.8. Отношение масс.....	79
3.1.9. Сравнение с результатами других авторов.....	80
3.1.10. Выводы.....	83
3.2. Изменения периода отрицательных сверхгорбов карликовой новой типа SU UMa MN Dra (2009 - 2017 гг.).....	85
3.2.1. Изучение периодических процессов на разных стадиях вспышечной активности MN Dra в 2009 году.....	87
3.2.2. Изменения периода отрицательных сверхгорбов карликовой новой типа SU UMa MN Dra (2012 - 2017 гг.).....	91
3.2.3. Вспышечные кривые блеска 2012 и 2017 гг. ....	92
3.2.4. Кривые блеска.....	94
3.2.5. Частотный анализ данных.....	96
3.2.6. Сверхвспышки 2012 и 2017 гг.....	96
3.2.7. Неактивное состояние и нормальные вспышки 2012 – 2017 гг.....	98
3.2.8. Выделение стадии роста положительных сверхгорбов и проблема экстремально резкого уменьшения $P_{dot}$ .....	105
3.2.9. Первое обнаружение стадии роста сверхгорбов (стадии A) у MN Dra и оценка отношения масс.....	106
3.2.10. Выводы.....	107
3.3. Долгопериодическая SU UMa карликовая новая V1006 Cyg: вспышечная активность и периодичность на разных стадиях вспышечной активности.....	108
Заключение к главе 3.....	113
<b>Заключение.....</b>	<b>114</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>117</b>
<b>Приложение.....</b>	<b>131</b>

## Введение

Катаклизмические переменные – это тип тесных двойных систем, состоящих из белого карлика (главного компонента) и проэволюционировавшей звезды главной последовательности (вторичный компонент), заполнившей свою полость Роша. Вещество со вторичного компонента перетекает на главный через внутреннюю точку Лагранжа, образуя аккреционный диск вокруг белого карлика. В случае наличия у белого карлика сильного магнитного поля, перетекающее вещество образует вблизи белого карлика аккреционные колонны, идущие вдоль магнитных линий на магнитные полюса [116]. Схематичное изображение дисковой катаклизмической переменной представлено на Рис. 1.



Рис. 1. Схематичное изображение дисковой катаклизмической переменной системы. Рисунок взят из статьи «Шугаров С.Ю. Физические характеристики катаклизмических звезд // Сборник: Эруптивные звезды . – 1996. – С. 101–116» (<http://www.astronet.ru/db/msg/1169756>).

Карликовые новые являются подтипом катаклизмических переменных. Данные системы характеризуются наличием периодических вспышек с амплитудой  $2 - 6^m$  с характерной продолжительностью от нескольких дней до нескольких недель. В качестве механизма возникновения данных вспышек принято считать появление тепловой неустойчивости в аккреционном диске, что приводит к росту вязкости и увеличению темпа падения вещества из аккреционного диска на белый карлик, высвобождая тем самым гравитационную энергию [116].

Распределение орбитальных периодов катаклизмических переменных показывает значительно меньшее количество систем с периодами, находящимися в промежутке от 2.15 до 3.18 часов. Данный промежуток получил название «пробел (или провал) периодов» (“period gap”) и связан с переключением механизма потери углового момента системой с магнитного торможения (для систем с периодами больше 3.18 часов) и излучением гравитационных волн (для систем с периодами меньше 2.15 часов) [46]. На рисунке 2 приведено распределение орбитальных периодов обнаруженных полу-разделенных систем, состоящих из белого карлика и мало-массивной вторичной звезды, заполнившей свою полость Роша [78].

Стоит отметить, что существует одна карликовая новая система - V485 Cen, орбитальный период которой составляет 59 минут, что находится ниже теоретического предела ( $P_{\min}=76.2$  минут). Это объясняется наличием коричневого карлика в качестве вторичного компонента [94].

Вспышечная активность и спектральная переменность встречается в различных типах тесных двойных систем и, в большинстве случаев, может быть объяснена изменениями в темпе выпадения вещества на компактный компонент двойной системы. В качестве причины переменности аккреции

были предложены две различные модели:

1) Переменность перетекания вещества со вторичного компонента на главный из-за ионизации поверхностного слоя холодной звезды [7; 79; 118];

2) Нестабильность в аккреционном диске, которая модулирует выпадение вещества на главный компонент [65; 77; 52].

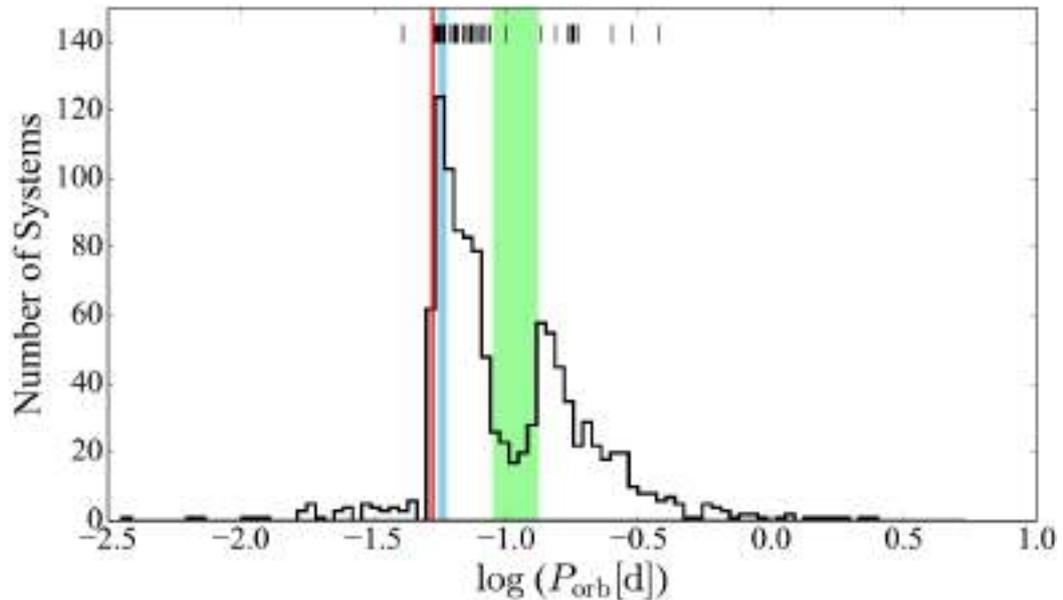


Рис. 2. Распределение орбитальных периодов 1144 полу-разделенных систем, состоящих из белого карлика и мало массивной вторичной звезды, заполнившей свою полость Роша [97]. Системы с орбитальными периодами  $P_{\text{orb}} \leq 75$  минут относятся к типу переменных AM CVn и системам с проэволюционировавшим вторичным компонентом. Зеленая полоса показывает «пробел периодов» ( $2.15 \leq P_{\text{orb}} \leq 3.18$  часов [46]), синяя полоса указывает на «пик периодов» ( $80 \leq P_{\text{orb}} \leq 86$  минут [17]), красная линия обозначает нижнюю границу периодов  $P_{\text{min}} = 76.2$  минуты [46]. Рисунок взят из статьи [78].

Для объяснения возникновения вспышек у карликовых новых, была

предложена модель так называемого «ограниченного цикла» (limit-cycle), в которой причиной модуляции выпадения вещества на главный компонент, является существование двух разных состояний аккреционного диска с разными показателями вязкости  $\mu$ . Зависимость вязкости  $\mu$  от поверхностной плотности диска  $\Sigma$  показана на рис 3.

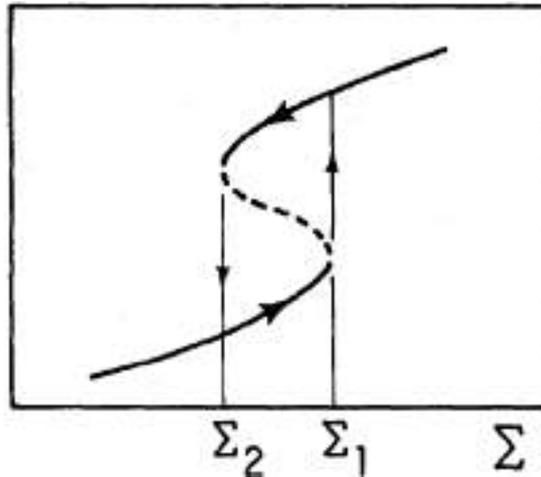


Рис. 3. Зависимость  $\mu$  от  $\Sigma$  для модели ограниченного цикла. Рисунок взят из статьи [8].

Сам цикл происходит следующим образом: 1) в состоянии низкой вязкости диск набирает массу увеличивая  $\Sigma$ , стремясь достичь равновесного состояния; 2) когда поверхностная плотность достигает значения  $\Sigma_1$ , то  $\mu$  перескакивает на верхнюю ветвь кривой, делая вязкость настолько большой, что  $\Sigma$  уменьшается; 3) когда  $\Sigma$  достигает значения  $\Sigma_2$ , то  $\mu$  переходит на нижнюю ветвь кривой и цикл повторяется. Таким образом, цикл может развиваться так, чтобы диск эволюционировал к состоянию с большой массой (высокая  $\Sigma$ ) в течение длительного времени (низкая  $\mu$ ), что соответствует спокойному состоянию карликовой новой. Далее диск быстро (высокая  $\mu$ ) эволюционирует к состоянию с низкой массой (низкая  $\Sigma$ ), что

соответствует вспышке [8]. В качестве механизма скачкообразного изменения вязкости в аккреционном диске была предложена ионизация водорода [100], таким образом, состояние с низкой вязкостью соответствует нейтральному водороду, а состояние с высокой вязкостью – ионизованному.

В зависимости от того, в каком месте аккреционного диска возникла тепловая неустойчивость, вспышки карликовых новых делят на 2 типа. К вспышкам типа “outside-in” относят такие, в которых неустойчивость возникает во внешних областях диска и распространяется во внутрь. Кривые блеска таких вспышек показывают быстрый рост блеска до максимума с более медленным ослаблением. У вспышек типа “inside-out” неустойчивость возникает во внутренних областях диска и распространяется во внешние. Кривые блеска вспышек данного типа показывают более симметричные профили [100].

Применительно к карликовым новым типа SU UMa, тепловая неустойчивость описывает возникновение нормальных вспышек у данных систем, однако она не в состоянии объяснить такие явления как сверхвспышки и сверхгорбы.

Сверхвспышками у карликовых новых типа SU UMa называют значительно более продолжительные (в 5-10 раз) вспышки с большей амплитудой увеличения блеска, чем нормальные вспышки данной системы. Во время таких вспышек наблюдаются колебания блеска с периодом на несколько процентов превышающим орбитальный период системы ( $P_{sh} > P_{orb}$ ). Такие колебания получили название “положительные сверхгорбы”. В теории приливно-тепловой неустойчивости появление сверхгорбов объясняют возникновением апсидальной прецессии эллиптического аккреционного диска. Период сверхгорбов связан с периодом прецессии аккреционного

диска следующим соотношением:

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

где -  $P_{sh}$  – период сверхгорбов,  $P_{orb}$  – орбитальный период системы и  $P_{prec}$  – период апсидальной прецессии аккреционного диска. В качестве механизма возникновения дополнительного излучения, которое наблюдается в виде «горба» на кривой блеска, предполагается приливное возмущение в аккреционном диске. Эти возмущения приводят к тому, что вещество, движущееся по эллиптическим орбитам во внешних слоях аккреционного диска, начинает пересекаться с веществом, движущимся по круговым орбитам во внутренних слоях диска, что приводит к столкновению и выделению энергии [51]. Модельное изображение пересекающихся орбит показано на рисунке 4.

Данное предположение подтверждается наблюдениями и моделированием затмений карликовой новой Z Cha во время сверхвспышки [61]. График распределения света, создающего сверхгорб по поверхности аккреционного диска представлен на рисунке 5.

На этом графике видно, что излучение, формирующее сверхгорб, приходит из трех областей на внешнем краю диска, где идет пересечение частиц. Более подробно актуальные теории возникновения сверхвспышек и сверхгорбов будут рассмотрены в главе 1.

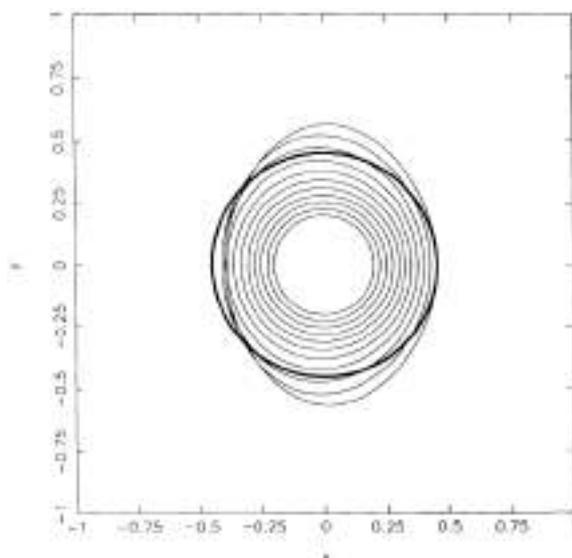


Рис. 4. Орбиты свободных частиц в потенциале силы тяжести двойной системы при отношении масс  $q = 0.2$ . Пересечения орбит происходят в области отрицательных значений оси  $x$ . Рисунок взят из статьи [51].

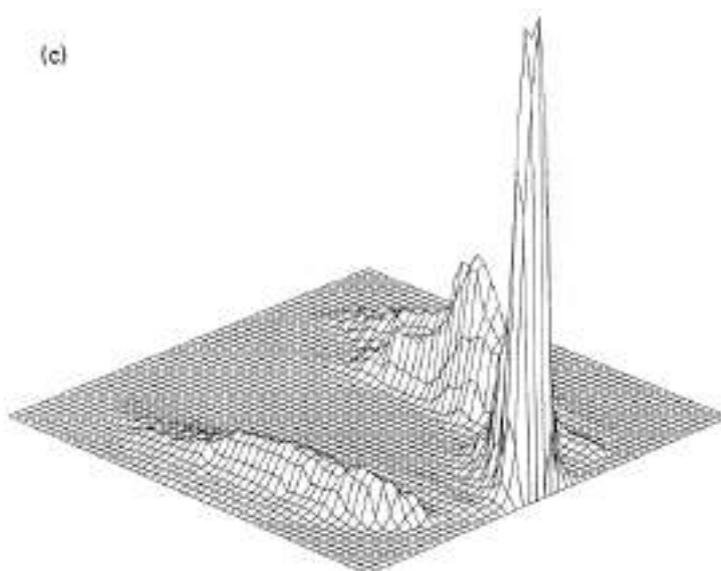


Рис. 5. График распределения света, создающего сверхгорб по поверхности аккреционного диска карликовой новой Z Cha. Рисунок взят из статьи [61].

Изучение данных систем дает нам возможность получить информацию об эволюции процессов, происходящих в аккреционных дисках катаклизмических переменных.

Сложностью изучения данных объектов является необходимость получения длительных по времени и достаточными по точности рядов наблюдений, охватывающих значительную часть сверхцикла изучаемой системы. Поэтому, для изучения подобных систем часто привлекаются наблюдения, полученные на разных телескопах, что требует их последующего сведения и совместного анализа.

Перед диссертантом была поставлена задача подробного фотометрического изучения нескольких карликовых новых систем разных типов (типа SU UMa и WZ Sge) для изучения эволюции положительных и отрицательных сверхгорбов на разных стадиях вспышечной активности - во время сверхвспышек, повторных поярчаний (rebrightenings) и в спокойном состоянии между вспышками.

### **Актуальность работы**

Несмотря на более чем полувековое изучение поздней стадии эволюции тесных двойных систем – катаклизмических переменных – в исследовании этих звёзд остаётся много белых пятен. Одна из нерешённых проблем касается характера потери вещества (постоянное истечение вещества или переменное) вторичным компонентом системы, которое приводит к тепловой нестабильности аккреционных дисков и вспышке карликовой новой. Одним из индикаторов той или иной концепции может быть различное изменение радиуса аккреционного диска звёзд типа SU UMa между вспышками и сверхвспышками. Другая проблема – это определение ключевого параметра системы – отношения масс компонентов. И хотя стандартная модель эволюции, связывающая отношение масс с орбитальным периодом системы, в среднем неплохо согласуется с наблюдениями, существующий разброс

наблюдательных данных требует своего объяснения, как и то, что требуются новые наблюдения звёзд в большом диапазоне орбитальных периодов (типа SU UMa и WZ Sge) – от пробела в распределении орбитальных периодов (2-3 часа) до короткопериодической границы (~76 мин).

Исследование эволюции периодов положительных и отрицательных сверхгорбов, их появления и исчезновения на разных стадиях вспышечной активности позволяет нам изучать прецессионные процессы, происходящие в аккреционном диске, условия необходимые для возникновения приливной и нодальной неустойчивостей. Анализ изменения сверхцикла системы и характерного времени между нормальными вспышками, позволяет нам получить представление о влиянии эволюции аккреционного диска на вспышечную активность карликовой новой.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

Целью данной работы было подробное фотометрическое изучение нескольких карликовых новых систем путём получения данных об эволюции положительных и отрицательных сверхгорбов на разных стадиях вспышечной активности.

Перед соискателем были поставлены следующие задачи:

- 1) получение длительных фотометрических наблюдений долгопериодических систем типа SU UMa в пробеле периодов – NY Ser и MN Dra, и короткопериодической системы типа WZ Sge - ASASSN-14cv, которые охватывали бы разные стадии их вспышечной активности; определение характеристик вспышек;
- 2) вывод о наличии сверхгорбов (положительные или отрицательные) в аккреционном диске на разных стадиях активности (во вспышке,

- сверхвспышке, повторных поярчаниях, минимуме блеска), их характеристики и эволюция; вывод о наличии других периодичностей;
- 3) Оценка отношения масс компонентов. Вывод о соответствии изменений периодов сверхгорбов существующим теориям приливной и тепловой неустойчивости.

### **Научная новизна**

Данная работа использует уникальные (новые) ряды наблюдений, большая часть которых получена соискателем, охватывающие различные стадии вспышечной активности исследуемых карликовых новых звезд, что позволяет измерить характерное время возникновения и продолжительность нормальных вспышек, а также определить длину сверхцикла. Точность полученных данных позволяет обнаружить короткопериодические колебания блеска, измерить их моменты максимумов и определить периоды, что даёт возможность классифицировать данные колебания и использовать результат для определения физических параметров системы. Впервые получены оценки отношения масс для NY Ser и MN Dra. Впервые обнаружены отрицательные сверхгорбы у карликовой новой NY Ser.

### **Научная и практическая значимость**

Полученные результаты представляют собой подробные изучения эволюции периодов сверхгорбов на разных стадиях вспышечной активности. Эти данные могут использоваться как для развития или улучшения теории возникновения неустойчивостей в аккреционном диске в целом, так и для улучшения нашего представления об аккреционных процессах, происходящих на мало изученных стадиях вспышечной активности

(ребрайтенинги у звезд типа WZ Sge, отрицательные сверхгорбы во время сверхвспышки). Также результаты данной работы могут улучшить наше понимание физики карликовых новых попадающих в «пробел» периодов. Полученный материал может быть использован в процессе обучения студентов и аспирантов на кафедрах астрономии.

### **Методология и методы исследования**

Полученные на телескопах ПЗС-изображения проходили процесс стандартной обработки с применением калибровочных кадров (bias, dark, flat). Звездная величина исследуемой переменной измерялась методами относительной фотометрии. Моменты максимумов для всех ночей, где это было возможно, определялись при помощи комбинирования метода совмещения хорошо прописанного профиля сверхгорба с изучаемой кривой блеска и метода хорд. Частотный анализ проводился с использованием метода Стеллингверфа [106]. Для изучения эволюции сверхгорбов строились диаграммы O-C.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. У карликовой новой типа WZ Sge ASASSN-14cv было обнаружено восемь ребрайтенингов; получен средний период сверхгорбов для стадии ребрайтенингов  $0.^d06042(8)$ , совпадающий с периодом положительных сверхгорбов стадии В сверхвспышки  $0.^d06042(1)$ ; обнаружено глобальное уменьшение периода сверхгорбов в течение ребрайтенингов со скоростью  $P_{\text{dot}} = -1.1 \times 10^{-5}$ .

2. По наблюдениям карликовой новой NY Ser впервые была построена диаграмма хода O-C максимумов положительных сверхгорбов для

сверхвспышки этой системы, имеющая 2 варианта интерпретации. Во время сверхвспышки была впервые выделена стадия роста положительных сверхгорбов (А), а также впервые обнаружены отрицательные сверхгорбы. Получены средние значения периодов сверхгорбов: на стадии А -  $P_{sh}=0.^d1091(1)$  (для var1) и  $P_{sh}=0.^d107$  (для var2); стадии В -  $0.^d10464(9)$ ; отрицательных сверхгорбов -  $0.^d0938(1)$ .

3. У карликовой новой MN Dra обнаружен циклический характер изменения периода отрицательных сверхгорбов от одной нормальной вспышки к другой: В спокойном состоянии период увеличивается, а во время самой вспышки - быстро уменьшается, что соответствует циклическому изменению радиуса аккреционного диска. Такое поведение находится в согласии с теорией приливно-тепловой нестабильности аккреционного диска.

4. Получены оценки отношения масс: для NY Ser –  $q=0.404(25)$  (для 1-го варианта интерпретации диаграммы О-С – var1) и  $q=0.308(27)$  (для 2-го варианта интерпретации диаграммы О-С – var2); для MN Dra -  $q=0.327(5)$ .

### **Достоверность и апробация работы**

Представленные результаты имеют достаточную достоверность и обоснованность, определяемую большим объемом полученного уникального наблюдательного материала на значительном промежутке времени. Полученные результаты находятся в согласии с результатами других авторов, полученных для подобных объектов.

Основные результаты и выводы данной работы представлялись на следующих конференциях:

«Физика Космоса» (с. Слобода, Россия, 2010)

«Астрономия на стыке наук - Астрофизика, Космология и Гравитация,

Радиоастрономия, Космомикрофизика, Астробиология» (Одесса, Украина, 2010)

«17-th European White Dwarf Workshop» (Tubingen, Germany, 2010)

«Golden age of cataclysmic variables and related objects – IV» (Palermo, Italy, 2017)

«Итоговая научная конференция КФУ» (Казань, Россия, 2018)

«Итоговая научная конференция КФУ» (Казань, Россия, 2020)

«Итоговая научная конференция КФУ» (Казань, Россия, 2021)

«Физика Космоса» (с. Слобода, Россия, 2021)

Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021 "Астрономия в эпоху многоканальных исследований" (Москва, 2021)

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 137 страниц, из них 116 страницы текста, включая 46 рисунков, 4 таблицы (не считая таблиц, вынесенных в Приложение). Список используемой литературы включает в себя 121 ссылку на 14 страницах. Приложение занимает 7 страниц общего объема диссертации.

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы, показана актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи исследования. Представлены основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту. Показана их научная новизна и практическая значимость. Приведены списки конференций и научных статей, подтверждающих достоверность и достаточную апробацию.

**В первой главе** приводится обзор современного представления о

катаклизмических переменных звездах, использованных методик ведения наблюдений и анализа данных. В разделе 1.1 описываются основные особенности карликовых новых звезд типа SU UMa, дается определение понятиям «сверхгорбы» и «сверхцикл». Раздел 1.2 посвящен карликовым новым типа WZ Sge, наблюдаемым характеристикам сверхвыпешек у данной подгруппы звезд. Вводятся понятия «ранние сверхгорбы» и дается современное теоретическое представление о данном явлении. Дается определение «повторным поярчаниям (ребрайтенингам)» и приводится их морфологическая классификация. В разделе 1.3 представлены актуальные теории возникновения сверхвыпешек и сверхгорбов. Раздел 1.3.1 посвящен модели теплового ограниченного цикла. Дается теоретическое объяснение феноменов сверхвыпешки и сверхгорбов, рассматриваются сильные и слабые стороны данной модели. В разделе 1.3.2 рассматривается модель усиленной передачи массы, её теоретическое описание, сильные и слабые стороны данной модели. Раздел 1.3.3 посвящен рассмотрению модели приливно-тепловой неустойчивости аккреционного диска. Дается подробное описание теоретической основы данной модели. В разделе 1.4 представлена классификация стадий эволюции периода положительных сверхгорбов во время сверхвыпешки. Дается описание каждой из стадий эволюции периода сверхгорбов и приводится формула, описывающая апсидальную прецессию аккреционного диска. Раздел 1.5 посвящен отрицательным сверхгорбам. Дается определение данного феномена, его связь с нодальной прецессией аккреционного диска. Рассматриваются основные теории, описывающие механизмы, которые могут приводить к наклону аккреционного диска у карликовых новых систем. В разделе 1.6 рассматривается связь между отношением масс компонентов и избытком периода. Вводится понятие

«избыток периода  $\varepsilon$ », приводятся формулы расчета отношения масс  $q(\varepsilon)$ . **Раздел 1.7** посвящен полученным наблюдениям, их обработке и анализу. В **разделе 1.7.1** дается краткое описание использованных для наблюдений телескопов и использованных фильтров. Перечисляются получаемые калибровочные кадры и их физический смысл. Приводятся основные принципы подбора экспозиции и звезд сравнения. **Раздел 1.7.2** посвящен обработке полученных ПЗС кадров. Дается описание процедуры калибровки изображений, факторов, влияющих на точность измерений звездной величины. Приводятся графики зависимости точности измерения от звездной величины объекта для двух разных телескопов. **Раздел 1.7.3** посвящен частотному анализу полученных данных. Приводится описание процедуры подготовки данных для частотного анализа.

Вторая глава посвящена эволюции сверхгорбов карликовой новой звезды типа WZ Sge ASASSN-14cv на стадии повторных поярчаний (ребрайтенингов). **Раздел 2.1** посвящен наблюдениям данного объекта и включает в себя описание использованных телескопов и их ПЗС матриц, фильтров и звезд сравнения. Приведена карта сравнения для звезды ASASSN-14cv. В **разделе 2.2** приведен анализ полученных кривых блеска. Дается описание наблюдавшихся на данном отрезке времени вспышек, указаны их амплитуды и характерное время между ними. Для тех вспышек, где это было возможно, указан тип «inside-out» или «outside-in». Показано наличие короткопериодических колебаний блеска на разных стадиях вспышечной активности с указанием их амплитуд. Представлены результаты частотного анализа с указанием наиболее значимого периода и фазовая кривая с ним. Даны результаты наблюдений через 245 дней после начала сверхвспышки с описанием. **Раздел 2.3** посвящен диаграмме O-C.

Представлена таблица со всеми измеренными моментами максимумов блеска сверхгорбов и построенная по ним диаграмма O-C. Приведен анализ полученной диаграммы и возможные интерпретации полученных периодов. Дана уточненная диаграмма O-C для интерпретации двумя периодами. **В разделе 2.4** приводятся обсуждения полученных результатов и сравнение с работами других авторов. **В разделе 2.5** представлены выводы по данному объекту и указан личный вклад соискателя в изучение данного объекта. Дано заключение к главе 2.

**В третьей главе** описываются результаты изучения долгопериодических катаклизмических переменных в пробеле периодов MN Dra, NY Ser и V1006 Cyg. **В разделе 3.1** рассматривается карликовая новая NY Ser, её вспышечная активность и мульти периодические процессы на разных стадиях в 2014 и 2016 гг. Описывается история обнаружения и изучения данного объекта в более ранних работах. **В разделе 3.1.1** описываются полученные наблюдения и их редукция. Дано описание использованных телескопов и ПЗС матриц, фильтров и звезд сравнения. **В разделе 3.1.2** представлены вспышечные кривые блеска для 2014 и 2016 гг. Дано описание полученных кривых блеска. **Раздел 3.1.3** посвящен вспышечной активности, циклам и сверхциклам. Приведено описание характеристик вспышек: амплитуда, продолжительность и характерный промежуток между вспышками. Дана оценка величине сверхцикла системы. **В разделе 3.1.4** дается описание сверхвспышки 2014 года. Приведены значения амплитуды, продолжительности и скорости ослабления блеска. **Раздел 3.1.5** посвящен короткопериодическим колебаниям блеска на разных фазах развития нормальных вспышек и в неактивном состоянии. Показаны примеры индивидуальных кривых блеска на разных стадиях вспышечной активности, демонстрирующих

короткопериодические колебания блеска. Приведены амплитуды данных колебаний. Показаны результаты частотного анализа для участков нормальных вспышек и спокойного состояния. Дано значение наиболее вероятного периода и построена фазовая кривая с ним. **В разделе 3.1.6** рассматривается анализ эволюции сверхгорбов во время сверхвспышки 2014 г. Представлены индивидуальные кривые блеска во время сверхвспышки, показывающие наличие короткопериодических колебаний блеска. Даны результаты частотного анализа данных, с интерпретацией полученных периодов. Представлена таблица с моментами максимумов сверхгорбов и построенная по ним диаграмма О-С. Показаны два варианта интерпретации диаграммы О-С с объяснением всех обнаруженных периодов. **Раздел 3.1.7** представляет собой обсуждение полученных результатов. **В разделе 3.1.8** дается оценка отношения масс системы по его зависимости от избытка периода для обоих вариантов интерпретации диаграммы О-С. **Раздел 3.1.9** посвящен сравнению полученных значений отношения масс с работами других авторов. **В разделе 3.1.10** обобщены полученные результаты и описан личный вклад соискателя в данную работу. **Раздел 3.2** посвящен изучению изменений периода отрицательных сверхгорбов карликовой новой типа SU UMa MN Dra в 2009 - 2017 гг. Дана история обнаружения и изучения данного объекта в более ранних работах. **В разделе 3.2.1** представлено изучение периодических процессов на разных стадиях вспышечной активности MN Dra в 2009 году. Дано описание использовавшихся телескопов и их ПЗС матриц. Приведены диаграммы О-С для положительных сверхгорбов во время сверхвспышке и для отрицательных сверхгорбов во время нормальных вспышек и спокойного состояния. Даны полученные результаты и личный вклад соискателя в данную работу. **Раздел 3.2.2** посвящен изучению

изменений периода отрицательных сверхгорбов карликовой новой типа SU UMa MN Dra в 2012 - 2017 гг. Дано описание использованных телескопов и их ПЗС матриц, фильтров и звезд сравнения. В разделе 3.2.3 рассматриваются вспышечные кривые блеска 2012 и 2017 гг. Приведены характеристики зарегистрированных вспышек: амплитуда, продолжительность и характерное время между вспышками. Дана оценка величине сверхцикла системы. Раздел 3.2.4 посвящен индивидуальным кривым блеска на разных стадиях вспышечной активности. Даны характеристики наблюдаемых короткопериодических колебаний. В разделе 3.2.5 описаны методы частотного анализа. Раздел 3.2.6 посвящен частотному анализу данных для участков сверхвспышек 2012 и 2017 гг. Отмечены наиболее значимые периоды, приведена таблица с моментами максимумов положительных сверхгорбов. В разделе 3.2.7 даны результаты частотного анализа данных для участков спокойного состояния и нормальных вспышек 2012 и 2017 гг. Отмечены наиболее значимые периоды, приведена таблица с моментами максимумов отрицательных сверхгорбов. Приведены диаграммы O-C для отрицательных сверхгорбов. Дано описание полученных диаграмм и сравнение результатов с работами других авторов и теорией. В разделе 3.2.8 рассматривается вопрос выделения стадии роста положительных сверхгорбов и проблема экстремально резкого уменьшения  $P_{dot}$ , которая наблюдалась в более ранних работах. Дано описание проблемы и её объяснение. Раздел 3.2.9 посвящен первому обнаружению стадии роста сверхгорбов (стадии A) у MN Dra и оценке отношения масс. В разделе 3.2.10 приведены полученные результаты, описан личный вклад соискателя в данную работу. В разделе 3.3 представлено изучение долгопериодической SU UMa карликовой новой V1006 Cyg. Показана её вспышечная активность и периодичность на разных

стадиях вспышечной активности. Дано описание использованных телескопов и фильтров. Приведены характеристики наблюдаемых вспышек: амплитуды, продолжительности и характерное время между вспышками. Приведен частотный анализ короткопериодических колебаний и дана оценка отношению масс в системе. Представлены полученные результаты и личный вклад соискателя в данную работу. Дано заключение к главе 3.

В **заключении** приводятся результаты, выносимые соискателем на защиту.

**Приложение** содержит журналы наблюдений для звезд ASASSN-14cv, NY Ser и MN Dra. В таблицах приведены названия телескопов, начало и конец наблюдений, фотометрическая система и качество изображений.

#### **Список публикаций автора по теме диссертации**

1. Pavlenko E., Kato T., Andreev M. ... **Sklyanov A.** et al. MN Dra—In-the-Gap Dwarf Nova With Negative Superhumps // 17th European White Dwarf Workshop. AIP Conference Proceedings. – 2010. – V. 1273. – I. 1. – P. 320–323.
2. Kato T., Dubovsky P. A., Kudzej I., ... **Sklyanov A.** et al. Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. VI. The sixth year (2013-2014) // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2014. – V. 66. – I. 5. – ID 90. – P. 1–71.
3. **Sklyanov A. S.**, Pavlenko E. P., Antonyuk O. I. et al. Superhump evolution of WZ Sge-type dwarf nova ASASSN-14cv at rebrightening stage // Astrophysical Bulletin. – 2016. – V. 71. – I. 3. – P. 293-301. (**Склянов А. С.**, Павленко Е. П., Антонюк О. И. и др. Эволюция сверхгорбов карликовой новой звезды типа WZ Sge ASASSN-14cv на стадии повторных поярчаний // Астрофизический бюллетень. – 2016. – Т. 71. – № 3. – С. 317–326)

4. **Sklyanov, A. S.**; Pavlenko, E. P.; Antonyuk, O. I. et al. NY Ser: Outburst Activity and Multiperiodic Processes in its Various Stages During 2014 and 2016 // *Astrophysics*. – 2018. – V. 61. – I. 1. – P. 64-82.
5. Pavlenko E. P., Shugarov S. Yu., Simon A. O., ... **Sklyanov A. S.** et al. Long-period SU UMa dwarf nova V1006 Cygni: outburst activity and variability at different brightness states in 2015 — 2017 // *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*. – 2018. – V. 48. – № 2. – P. 339-355.
6. **Sklyanov A. S.**, Pavlenko E. P., Antonyuk K. A. et al. Variations in the Period of Negative Superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae. I. MN Dra (2012-2017) // *Astrophysics*. – 2020. – V. 63. – I. 2. – P. 200–216.

#### **Личный вклад автора**

Результаты данной работы были основаны на наблюдениях, проведенных в 2012-2017 гг. Из 341 использованных ночей наблюдений соискателем лично были проведены наблюдения в течение 126 ночей. Значительная часть фотометрической обработки проводилась соискателем лично. Определение моментов максимумов, частотный анализ и построение диаграмм О-С по данным, проведенным в тексте диссертации, полностью проводилось соискателем лично.

В работах 1-6 автором лично проведена и обработана часть наблюдений. В работах 3, 4, 6 – определение моментов максимумов, частотный анализ и диаграммы О-С полностью проводились соискателем. В работах 3, 4, 6 соискатель участвовал в постановке задачи, анализе полученных результатов и написании текста статей.

## Глава 1

### Обзор современного состояния проблемы. Методика ведения наблюдений и анализ данных

#### 1.1. Карликовые новые типа SU UMa

Звезды типа SU UMa были выделены в отдельный подтип карликовых новых в 1952 году и получили свое название от звезды прототипа своего класса. Помимо наличия нормальных вспышек блеска, наблюдающихся у карликовых новых звезд, у данного подтипа также присутствуют сверхвспышки, которые в среднем на  $0.7^m$  ярче и в 5-10 раз более продолжительные, чем нормальные вспышки у данных систем [116]. Также, во время сверхвспышек, были обнаружены короткопериодические колебания блеска, получившие название – сверхгорбы. Период сверхгорбов, как правило, на несколько процентов больше орбитального периода системы. С момента обнаружения сверхгорбов во время сверхвспышки [112; 115], их наличие стало необходимым условием определения сверхвспышки. Время, проходящее между двумя последующими сверхвспышками, называют сверхциклом данной звезды. В конкретной системе, количество нормальных вспышек, происходящих между последовательными сверхвспышками может значительно меняться. Для примера, звезда VW Hui, имеющая четкое время повторения сверхвспышек, может иметь от 3-х до 8-и нормальных вспышек за сверхцикл. Яркость и изменения цвета при росте блеска до максимума сверхвспышки в среднем неотличимы от соответствующих значений для нормальных вспышек. Например, задержка роста блеска в коротковолновом диапазоне относительно оптического у звезды VW Hui [111], также как и скорость роста блеска в оптическом диапазоне, одинаковы для обоих типов

вспышек [112; 115; 6; 114; 95]. Орбитальные периоды катаклизмических переменных типа SU UMa находятся в пределах от  $76.2 \pm 1.0$  минут до  $3.18 \pm 0.04$  часов [46].

Средняя масса белого карлика для карликовых новых типа SU UMa оценивается в  $0.75 \pm 0.05$  масс Солнца [46]. Диапазон масс вторичных компонент двойной системы можно оценить, используя значения отношения масс  $q=M_2/M_1$  приведенные на рисунке 167 работы Като и др. [43]. Приняв диапазон значений  $q = 0.03 - 0.4$  и среднюю массу главного компонента равную  $0.75$  масс Солнца, получается, что массы вторичных компонент находятся в диапазоне  $0.0225 - 0.3$  солнечных масс.

Характерный темп перетекания вещества со вторичного компонента на главный для карликовых новых типа SU UMa находится в пределах от  $\sim 10^{15} - 10^{18}$  г/с ( $\sim 10^{-9} - 10^{-12}$   $M_{\odot}$ /год) [21].

## **1.2. Карликовые новые типа WZ Sge**

Звезды типа WZ Sge являются подгруппой карликовых новых типа SU UMa [2; 14; 80; 15; 28]. Для таких систем характерны редкие (период повторения порядка 10 лет) яркие сверхвспышки с амплитудой в 8 – 10 звездных величин. Звезды типа WZ Sge имеют ряд характерных особенностей отличающих их от других карликовых новых, одной из которых являются ранние сверхгорбы. Данные колебания блеска наблюдаются на ранней стадии развития сверхвспышки, имеют двугорбую форму и показывают периоды близкие к орбитальному периоду системы [29]. Первоначально, данные колебания пытались объяснить как орбитальные колебания блеска усиленные увеличенным темпом перетекания вещества [81]. Однако сейчас предпочтительным объяснением ранних сверхгорбов является

достижение внешним радиусом аккреционного диска резонанса 2:1 между вращениями диска и вторичного компонента [71; 83]. Ещё одной особенностью является наличие у некоторых систем типа WZ Sge повторных поярчаний (также называемых ребрайтинги), возникающих после окончания сверхвспышки. Хотя, на данный момент, причина возникновения ребрайтингов доподлинно не известна, существует несколько предположений. Одним из них является предполагаемое увеличение темпа перетекания вещества во время сверхвспышки, что, по её окончании, приводит к возникновению ребрайтингов [20; 11; 83]. Также высказывается предположение о возможной связи появления повторных вспышек с сохранением состояния высокой вязкости в аккреционном диске после окончания сверхвспышки [69; 70]. Повторные вспышки у систем типа WZ Sge классифицируются по их морфологии [26; 31] и делятся на 4 типа по форме кривой блеска: длительные ребрайтинги (тип А), многократные последовательные ребрайтинги (тип В), одиночный ребрайтинг (тип С), отсутствие ребрайтинга (тип D). В 2014 году к данной классификации добавился ещё один тип ребрайтингов: двойные сверхвспышки (тип E). [38] Хотя механизм возникновения повторных вспышек не известен, существуют предположения об их связи с эволюционным статусом системы. В работе [31] показано наличие связи между типом ребрайтинга у системы и отношением  $P_{\text{dot}}$  к  $P_{\text{sh}}$ , что подразумевает отражение параметров системы в наблюдаемом типе повторных вспышек. Однако нужно отметить, что сверхвспышки у одной и той же системы, могут показывать разные типы ребрайтингов (AL Com: [108]; WZ Sge: [81]). В общем же случае, предполагается, что тип наблюдаемых ребрайтингов у систем WZ Sge сохраняется, что можно наблюдать на примере звезд: EZ Lyn [87; 30; 32]; UZ

Воо [48; 31] и WZ Sge [81; 83; 27]. Также у звезд с многократными последовательными ребрайтингами, количество повторных вспышек может меняться. Например, у звезды EZ Lyn, после сверхвспышки 2006 года было зарегистрировано 11 ребрайтингов [87], а после сверхвспышки 2010 года только 6 [32].

Для объяснения поведения систем со сверхвспышками на стадии ребрайтингов была предложена модель, которая дополняет модель приливно-тепловой неустойчивости несколькими условиями: переменный темп перетекания вещества со вторичного компонента на главный (предполагается связь с нагревом поверхности вторичного компонента); поток перетекающего вещества должен попадать во внутренние участки аккреционного диска, а не на его край; внутренний радиус аккреционного диска должен быть ограничен (предполагается связь с магнитным полем белого карлика) [22]. Такая модель может удовлетворительно описать как случаи с несколькими сверхвспышками, так и с многократными последовательными ребрайтингами (тип В).

### **1.3. Актуальные теории возникновения сверхвспышек и сверхгорбов**

Существует несколько теорий, объясняющих причины возникновения сверхвспышек и сверхгорбов у карликовых новых звезд: 1) Модель теплового ограниченного цикла (Thermal Limit Cycle Model); 2) Модель усиленной передачи массы (Enhanced Mass-Transfer Model (EMT Model)); 3) Модель приливно-тепловой неустойчивости (Thermal-tidal Instability Model (TTI Model)). Рассмотрим данные модели:

### 1.3.1. Модель теплового ограниченного цикла

В данной модели предполагается, что нормальные вспышки и сверхвспышки карликовых новых типа SU UMa соответствуют «узким» и «широким» вспышкам, наблюдаемым у карликовых новых типа SS Cyg [12; 13; 110], и объясняются стандартной тепловой нестабильностью ограниченного цикла. Феномен сверхгорбов, в данной модели, не считается столь важным и рассматривается как дополнительный. Численные симуляции, проведенные Cannizzo [12], показали, что тепловая нестабильность ограниченного цикла достаточно комплексна, чтобы самостоятельно получить сверхвспышки и сверхцикл (несколько нормальных вспышек заключённых между двумя сверхвспышками) у карликовых новых типа SU UMa. В модели теплового ограниченного цикла предполагается, что тепловая нестабильность, вызывающая нормальные вспышки, возникает во внутренней части аккреционного диска и распространяется во внешние слои, однако, не достигая внешнего края диска и отражаясь в середине диска в виде волны охлаждения [12]. В классификации Smak-a, данный тип вспышки называется тип Bb, и не приводит к расширению внешней границы аккреционного диска даже во время вспышки [100]. Таким образом, масса внешней части аккреционного диска остается неизменной, т.е. во время нормальных вспышек расходуется только вещество из внутренней части диска. Сверхвспышка, в данной модели, начинается так же, как и нормальная вспышка, с возникновением тепловой нестабильности во внутренней части аккреционного диска и её распространением во внешние части. Однако, в данном случае, разогревающая волна доходит до внешнего края диска, приводя к длинной сверхвспышке (тип Va в классификации Smak-a [100]). Такая последовательность коротких и длинных вспышек может быть

смоделирована для вспышек типа «inside-out». Однако, для вспышек типа «outside-in», длительность вспышек будет примерно одинаковой, что может являться минусом данной модели, если у звезды типа SU UMa обнаружатся нормальные вспышки типа «outside-in».

### **1.3.2. Модель усиленной передачи массы**

Модель усиленной передачи массы применительно к сверхвспышкам карликовых новых типа SU UMa, была впервые предложена Vogt [113], а также рассматривалась Osaki [66]. В этой модели предполагается, что сверхвспышки карликовых новых типа SU UMa вызываются усилением темпа перетекания вещества со вторичного компонента, что, в свою очередь, происходит из-за нагрева атмосферы вторичной звезды ультрафиолетовым излучением аккрецирующего главного компонента и внутренним пограничным слоем диска [66]. Сверхгорбы, в данной модели, вызваны изменениями в диссипации газовой струи из-за переменности темпа перетекания вещества, связанного с периодически изменяющимся облучением вторичной звезды [102]. Предполагается, что во время сверхвспышки темп перетекания вещества увеличивается. Симуляции кривых блеска, основанные на модели усиленной передачи массы, проводились Smak [101] и Schreiber et al. [99] и сравнивались с мультиполосными наблюдениями звезды VW Hyi, которая являлась наиболее изученной карликовой новой типа SU UMa на тот момент. Из-за принятого значения вязкости, все вспышки в данной симуляции получились типа «inside-out». Рассчитанные профили вспышек прекурсоров (нормальные вспышки вызывающие сверхвспышку) были сильнее выражены на высоких частотах, что также согласуется с наблюдениями. В качестве достоинства

данной модели, авторами симуляции была выделена способность переменного темпа перетекания вещества объяснить переменность характеристик разных сверхвспышек у одной звезды, а также между разными карликовыми новыми звездами.

### **1.3.3. Модель приливно-тепловой неустойчивости**

Модель приливно-тепловой неустойчивости была предложена Осаки [67] и представляет собой объединение обычной тепловой неустойчивости и приливной неустойчивости диска [68]. В данной модели темп перетекания вещества со вторичного компонента на главный предполагается постоянным, а все переменности формируются в аккреционном диске. В рамках модели приливно-тепловой неустойчивости, сверхцикл карликовых новых типа SU UMa объясняется следующим образом. На начальной стадии сверхцикла, диск предполагается компактным, с радиусом заметно меньшим, чем резонанс 3:1. Последующая нормальная вспышка вызывает выпадение вещества на белый карлик, однако масса аккрецировавшего вещества меньше, чем масса, полученная от вторичного компонента за этот период времени. Таким образом, масса и угловой момент диска накапливаются, и внешняя граница диска продолжает расти в сопровождении нормальных вспышек. Последняя нормальная вспышка (прекурсор сверхвспышки) выталкивает внешнюю границу аккреционного диска за 3:1 резонансный радиус  $R_{3:1}$  (где  $R_{3:1} \approx 0.46A$  и  $A$  расстояние между звездами). Вследствие этого, аккреционный диск становится приливно-неустойчивым и меняет свою форму с круговой на эллиптическую, что приводит к возникновению апсидальной прецессии. Приливное рассеяние эллиптического диска усиливает течение вещества в диске, поддерживая его в горячем состоянии,

что приводит к сверхвспышке. Когда достаточное количество вещества будет потеряно, то поверхностная плотность вещества во внешних слоях диска достигнет критического значения, ниже которого горячее состояние уже не может существовать. В этот момент диск переходит в холодное состояние, волна охлаждения распространяется вовнутрь, вызывая окончание сверхвспышки. Эллиптический диск возвращается к круговой форме по причине добавления вещества со слабо выраженным угловым моментом. Из-за усиленного приливного вращательного момента во время сверхвспышки, диск, по её окончании, принимает компактный размер [24; 72; 73]. Далее начинается следующий сверхцикл.

Осаки [67] рассчитал кривые блеска звезд типа SU UMa, используя упрощенную полуаналитическую модель, состоящую из тора и невязкого диска имеющих силовой закон распределения поверхностной плотности. На рисунке 6 показана одна из таких кривых блеска, вместе с изменениями радиуса и массы диска. Нужно отметить, что в этой модели все вспышки относятся к типу «outside-in».

С точки зрения массы накапливающейся за сверхцикл, разница между последней нормальной вспышкой перед сверхвспышкой и самой сверхвспышкой достаточно мала, что можно наблюдать на самом нижнем графике рисунка 6. Однако, существует большая разница в приливном рассеивании углового момента из диска в этих двух состояниях. В случае нормальной вспышки, внешняя граница диска находится ниже приливного резонанса 3:1, поэтому приливное рассеивание углового момента очень эффективно. Когда же внешняя граница аккреционного диска превосходит радиус приливного резонанса 3:1 в последней нормальной вспышке или прекурсоре, то развивается приливная неустойчивость, которую можно

наблюдать в виде растущих сверхгорбов. Ключевая идея модели приливно-тепловой неустойчивости заключается в изменении радиуса аккреционного диска, что показано на среднем графике рисунка 6.

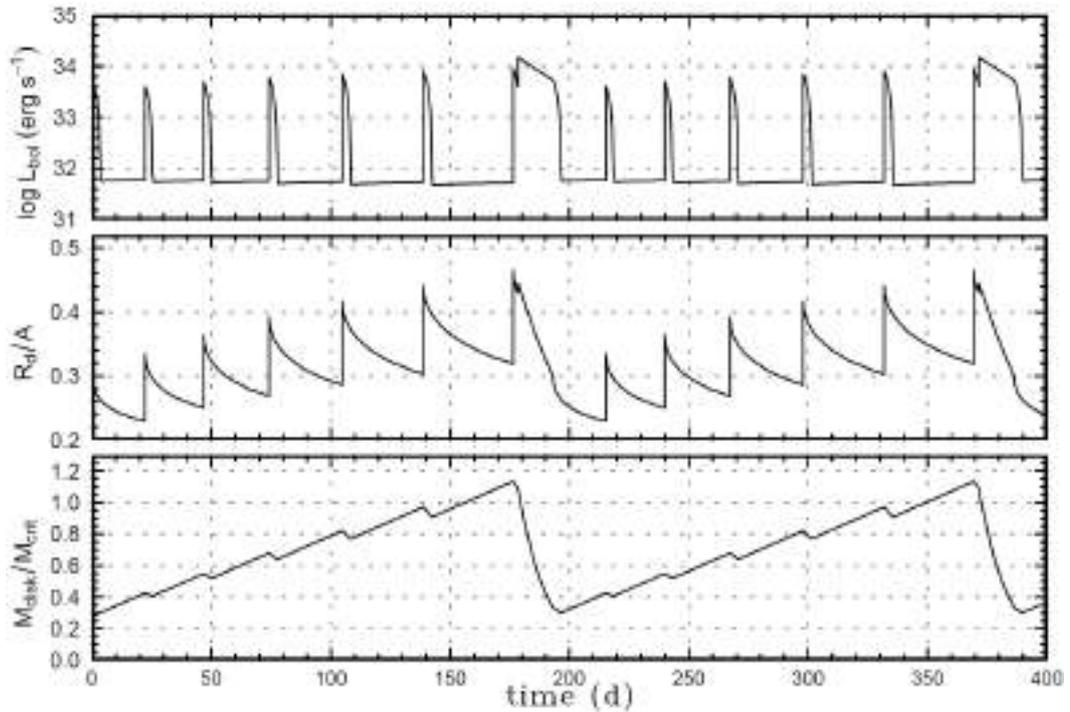


Рис. 6. Эволюция аккреционного диска во время сверхвспышки согласно упрощенной модели приливно-тепловой неустойчивости, построенная с использованием результатов полученных Осаки [73]. Для ясности представлены два сверхцикла. В качестве параметров модели использовались параметры звезды VW Нуi, которая является прототипом карликовых новых SU UMa. Сверху вниз: болометрическая кривая блеска; изменение радиуса диска, нормированное на расстояние между компонентами; полная масса диска  $M_{\text{disk}}$ , нормированная на значение критической массы  $M_{\text{crit}}$ , свыше которой диск становится приливно неустойчивым [74]. Рисунок взят из статьи [74].

#### 1.4. Эволюция периода сверхгорбов во время сверхвспышки

Сверхгорбы у карликовых новых типа SU UMa эволюционируют в течение

сверхвспышки и в общем случае могут проходить три стадии: А, В и С [31; 64; 104]. На рисунке 7 представлена характерная диаграмма, показывающая все стадии изменения периода сверхгорбов, а также изменение их амплитуды.

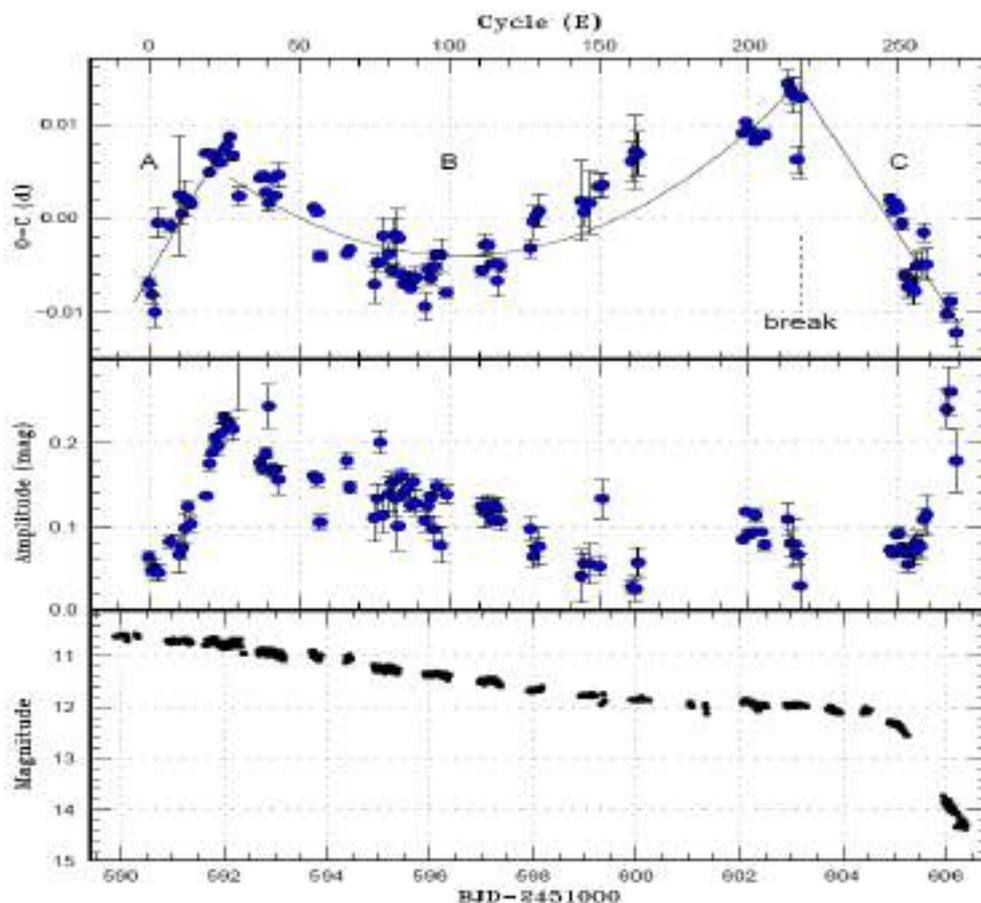


Рис. 7. Характерная диаграмма О-С показывающая три стадии (А, В и С) эволюции периода сверхгорбов. Данные на диаграмме взяты из вспышки SW UMa 2000 года. На верхнем графике показана диаграмма О-С с отмеченными стадиями. Также указано положение разрыва между стадиями В и С. На среднем графике показано изменение амплитуды сверхгорбов за время сверхвспышки. На нижнем графике показана кривая блеска сверхвспышки [44]. Рисунок взят из статьи [44].

Стадия А понимается как стадия роста приливной нестабильности. На

ней происходит увеличение амплитуды сверхгорбов, период имеет наибольшую и постоянную величину. На стадии В наблюдается более короткий период и его систематические изменения. Скорость изменения периода на этой стадии характеризуется величиной производной периода  $P_{\dot{}} = \dot{P}/P$ , которая может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Данная величина является безразмерной. Стадии С соответствует относительно стабильный, более короткий, чем на стадии В, период сверхгорбов. Данная стадия у некоторых систем может продолжаться даже после окончания сверхвспышки [31], т.е., аккреционные диски еще какое-то время продолжают оставаться в приливно-нестабильном состоянии. В хорошо изученных системах было отмечено, что изменения периода сверхгорбов между стадиями А и В и стадиями В и С, могут происходить скачкообразно. Осаки и Като [34] обратили внимание, что в общем случае выражение для апсидальной прецессии имеет следующий вид:

$$\omega_{pr} = \omega_{dyn} + \omega_{pressure} + \omega_{stress} \quad (2)$$

где  $\omega_{dyn}$  – это динамическая прецессия, вызванная приливным возмущением вторичного компонента,  $\omega_{pressure}$  – эффект давления, усиливающий ретроградную (обратную) прецессию и  $\omega_{stress}$  – малое взаимодействие между волнами. Если пренебречь значением  $\omega_{stress}$ , то остается два члена, из них значение  $\omega_{pressure}$  дает меньший вклад на стадии роста приливной неустойчивости (А), чем на стадии развитых сверхгорбов (В). Таким образом, как было показано ранее Осаки и Като [75], наблюдения во время стадии А имеют особую важность, поскольку, используя период сверхгорбов на этой стадии и орбитальный период, можно наиболее корректно оценить

отношение масс системы.

### 1.5. Отрицательные сверхгорбы

Кроме положительных сверхгорбов, у некоторых катаклизмических переменных были обнаружены колебания блеска с периодами на несколько процентов меньше, чем орбитальный. Данные колебания получили название «отрицательные сверхгорбы» [23; 82; 119]. Их появление связывают с возникновением нодальной прецессии аккреционного диска, приводящей к тому, что струя перетекающего вещества будет сталкиваться с аккреционным диском на разных расстояниях в зависимости от наклона диска и его ориентации относительно вторичного компонента [4; 5; 16; 119].

Согласно теории Ларвуда [50], существует связь между периодом отрицательных сверхгорбов и радиуса аккреционного диска:

$$v/v_{\text{орб}} = 1 + (3/7 q/(1+q)^{1/2}) \cos\Theta (R_d/A)^{3/2} \quad (3)$$

где  $v$  - частота отрицательных сверхгорбов,  $v_{\text{орб}}$  – орбитальная частота,  $q$  – отношение масс  $M_2/M_1$ ,  $R_d$  - радиус диска,  $\Theta$  - угол наклона диска к орбитальной плоскости,  $A$  – расстояние между компонентами. Поскольку  $q$ ,  $A$  и  $v_{\text{орб}}$  - постоянные величины, а для слабо наклонённого диска  $\cos\Theta \sim 1$ , изменения частоты отрицательных сверхгорбов зависят от изменения радиуса аккреционного диска. Увеличение радиуса диска соответствует увеличению частоты (уменьшению периода) отрицательных сверхгорбов.

На данный момент нет однозначного ответа, что вызывает наклон аккреционного диска. Имеющиеся на данный момент теории можно разделить на несколько групп, по предполагаемой причине возникновения

наклона аккреционного диска.

1.) Взаимодействия между диском и струей перетекающего вещества. Примеры: а) Наклоненный, прецессирующий диск создает периодически переменную асимметрию в облучении двух полушарий вторичного компонента, что приводит к переменной вертикальной компоненте в скорости потока вещества. Такое взаимодействие диска и потока вещества предоставляет дополнительное вертикальное ускорение элементам диска, достаточное для создания и поддержания наклона [103].; б) Симуляции показывают, что через сотни орбитальных периодов, диск наклонится без воздействия магнитных полей или излучающего источника. Во время орбитального движения аккреционный поток сталкивается с ярким пятном (находящимся на краю наклоненного диска) и обтекает диск сверху и снизу по разным траекториям. Эти траектории позволяют предположить, что подъемная сила является причиной возникновения наклона диска [55]. в) Используя карликовую новую V344 Lyr в качестве модели, было показано, что через  $\sim 79$  дней угловой момент диска  $L_d$  начинает перекашиваться относительно орбитального углового момента  $L_o$ . Так как поток вещества остается нормальным относительно  $L_o$ , то основной причиной возникновения наклона предполагается подъемная сила. В дополнение к наклону, внешнее кольцо диска циклически изменяет форму от круговой до сильно эллиптической под воздействием приливных сил вторичной звезды [56].

2.) Излучение главного компонента. Примеры: а) Искривленный аккреционный диск подвержен не оси-симметричному давлению излучения, от центрального тела, что приводит к изменению искривления. Показано, что даже изначально плоский диск подвержен искажениям в связи с этим эффектом [96]. б) Показано, что геометрически тонкий, оптически толстый,

аккреционный диск нестабилен к искривлению связанному с излучательным вращательным моментом от центрального источника излучения [53]. в) Было показано, что нестабильность, возникающая под воздействием излучения центральной звезды, может приводить к наклону диска относительно орбитальной плоскости, и его ретроградной прецессии. Скорости прецессии и углы наклона диска, полученные для реалистичных значений параметров систем, согласуются с известными данными о рентгеновских двойных с длинными периодами [117].

3.) Магнитное поле вторичного компонента. Пример: а) Гидродинамическая симуляция высокого разрешения показала, что измеримая вертикальная структура может быть возбуждена в аккреционном диске тесной двойной системы, под воздействием дипольного магнитного поля с центром на вторичном компоненте системы. Данное искажение показывает ретроградную прецессию [58].

4.) Магнитное поле главного компонента. Примеры: а) Показано, что внутренние области аккреционного диска вокруг магнитной центральной звезды, подвержены магнитным вращательным моментам, которые приводят к искажению формы и прецессии диска [49]. б) Показана численная симуляция нелинейной эволюции искаженных, вязких аккреционных дисков под воздействием магнитного момента вращения от главной звезды. Также показано, что аккреционный диск может достичь сильно искаженного стабильного состояния и прецессировать. При изменении параметров системы (например, темпа аккреции), диск может переключаться из полностью плоского состояния в сильно искаженное [93].

Было показано, что для успешного детектирования переменности блеска, связанного с нодальной прецессией, нужно, чтобы наклон аккреционного

диска составлял не менее  $4^\circ$  [54]. У карликовых новых типа SU UMa отрицательные сверхгорбы обычно наблюдаются только в спокойном состоянии и во время нормальных вспышек. Исключением являются три объекта: ER UMa, V1504 Cyg и V344 Lyr, у которых они наблюдались во время сверхвспышек [75; 62; 107; 63].

Высокоточные наблюдения карликовой новой V1504 Cyg, полученные на космическом телескопе Кеплер, показали наличие зависимости количества нормальных вспышек происходящих за сверхцикл от наличия отрицательных сверхгорбов [74]. Появление отрицательных сверхгорбов приводит к уменьшению частоты нормальных вспышек. Подобный феномен ранее уже наблюдался в других звездах типа SU UMa с высоким темпом перетекания вещества, таких как V503 Cyg [29; 33] и ER UMa [62]. Аналогичное поведение обнаруживалось на кривых блеска V344 Lyr, также полученных на телескопе Кеплер [13], что подтверждает ранее высказывавшиеся предположения о том, что отрицательные сверхгорбы подавляют частоту появления нормальных вспышек [29; 33; 62]. Подобная зависимость объясняется следующим образом. Карликовая новая V1504 Cyg относится к звездам типа SU UMa с высоким темпом перетекания вещества, о чем свидетельствует короткий сверхцикл  $\sim 110$  дней, показывающий частые нормальные вспышки. Большинство нормальных вспышек в данной системе относятся к типу «outside-in», о чем свидетельствует их форма. Таким образом, если плоскость вращения диска совпадает с орбитальной плоскостью, то вещество, перетекающее через внутреннюю точку Лагранжа, попадает на внешний край диска. В случае наличия наклона диска относительно орбитальной плоскости, струя перетекающего вещества будет гулять по поверхности наклоненного диска. При постоянном темпе

перетекания, это приведет к уменьшению количества вещества, попадающего во внешний край аккреционного диска. Если все нормальные вспышки относятся к типу «outside-in», то уменьшение скорости набора вещества внешним краем диска приведет к увеличению промежутка времени между ними. Однако нужно учесть, что наличие наклона диска будет увеличивать вероятность возникновения нормальной вспышки типа «inside-out» [74].

Наблюдения показывают, что отрицательные сверхгорбы могут существовать на разных временных шкалах - как на шкале, по крайней мере, нескольких лет (например, MN Dra [89; 98; 88], V503 Cyg [90], V455 And [47]) так и в течение всего нескольких сверхциклов, например, V1504 Cyg [74; 75].

### **1.6. Зависимость отношения масс от избытка периода**

Положительные сверхгорбы являются следствием возникновения эллиптичности аккреционного диска и его последующей прецессии на шкале времени значительно превышающей орбитальный период системы. Таким образом, период сверхгорбов  $P_{sh}$  является периодом биения между орбитальным периодом  $P_{orb}$  и периодом прецессии  $P_{prec}$ . Величина, на которую  $P_{sh}$  превышает  $P_{orb}$  называют избытком периода и характеризуют следующей величиной:

$$\varepsilon = (P_{sh} - P_{orb})/P_{orb} \quad (4)$$

И наблюдения и теоретические расчеты показывают, что величина  $\varepsilon$  является функцией от отношения масс  $q=M_2/M_1$ , где  $M_1$  – масса белого карлика, а  $M_2$  – масса вторичного компонента [46]. Зависимость  $q$ - $\varepsilon$  была

прокалибрована Knigge [46] относительно затменных карликовых новых, у которых отношение масс было определено независимо. Формула, описывающая данную эмпирическую зависимость, выглядит следующим образом:

$$q(\varepsilon) = (0.114 \pm 0.005) + (3.97 \pm 0.41) \times (\varepsilon - 0.025) \quad (5)$$

В дальнейшем было показано, что для получения величины избытка периода лучше использовать период сверхгорбов на стадии А, так как это позволяет уменьшить влияние эффекта давления газа в аккреционном диске [75]. Также была рассчитана уточненная зависимость  $q(\varepsilon)$ :

$$\varepsilon^* = 1 - P_{\text{orb}}/P_{\text{sh}} \quad (6)$$

$$q = - 0.0016 + 2.60\varepsilon^* + 3.33(\varepsilon^*)^2 + 79.0(\varepsilon^*)^3 \quad (7)$$

В случае если нам известна масса белого карлика, то, зная  $q$ , можно получить массу вторичного компонента.

## **1.7. Наблюдения, их обработка и анализ.**

### **1.7.1. Наблюдения**

Наблюдения, представленные в данной работе, проводились на большом количестве различных телескопов, расположенных в разных частях Земли. Самым малым из них был 18-см телескоп наблюдательной станции в с. Стара Лесна Словацкой Академии Наук, оснащенный ПЗС матрицей SBIGST-10XME. Самым крупным, был 2.6-м телескоп ЗТШ Крымской

Астрофизической Обсерватории (КрАО) с матрицей APOGEE ALTA E47. В основном, для увеличения точности и временного разрешения, наблюдения проводились без использования фильтров. Однако на некоторых телескопах использовались фильтры R и V фотометрической системы Джонсона-Моргана. Подробное описание телескопов, фильтров и экспозиций дано в журналах наблюдений каждой из исследованных звезд.

ПЗС-наблюдения проводились по стандартной процедуре. Помимо изображений звезды получались 3 типа калибровочных кадров байес (bias), темновой ток (dark) и плоское поле (flat). Байес представляет собой кадр, снятый при закрытом затворе и нулевой экспозиции. Использование данного кадра позволяет учесть шумы считывания ПЗС матрицы. Кадры темнового тока также снимаются при закрытом затворе, но с экспозициями, соответствующими кадрам с изучаемой звездой. Вычитание темнового тока позволяет учесть заряды, возникающие в ПЗС-матрице из-за теплового движения. Для матриц с сильным охлаждением, темновой ток становится исчезающе малым. Плоское поле – это снимок равномерно засвеченной площадки. Обычно, плоские поля снимаются на заходе или восходе Солнца, направлением телескопа на небо. Также возможно создание равномерно засвеченного экрана в подкупольном помещении телескопа, что позволит снимать плоские поля в любое время, однако требует дополнительных затрат. Нужно учитывать, что плоские поля снимаются для каждого из использованных фильтров. Учет плоского поля позволяет выправить различия в чувствительности пикселей ПЗС матрицы.

Для последующей фотометрии, подбирались звезды сравнения вблизи изучаемых звезд, которые должны соответствовать следующим требованиям:

- 1) Не быть переменными; 2) Находится достаточно близко к исследуемой

звезде, чтобы попадать на центральный участок матрицы (не на края); 3) Иметь близкие к исследуемой звезде показатели цвета. 4.) Блеск звезды сравнения не должен быть много слабее блеска изучаемого объекта. Звезды сравнения выбирались по информации из доступных каталогов, например USNO, SDSS и т.д.

Экспозиция для снимков подбиралась из баланса между достаточно высоким соотношением сигнал/шум и высоким временным разрешением. Так как исследуемые нами звезды являются катаклизмическими переменными, то используемая экспозиция варьировалась в зависимости от вспышечной активности системы.

### **1.7.2. Обработка наблюдений**

Обработка фотометрических наблюдений проводилась в программе MaxIm DL 5. Вначале, из полученных калибровочных кадров байеса, темнового тока и плоских полей находятся медианные средние, которые называются супер-байес, супер-диск и супер-флэт. Далее эти кадры используются для калибровки всех наблюдений исследуемой звезды. Следующим этапом проводится измерение блеска изучаемой звезды относительно звезд сравнения, используя методы апертурной фотометрии. Также, на кадре выбирается несколько контрольных звезд, которые позволяют отслеживать звезды сравнения, а также учитывать глобальные тренды изменений блеска (например, при восходе Луны).

Точность фотометрических наблюдений была в пределах от  $0.0006$  до  $0.003$ . Наблюдения с точностью  $0.003$  использовались для оценки блеска звезды в минимуме или суммировались по 3-5 кадров для увеличения точности. Изменение точности наблюдений вызвано использованием большого

количества разных телескопов, оснащенных различными матрицами. Также на точность измерений влияет вспышечная активность наблюдаемых систем, в минимуме точность, как правило, ниже, чем во время вспышки. Важным фактором являлись астроклиматические условия - качество изображений, яркость ночного неба, зависящая от фазы Луны и её близости к наблюдаемой звезде и прозрачность атмосферы.

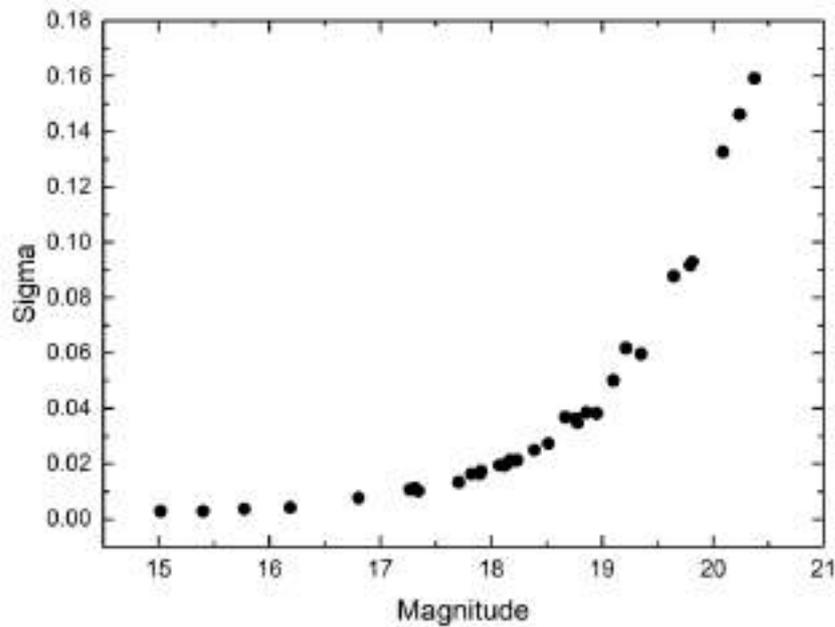


Рис. 8. Зависимость точности измерения от звездной величины для телескопа РТТ-150 (диаметр главного зеркала 1.5-м) для 2-го августа 2014 года, наблюдения ASASSN-14cv находившийся на  $z \sim 40^\circ$ , без фильтра, экспозиция 30 секунд. Данная кривая была приведена к зениту.

Для оценки точности наблюдений использовался следующий метод. На кадре выбиралось 20-30 звезд, различной яркости, и проводилась их фотометрия относительно звезды сравнения. Далее анализировались их кривые блеска и, в случае обнаружении переменности, звезды заменялись



является одной из модификаций метода минимизации фазовой дисперсии PDM (Phase Dispersion Minimization). Перед тем как проводить поиск периодов, необходимо очистить исследуемые кривые блеска от сильно выпадающих точек. Также важно исключить из рассмотрения ночи с крайне малым количеством данных. Далее необходимо вычесть глобальный тренд изменения блеска (вспышки). Данная программа также позволяет вычитать периодичности из массива данных, если есть подозрение на наличие нескольких действующих периодов переменности одновременно. Важным моментом является минимизация суточных гармоник (если это возможно) или их правильная идентификация.

## Глава 2

### **Эволюция сверхгорбов карликовой новой звезды типа WZ Sge ASASSN-14cv на стадии повторных поярчаний (ребрайтенингов).**

Одним из представителей катаклизмических переменных типа WZ Sge является объект ASASSN-14cv. Он был обнаружен во вспышке 21 июня 2014 г. [105] автоматической системой обзора неба ASASSN (All-Sky Automated Survey for Supernovae). До вспышки звезда имела блеск  $g = 19.^m2$  [105] в каталоге SDSS. Спустя несколько дней она была классифицирована как карликовая новая во вспышке [9]. Последовавшая за этим кампания по наблюдению данного объекта позволила определить его как катаклизмическую переменную типа WZ Sge и выявить несколько стадий развития сверхгорбов: ранние сверхгорбы, стадию А и В, а также определить особенности эволюции периодов сверхгорбов. Стадия ранних сверхгорбов длилась около 12 дней, их период составил  $0.^d05989(1)$ , а средняя полная амплитуда переменности —  $0.^m06$  [35]. Период сверхгорбов на этой стадии максимально близок к орбитальному периоду [71]. Стадия А продлилась 6 дней, для неё был найден период сверхгорбов  $P_{sh} = 0.^d06163(3)$  [36]. Стадия В продлилась 8 дней, при этом период составил  $P_{sh} = 0.^d06042(1)$  [37]. При определении отношения масс  $q = M_2/M_1$  брался период сверхгорбов на стадии А, а в качестве орбитального — период на стадии ранних сверхгорбов. Было получено значение  $q = 0.075$  [36]. Значение производной периода  $P_{dot}$  на стадии В составило  $+1.8(0.9) \times 10^{-5}$  [37].

Нам представилась уникальная возможность пронаблюдать звезду на стадии ребрайтенингов, выявить наличие короткопериодических колебаний блеска во время их появления, отождествить эти вариации со сверхгорбами и

проанализировать их эволюцию.

## 2.1. Наблюдения и редуция данных

Карликовая новая ASASSN-14cv имеет координаты  $\alpha=17:43:48.57$  и  $\delta=+52:03:45.75$ . Карта окрестности с отмеченной переменной и звездами сравнения представлена на рисунке 10.

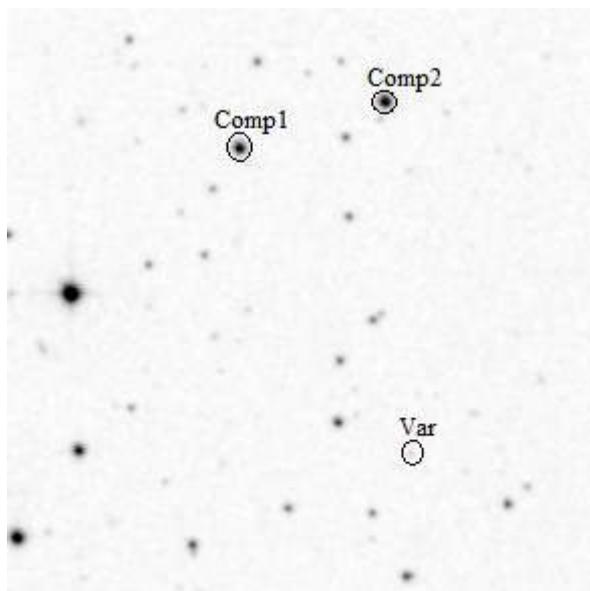


Рис. 10. Карта окрестности звезды ASASSN-14cv размером 5x5 угловых минут. Переменная звезда обозначена как Var, звезды сравнения как Comp1 и Comp2.

Наблюдения проводились с июля по сентябрь 2014 г., на телескопах Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) К-380 (диаметр главного зеркала 38 см, матрица APOGEE ALTA E47), АЗТ-11 (1.25 м, матрица ProLine PL23042) и ЗТШ (2.6 м, матрица APOGEE ALTA E47). Также использовались данные, полученные на 1.5-м российско-турецком телескопе РТТ-150 с помощью прибора TFOSC, оснащенного матрицей Fairchild. Наблюдения на

телескопах К-380, АЗТ-11 и РТТ-150 проводились без использования фильтров ( $W$  — white), а на телескопе ЗТШ — с фильтром  $V$ . Мониторинг объекта продолжался 31 ночь на К-380, 13 — на АЗТ-11, по 2 ночи на ЗТШ и РТТ-150. Журнал наблюдений приведен в Приложении к диссертации. Всего было проведено 48 сетов наблюдений, охватывающих окончание сверхвыссышки и 8 ребрайтенингов.

Дифференциальная фотометрия объекта проводилась относительно двух звезд сравнения из каталога USNOA2: 1350–09322747 ( $R = 14.^m42$ ,  $V = 14.^m02$ ) и 1350–09323713 ( $R = 14.^m66$ ,  $V = 14.^m35$ ).

Для привязки данных, полученных без фильтра, были использованы их звездные величины в фильтре  $R$ . Проведенная нами проверка показала отсутствие у звезд сравнения переменности на шкале наших наблюдений. Все использованные в наблюдениях ПЗС-приемники имеют максимум чувствительности в красной области, совпадающей с полосой  $R_c$ . Нуль-пункт шкалы дифференциальных наблюдений ближе всего будет соответствовать среднему блеску звезд сравнения в  $R_c$ . Из-за того, что звезды сравнения не являются фотометрическими стандартами, а наблюдения мы проводили без светофильтров, величина нуль-пункта будет иметь оценочный характер и от истинного может отличаться на несколько десятых звездной величины. Данная неопределенность в нуль-пункте может приводить к смещению всей кривой блеска, однако не может повлиять на её форму. Таким образом, неопределенность в нуль-пункте, как и его величина, на результат анализа временных рядов не влияет. Исходя из вышесказанного, определяемые значения блеска переменной звезды мы будем обозначать как величины в фильтре  $R$ .

Дополнительно 21 февраля 2015 г. были проведены наблюдения объекта

ASASSN-14cv на 2.6-м телескопе ЗТШ. Их целью была проверка наличия переменности блеска после окончания сверхвспышки 2014-го года. Использовался фильтр V. Редукция этих данных проводилась так же, как и основного массива наблюдений. Для относительной фотометрии использовались те же звезды сравнения, что и на стадии ребрайтингов. Точность единичного наблюдения составила  $0.^m06$ .

## 2.2. Анализ кривых блеска

На рис. 11 представлена кривая блеска звезды ASASSN-14cv по наблюдениям в июле–сентябре 2014 г. Участок 56856–56858 соответствует окончанию сверхвспышки. На участке с 56869 до 56920 нами зафиксировано 8 ребрайтингов (отмечены стрелками) с амплитудами  $2^m-3^m$  и характерной продолжительностью 3–4 дня. Характерное время между повторными поярчаниями составило 4-5 суток. Можно заметить, что их профили отличаются. Профиль второго ребрайтинга (участок 56864–56868) симметричен, что характерно для вспышек типа «inside-out». В то же время на участках 56868–56872 и 56881–56885 (третий и шестой ребрайтинги соответственно) рост блеска происходит быстрее, чем его падение, что характерно для вспышек типа «outside-in». Для остальных ребрайтингов определить тип вспышки не представляется возможным из-за недостаточного количества наблюдений. Однако даже из имеющихся данных можно сделать вывод о том, что на стадии ребрайтингов у звезды ASASSN-14cv имели место вспышки разных типов, как «inside-out», так и «outside-in». Блеск звезды в промежутках между ребрайтингами (до  $JD=2456886$ ) не уменьшался до величины  $R = 17.^m2$ , до которой он опустился после окончания сверхвспышки. Можно заметить, что блеск в промежутках между

ребрайтингами падал одновременно с блеском в максимумах (сделав поправку на то, что не для всех ребрайтингов было получено значение максимального блеска).

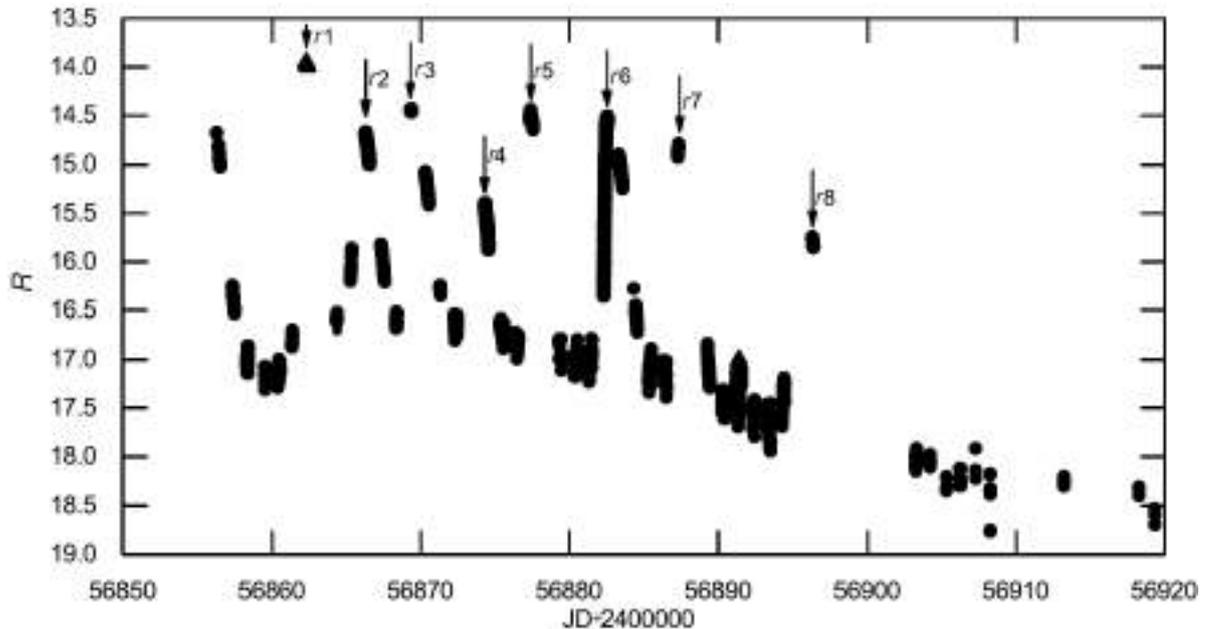


Рис. 11. Кривая блеска звезды ASASSN-14cv в июле–сентябре 2014 г.

Стрелками отмечены максимумы блеска зарегистрированных ребрайтингов.

Анализируя кривую блеска, можно сделать вывод о том, что даже после окончания стадии ребрайтингов и до окончания наших наблюдений (JD=2456919) блеск звезды не вернулся к величине  $V = 19.^m11$ , которую она имела до начала сверхвспышки (значение в фильтре V было пересчитано из величин в фильтрах системы SDSS). Во всем промежутке, пока длились ребрайтинги, наблюдались периодические колебания блеска с амплитудой от  $0.^m03$  до  $0.^m35$ .

На рис. 12 приведены примеры индивидуальных кривых блеска для ночей наблюдений на каждом этапе вспышечной активности: (a) в максимуме ребрайтинга, (b) на восходящей ветви, (c) на нисходящей ветви и (d) в

промежутке между ребрайтенингами. Можно видеть, что колебания блеска есть на всех этапах вспышечной активности. На кривой блеска (а) представлены наблюдения от 24 июля 2014 г. Точность фотометрии для этой ночи составила  $0.^m006$ . В максимуме ребрайтенинга виден четко прописанный относительно симметричный профиль колебания с амплитудой  $0.^m03$ . Кривая блеска (b) получена по наблюдениям 26 июля 2014 г. с точностью данных  $0.^m012$ . Эта ночь приходилась на восходящую ветвь ребрайтенинга. На этой стадии мы также видим относительно симметричный профиль с амплитудой  $0.^m1$ . На кривой блеска (с) приведены наблюдения от 2 августа 2014 г. Фотометрическая точность составила  $0.^m006$ . Эта ночь попала в промежуток между ребрайтенингами, поэтому вычет глобального тренда не проводился. И на этой кривой блеска замечен относительно симметричный профиль колебания с амплитудой  $0.^m25$ , но есть плоский максимум, который не наблюдался во время других стадий. Результаты наблюдений нисходящей ветви ребрайтенинга 4 августа 2014 г. приведены на нижней кривой блеска рис. 12. Точность оценок блеска составила  $0.^m02$ . Здесь также можно видеть колебание с амплитудой  $0.^m1$ , но с менее гладким профилем, который может быть вызван как меньшей точностью наблюдений в эту ночь, так и реальным изменением профиля.

По данным в промежутке 2456859–2456896 юлианских дней, включающим 33 ночи и охватывающим все зарегистрированные ребрайтенинги, мы предприняли поиск периодических сигналов в окрестностях ранее известных периодов.

Различная амплитуда колебаний (вызванная, возможно, большим перепадом блеска) затрудняет статистический анализ временных рядов, поэтому для проведения частотного анализа данные были переведены в

относительные интенсивности согласно соотношению:

$$I = 10^{-0.4m} \times 10^7 \quad (8)$$

где  $m$  – звездная величина.

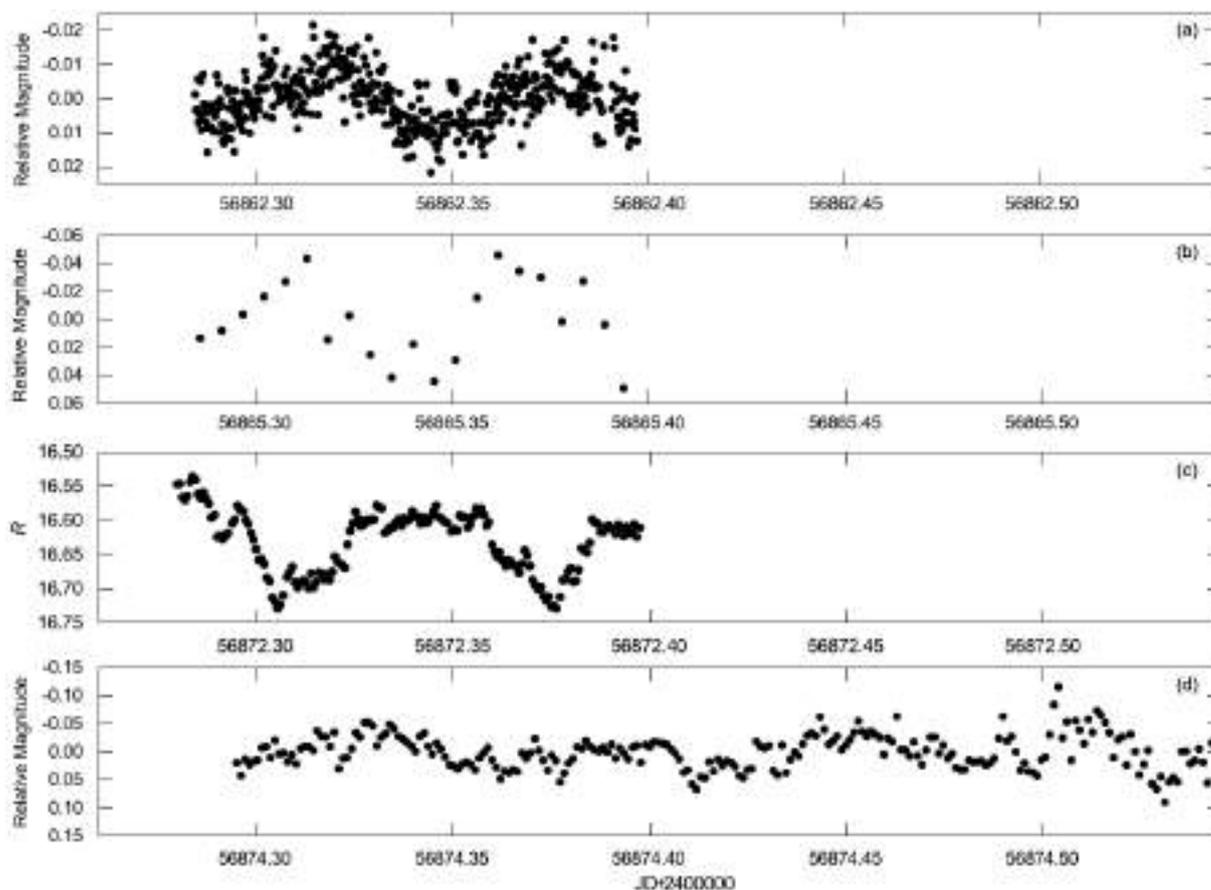


Рис. 12. Примеры индивидуальных кривых блеска на разных этапах вспышечной активности. Сверху вниз: (а) кривая блеска в максимуме ребрайтинга; (b) кривая блеска на восходящей ветви ребрайтинга; (с) кривая блеска в промежутке между ребрайтингами; (d) кривая блеска на нисходящей ветви ребрайтинга.

Для частотного анализа использовался реализованный в программе ISDA

метод Стеллингверфа, являющийся одной из модификаций метода PDM (Phase Dispersion Minimization) [106]. Сегмент полученной периодограммы в окрестности известных ранее периодов представлен на рис. 13.

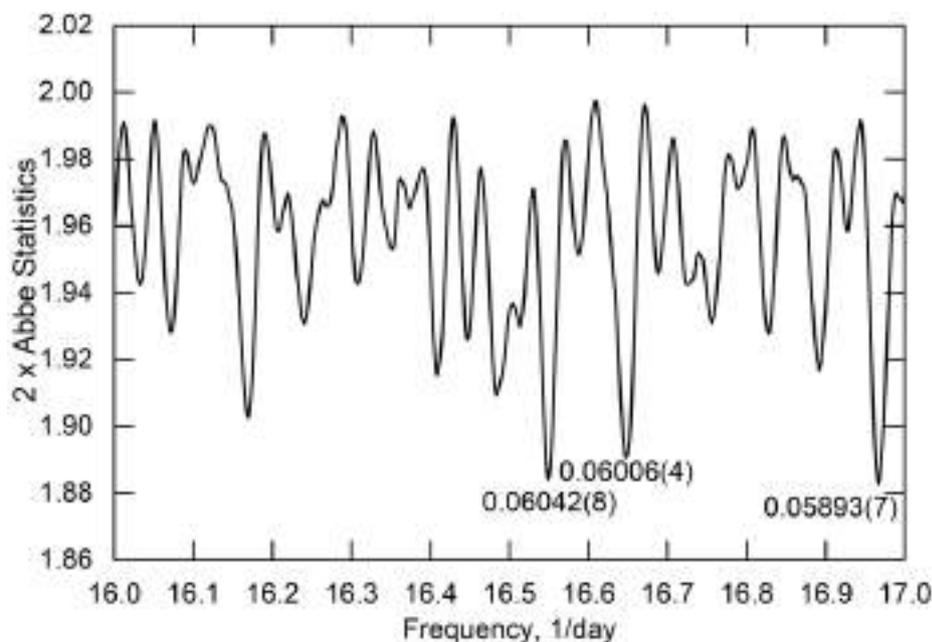


Рис. 13. Сегмент периодограммы, полученной методом Стеллингверфа по выборке из 33 ночей, за исключением относящихся к окончанию сверхвыпущки. Для самых значимых частот указаны соответствующие им периоды.

Мы выделили три наиболее значимых пика, которым соответствуют периоды  $0.^d06042(8)$ ,  $0.^d06006(4)$  и  $0.^d05893(7)$ . Один из этих периодов,  $0.^d06042(8)$ , совпадает с полученным ранее периодом сверхгорбов на стадии В  $P_{sh} = 0.^d06042(1)$  [33]. Таким образом, колебания блеска во время ребрайтингов мы идентифицировали со сверхгорбами стадии В. Также на периодограмме выделяются периоды  $0.^d06006(4)$  и  $0.^d05893(7)$ , которые не являются суточными для периода  $0.^d06042(8)$ . Из этих трех периодов мы отдали предпочтение периоду  $P = 0.^d06042(8)$ , поскольку он совпадает с

периодом сверхгорбов. На рис. 14 приведена фазовая кривая, свернутая с указанным периодом по данным 33 ночей, которые были использованы для его поиска.

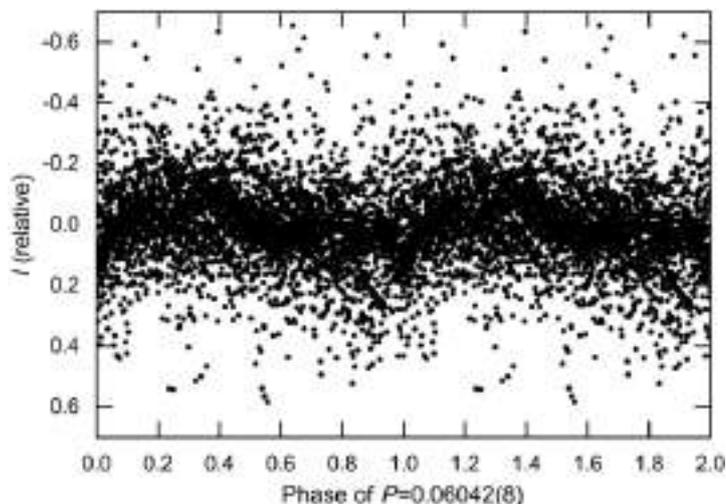


Рис. 14. Фазовая кривая, свернутая с периодом  $P = 0.^d06042(8)$  для данных на участке JD2456859–2456896.

Она показывает колебание блеска с амплитудой порядка  $0.4I$  и симметричным профилем с одним горбом за период. Кривая блеска по наблюдениям, проведенным через 245 суток после начала сверхвспышки 2014 г. (21 февраля 2015 г.) на 2.6-метровом телескопе ЗТШ, представлена на рис. 15.

Модуляции блеска с периодом около  $0.^d06$  не наблюдаются (т.е. сверхгорбы на данной стадии исчезли, а, следовательно, аккреционный диск уже вышел из состояния приливной неустойчивости). Вместо этого есть поярчание на  $0.^m15$  в течение приблизительно 2.5 часов, затем затменообразный провал на  $0.^m07$ . Также видна более быстрая переменность с амплитудой примерно  $0.^m1$ , которая, вероятно, связана с аккреционным диском.

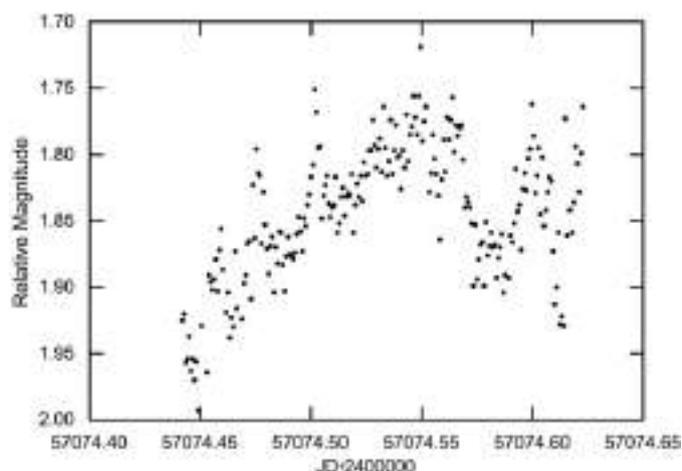


Рис. 15. Кривая блеска 21 февраля 2015 г., после окончания сверхвспышки 2014 г.

### 2.3. Диаграмма О – С

При помощи комбинирования метода совмещения хорошо прописанного профиля сверхгорба с изучаемой кривой блеска и метода хорд нами были определены моменты максимумов для всех ночей, где это было возможно. Полученные моменты и амплитуды максимумов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Моменты максимумов в HJD и их амплитуды

HJD+2400000	Амплитуда колебания, зв. вел.	HJD+2400000	Амплитуда колебания, зв. вел.	HJD+2400000	Амплитуда колебания, зв. вел.
56856.48662	0.1	56872.34445	0.15	56883.35052	0.08
56858.38689	0.4	56872.34125	0.3	56883.40742	0.08
56860.45136	0.4	56872.40645	0.3	56884.4356	0.15
56862.31843	0.04	56874.32901	0.1	56885.33778	0.15
56862.37593	0.04	56874.39361	0.1	56889.38629	0.15
56864.38989	0.2	56874.45181	0.1	56890.29167	0.15

Таблица 1. (продолжение)

56865.31268	0.1	56875.47979	0.15	56891.32994	0.3
56865.36948	0.1	56877.34885	0.08	56891.39084	0.3
56866.51896	0.08	56880.32259	0.2	56892.29672	0.35
56867.49984	0.1	56880.38839	0.2	56893.3210	0.3
56868.34512	0.2	56881.35897	0.15	56893.3900	0.3
56869.3560	0.3	56882.38574	0.1	56896.34013	0.1
56871.30807	0.1				

Используя период  $P = 0.^d06042(8)$ , мы построили диаграмму О – С для наблюдений во время ребрайтингов (рис. 16).

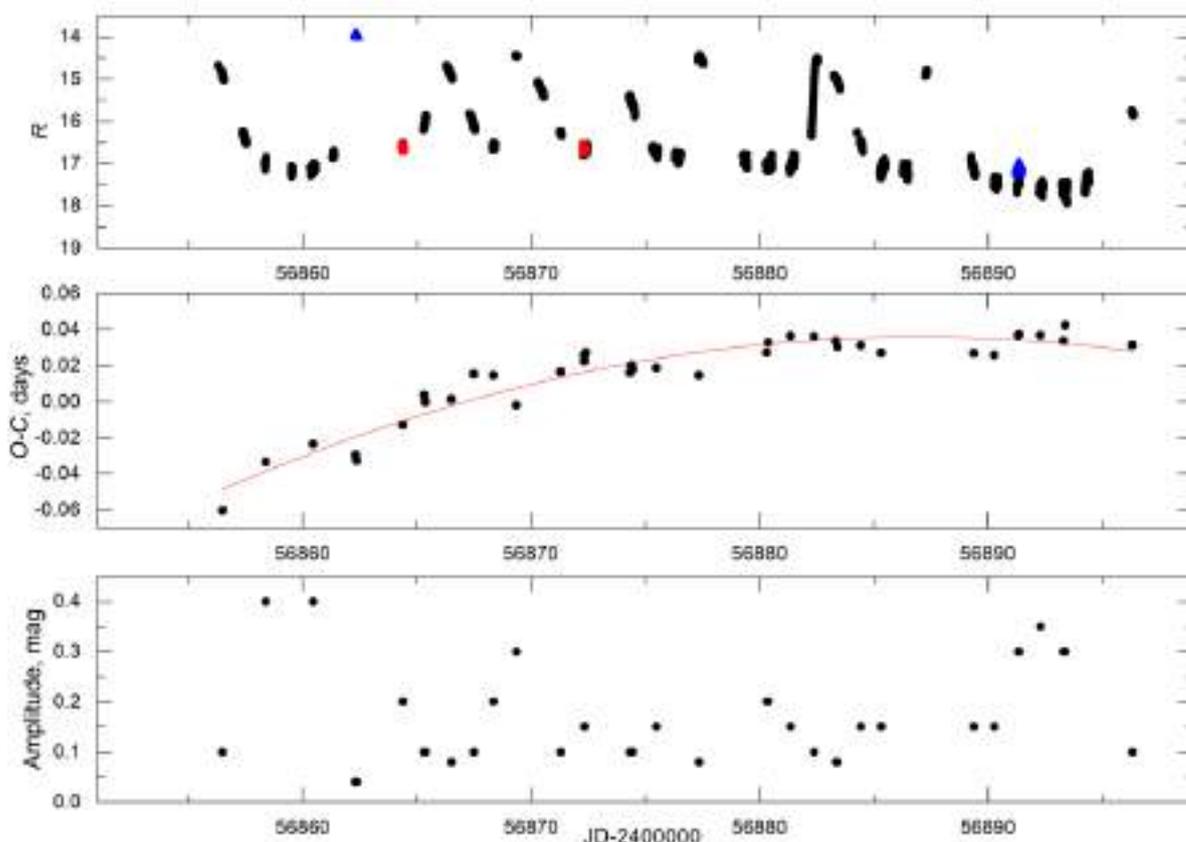


Рис. 16. Диаграмма О – С и амплитуды колебаний.

Полученная диаграмма  $O - C$  может иметь два разных варианта объяснения:

- 1) во время ребрайтенингов определенный нами период сверхгорбов изменялся, что приводит к образованию параболы на диаграмме  $O - C$ , при аппроксимации которой величина изменения периода за период  $P_{\text{dot}}$  равна  $-1.1 \times 10^{-5}$ .
- 2) во время ребрайтенингов действовало два периода, один из которых, в промежутке JD 2456856–2456869, был короче взятого нами периода  $P = 0.^d06042(8)$ , а другой, в промежутке JD 2456871–2456896 — несколько длиннее, т. е. диаграмма  $O - C$  объясняется двумя линейными участками, принадлежащими разным периодам.

По изменению амплитуды сверхгорбов можно сделать следующие заключения:

- в среднем амплитуда сверхгорбов была меньше во время ребрайтенингов, чем в промежутке между ними.
- максимальной амплитуды сверхгорбы достигали после окончания сверхвспышки (до первого ребрайтенинга), а также во время длительной задержки между седьмым и восьмым ребрайтенингами.

Стоит отметить, что первые две точки на диаграмме  $O-C$  относятся к окончанию сверхвспышки, и их положение на диаграмме неоднозначно. Кроме варианта, приведенного на рис. 16, возможен ещё вариант, со смещением этих точек на один период вверх из-за просчета на один цикл.

Аппроксимация диаграммы  $O - C$  двумя линейными участками дала меньшее среднеквадратичное отклонение, чем аппроксимация параболой. По наклону аппроксимирующих прямых нами были посчитаны значения периодов для обоих участков, которые позволили бы убрать линейный тренд с диаграммы  $O - C$ . Для участка JD 2456856–2456869 уточненный период составил  $0.^d06074(3)$ , для участка JD 2456871–2456896 —  $0.^d06046(9)$ . Далее мы пересчитали значения  $O - C$ , используя уточненные периоды для соответствующих участков диаграммы. Полученная диаграмма  $O - C$  представлена на рис. 17. Мы не нашли возможной зависимости между средним блеском звезды и  $O - C$ .

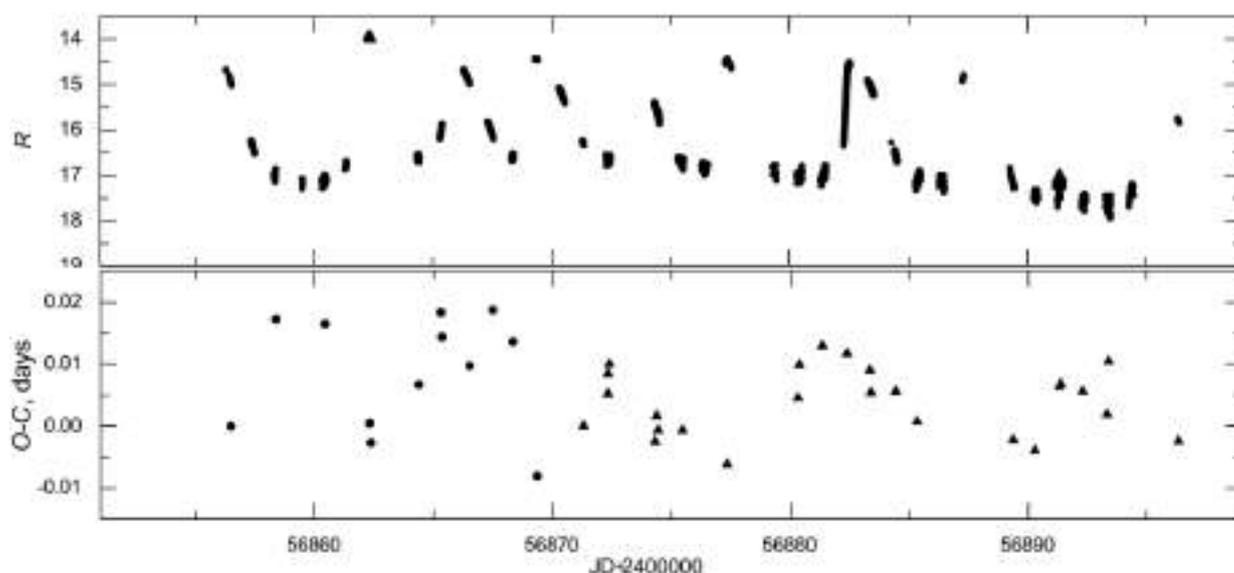


Рис. 17. Уточненная диаграмма  $O - C$ , посчитанная с использованием двух периодов. Данные для первого участка диаграммы отмечены кружками, для второго участка треугольниками.

## 2.4. Обсуждение

Можно отметить, что смена периода во втором варианте объяснения диаграммы  $O - C$  совпадает с промежутком между вторым ребрайтенингом,

имеющим симметричный профиль, что характерно для вспышек типа «inside-out», и третьим ребрайтенингом, имеющим явно более быстрый подъем блеска, чем спад (характерно для вспышек типа «outside-in»).

Также стоит отметить, что полученная нами диаграмма O-C похожа на диаграмму O-C, представленную на рис. 10 в статье Като и др. [30] для карликовой новой типа WZ Sge EZ Lyn = SDSSJ080434.20+510349.2. Глобальное изменение ее периода было аппроксимировано параболой с положительным  $P_{\text{dot}} = 0.5 \times 10^{-5}$ , однако на упомянутом рисунке можно отметить участок 2453812–2453843, на котором изменение периода может быть аппроксимировано параболой с отрицательным  $P_{\text{dot}}$  или двумя линейными участками.

Подобное поведение диаграммы O-C на стадии ребрайтенингов можно также видеть и на рис. 129, приведенном для звезды WZ Sge в работе Като и др. [31], где диаграмма O-C аппроксимируется двумя линейными участками, а в случае аппроксимации параболой также имела бы отрицательное значение  $P_{\text{dot}}$ .

## 2.5. Выводы

Нами проведены уникальные наблюдения карликовой новой звезды ASASSN-14cv. Они позволили зарегистрировать восемь ребрайтенингов у этой системы и, таким образом, классифицировать её как карликовую новую типа WZ Sge с многочисленными ребрайтенингами.

Был получен средний период на стадии ребрайтенингов  $0.^{\text{d}}06042(8)$ , который совпадает с периодом сверхгорбов для стадии В во время сверхвспышки  $0.^{\text{d}}06042(1)$ , известным из литературных данных.

Показана эволюция сверхгорбов на стадии ребрайтенингов, которую

можно представить одним из двух вариантов:

- 1) непрерывное изменение периода с отрицательным  $P_{\text{dot}} = -1.1 \times 10^{-5}$ ;
- 2) скачкообразное изменение периода с  $0.^{\text{d}}06074(3)$  для участка JD 2456856–2456869 на  $0.^{\text{d}}06046(9)$  для участка JD 2456871–2456896.

Като [40] выделил пять подтипов среди звёзд типа WZ Sge на основании анализа профилей сверхвспышек: «А» - с одним долго длящимся ребрайтингом, «В» - с многократными ребрайтингами, «С» - с одним непродолжительным ребрайтингом, «D» - без ребрайтингов и «Е» с двойной сверхвспышкой. Като нашёл связь между подтипом и отношением масс и показал, что подтипы являют собой эволюционную последовательность  $C \rightarrow D \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow E$ , т.е., звёзды подтипа «Е» являются наилучшими кандидатами в «баунсеры», а «С» - наоборот. Он также отметил, что звёзды подтипа «В» (к которому как раз и относится ASASSN-14cv) хуже остальных вписываются в данную последовательность и для разрешения данной проблемы требуется больше наблюдательных и теоретических исследований этих объектов. Другая проблема касается природы самих ребрайтингов, которая до сих пор не вполне понятна. Имеющиеся достаточно плотные наблюдения ребрайтингов показывают, что они всегда сопровождаются положительными сверхгорбами и ASASSN-14cv не является исключением, т.е., это вспышки, в которых действует тепловая и приливная неустойчивость. Наиболее распространённой точкой зрения считается, что внешние слои аккреционного диска могут быть резервуаром вещества ребрайтингов [109].

**Личным вкладом диссертанта в данную работу является:**

Участие в постановке задачи. Получение и обработка 37 ночей наблюдений на телескопе К-380.

Обработка 2-х ночей полученных на 1.5-м телескопе РТТ-150.

Частотных анализ и построение диаграмм О-С для всего объема наблюдений.

Определение моментов экстремумов для всего объема наблюдений.

Обсуждение полученных результатов.

Написание текста статьи.

## Глава 3

### Долгопериодические катаклизмические переменные в пробеле периодов MN Dra, NY Ser и V1006 Cyg

#### 3.1. NY Ser: Вспышечная активность и мульти периодические процессы на разных её стадиях в 2014 и 2016 гг.

Первой карликовой новой типа SU UMa в пробеле периодов оказалась NY Ser, обнаруженная как ультрафиолетовый объект PG 1510+234 и позднее классифицированная как карликовая новая [18], [19]. Во время длительной вспышки в апреле 1996 года, у этой системы были обнаружены сверхгорбы, что позволило классифицировать её как карликовую новую типа SU UMa [59]. Орбитальный период системы определен в 2003 году и составил 0.0975 сут. [84]. Период сверхгорбов по разным данным определялся в промежутке от  $0.^d106$  до  $0.^d104$ , что, возможно, связано с использованием данных на разных стадиях сверхвспышки [59], [84]. Среднее значение периода сверхгорбов  $0.^d104531(37)$  было получено Павленко и др. по данным 12 ночей наблюдений в 2013 году [91] в течение плато сверхвспышки, причем этот период сосуществовал одновременно с орбитальным периодом.

NY Ser оказалась одной из первых карликовых новых «пограничного типа», сочетающей свойства систем как до «пробела» так и после него [91]. С одной стороны, как звезда типа SU UMa, она демонстрирует сверхвспышки и положительные сверхгорбы во время них, с другой – многообразие нормальных вспышек, самая длинная из которых длилась около 12-и суток [91], что уже сравнимо с длительностью сверхвспышек у карликовых новых, однако, сверхгорбы в течение этой длинной вспышки зарегистрированы не были.

Несмотря на проводившиеся кампании по наблюдению NY Ser, до сих пор не удавалось засечь стадию А у данной звезды, и отношение масс в этой системе оставалось неизвестным. Нами были проведены две кампании по фотометрии NY Ser в 2014 и 2016 годах, включавшие наблюдения на различных долготах. Основная цель исследований - определение вспышечной активности системы, периодических процессов на разных её стадиях и эволюции периода сверхгорбов во время сверхвспышки.

### 3.1.1. Наблюдения и редукция данных

Карликовая новая NY Ser имеет координаты  $\alpha=15:13:02.29$  и  $\delta=+23:15:08.40$ . Карта окрестности с отмеченной переменной и звездой сравнения представлена на рисунке 18.

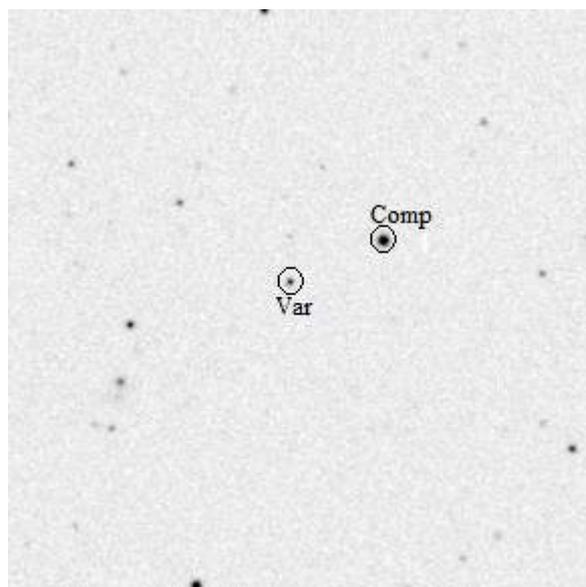


Рис. 18. Карта окрестности звезды NY Ser размером 5x5 угловых минут. Переменная звезда обозначена как Var, звезда сравнения как Comp.

Кампания по наблюдениям звезды NY Ser в 2014 году проводилась с 30 марта по 24 августа с использованием телескопов К-380 (38см, матрица

APOGEE ALTA E47) и АЗТ-11 (1.25м, матрица ProLine PL23042) Крымской Астрофизической Обсерватории (КрАО), ARCSAT (50см, матрица APOGEE U-47UV) обсерватории Апачи-Пойнт (США) и 1.5 метрового российско-турецкого телескопа РТТ-150 с помощью прибора TFOSC, оснащенного матрицей Fairchild. Объект наблюдался в течение 126 ночей (333.3 часа), из них в течение 86-и на К-380, 23-х на АЗТ-11, 3-х на РТТ-150 и 14-и на ARCSAT. В 2016 году наблюдения проводились с 4 июля по 12 августа на телескопе К-380 КрАО. На этом участке были получены данные в течение 22-х ночей (78 часов). На К-380, АЗТ-11 и РТТ-150 ПЗС-снимки были получены без использования фильтров. На телескопе ARCSAT использовался фильтр  $R_j$ . Журналы наблюдений для 2014 и 2016 годов приведены в Приложении к диссертации.

Наблюдательные данные проходили стандартную процедуру обработки и калибровки в программе MaxIm DL. Дифференциальная фотометрия объекта проводилась относительно звезды USNO B1.0 1132-0246239, использовавшейся в качестве фотометрического стандарта [91]. Для привязки данных, полученных без фильтра, была использована звездная величина в полосе  $R_c$ , для которой чувствительность матриц телескопов К-380, АЗТ-11 и РТТ-150 является максимальной. Так как для относительной фотометрии мы использовали  $R_c$ -величины звезд сравнения, то и определяемые нами значения блеска переменной звезды будем обозначать как величины в фильтре  $R_c$ . Для наблюдений, полученных на телескопе ARCSAT, данные приводятся шкале  $R_j$ .

### **3.1.2. Вспышечные кривые блеска 2014 и 2016 гг.**

В 2014 г. мы провели плотный мониторинг NY Ser в течение 126 суток с

JD=2456747 по JD=2456894. За это время мы зарегистрировали 20 нормальных вспышек (или их фрагментов) и одну сверхвспышку. В 2016 г. в течение 22-сут. интервала с JD=2457574 по JD=2457613 мы наблюдали 5 нормальных вспышек или их фрагментов. Полученные вспышечные кривые представлены на Рис. 19.

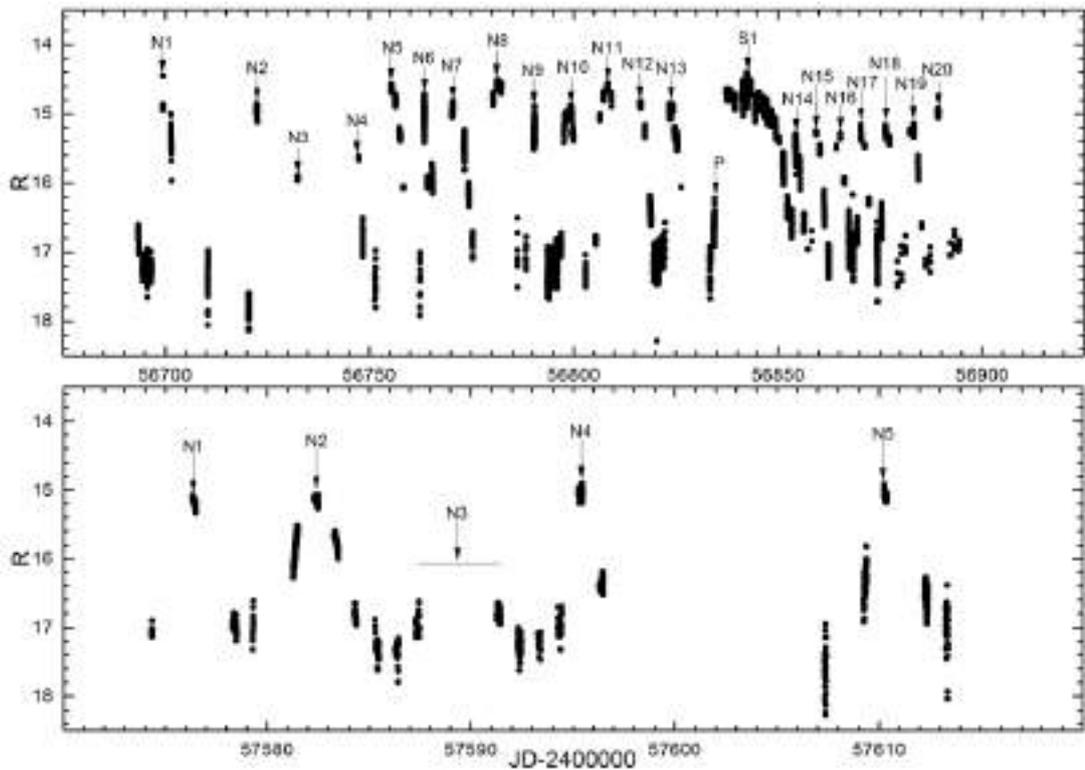


Рис. 19. Вспышечные кривые блеска звезды NY Ser в 2014 и 2016 гг. Буквой N обозначены нормальные вспышки, S – сверхвспышка, P – предшественник (прекурсор) сверхвспышки S1.

### 3.1.3. Вспышечная активность, циклы и сверхцикл.

По наиболее плотному ряду наблюдений 2014 г. средний интервал между нормальными вспышками (до сверхвспышки) составил 7-9 сут. (более точно определить интервал нельзя из-за имеющихся пропусков наблюдений в отдельные даты), их продолжительность - 4-7 сут., а амплитуда –  $2^m$ - $3^m$ . В промежутках между нормальными вспышками блеск переменной звезды

опускался до значений  $17^m-17.^m5$ , а в максимуме возрастал до  $14.^m5$ . После сверхвспышки частота нормальных вспышек в среднем увеличилась до 5-6 сут., продолжительность сократилась до 3-х сут. а амплитуда упала до  $1.^m5-2^m$ . В промежутке между вспышками блеск опускался до  $17.^m2-16.^m8$ , во время вспышки поднимался до  $15.^m3-15.^m0$ . Такие значения амплитуд, продолжительностей и частот нормальных вспышек находятся в согласии с данными 2013-го года [91]. Можно отметить, что профили нормальных вспышек соответствуют профилям вспышек “outside-in”.

По данным 2016 г. средняя частота нормальных вспышек составила 6-7 сут., продолжительность 3-4 сут. а амплитуда –  $2.^m5-3^m$ . Значение блеска в промежутках между вспышками опускалось до  $17.^m5$ , а во время вспышки поднималось до  $15.^m0$ . Эти данные также соответствуют ранее полученным значениям для 2013 года [91]. Примеры наиболее хорошо прописанных нормальных вспышек разной продолжительности и формы представлены на Рис. 20.

Большинство этих вспышек асимметричны, однако профиль вспышки N2 относительно симметричен, что позволяет классифицировать ее как вспышку “inside-out”. Это отличает ее от нормальных вспышек, зарегистрированных в 2013 году. Профили вспышек N1, N3, N4 и N5 недостаточно хорошо прописаны, чтобы сделать вывод об их принадлежности к определенному типу.

По итогам проведенной наблюдательной кампании можно отметить, что в период наших наблюдений «широкие» нормальные вспышки, описанные в статье Павленко и др. [91], не были зарегистрированы.

Высокая плотность наблюдений исключила возможность пропустить еще одну возможную сверхвспышку в интервале  $JD=2456751-JD=2456833$ .

Вероятно, что точки, принадлежащие предположительно нормальным вспышкам N3 и N4 2014 года, на самом деле лежат на восходящей и нисходящей ветвях сверхвспышки. В этом случае длительность сверхвспышки равнялась бы 16 сут., что короче сверхвспышек 2013 [91] и 2014 гг., но длина сверхцикла составила бы 102 дня, что согласуется с оценкой Ногами – 85-100 сут. [59]. Сокращение длительности сверхвспышки, возможно, вызвано наклоном аккреционного диска, что может привести к возникновению нодальной прецессии и появлению отрицательных сверхгорбов (как это было у ER UMa [62]). Другая возможность – это то, что в этом промежутке находилась «широкая» нормальная вспышка [91], что маловероятно, так как в этом случае сверхцикл составил бы не менее 140 сут.

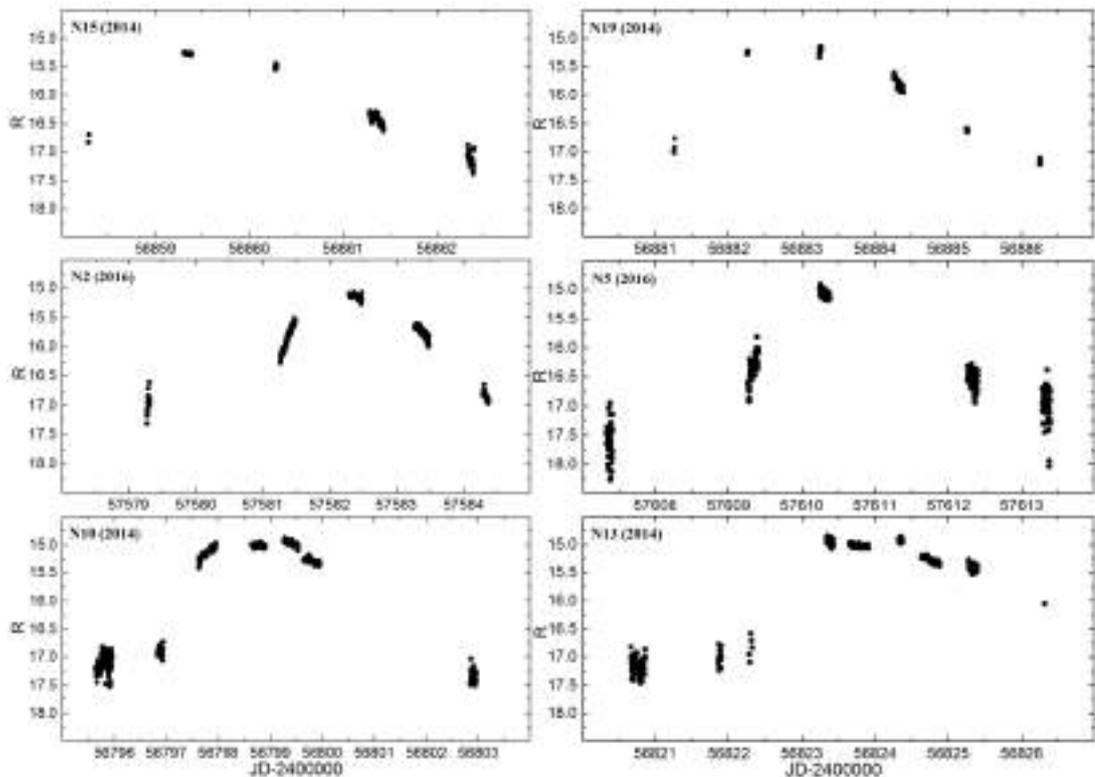


Рис. 20. Примеры нормальных вспышек разной продолжительности и формы.

### **3.1.4. Сверхвспышка 2014 г.**

Амплитуда сверхвспышки составила около  $3^m$ , а общая ее продолжительность, от начала роста блеска до резкого падения, - около 20 суток (JD=2456834–JD=2456853). Перед началом плато сверхвспышки, похоже, наблюдался её предшественник (precursor). Нормальная вспышка N14, имеющая продолжительность 2-3 сут. и профиль соответствующий типу “outside-in”, вероятно была повторным поярчением на спаде сверхвспышки (rebrightening), однако только по внешнему виду окончательное заключение сделать нельзя. Продолжительность плато сверхвспышки составила 10 дней со скоростью ослабления 0.115 звездных величин в сутки.

### **3.1.5. Короткопериодические колебания блеска на разных фазах развития нормальных вспышек и в неактивном состоянии.**

Данные каждой ночи 2014 и 2016 гг. показывают короткопериодические (порядка 2.5-х часов) колебания блеска независимо от того, была ли система в неактивном состоянии, в нормальной вспышке или сверхвспышке. Примеры индивидуальных кривых блеска для разных фаз развития нормальных вспышек представлены на рис. 21. Амплитуды кривых изменяются от  $0.^m05$  в нормальных вспышках до  $0.^m2$  -  $0.^m5$  в неактивном состоянии между ними.

Чтобы разобраться в характере переменности и возможной зависимости его от фазы сверхцикла (интервала между последовательными сверхвспышками), мы подвергли данные 2014 и 2016 гг. частотному анализу. Для этого на общей вспышечной кривой блеска 2014 г. мы выделили следующие три участка: 1) JD 2456747-2456826 до начала сверхвспышки, содержащий 13 нормальных вспышек; 2) JD 2456833-2456855, содержащий

сверхвспышку; 3) JD 2456856-2456894 после сверхвспышки, содержащий 7 нормальных вспышек.

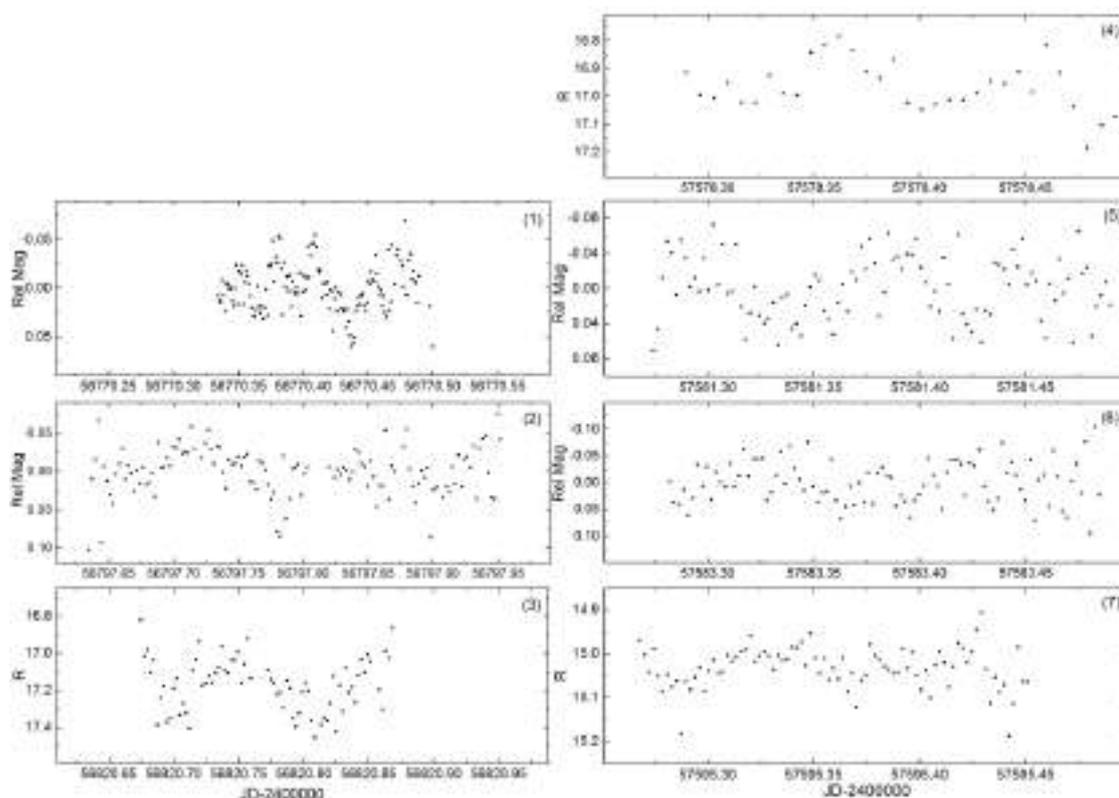


Рис. 21. Примеры индивидуальных кривых блеска на разных этапах вспышечной активности. Левая панель, сверху вниз: кривые блеска 2014 г. на (1) нисходящей ветви нормальной вспышки; (2) восходящей ветви нормальной вспышки; (3) интервале между нормальными вспышками. Из данных, приведенных на верхней и средней панелях, убран долгопериодический тренд, соответствующий систематическому уменьшению и увеличению блеска. Правая панель, сверху вниз: кривые блеска 2016 г. (4) на интервале между нормальными вспышками; (5) восходящей ветви нормальной вспышки; (6) нисходящей ветви нормальной вспышки; в (7) максимуме блеска нормальной вспышки.

Проанализируем переменность блеска вне сверхвспышки (первый и третий участки 2014 г. и все данные 2016 г.) отдельно в окрестностях ранее

известных периодов для данной системы. Для уменьшения влияния зависимости амплитуды колебаний от яркости системы на статистический анализ временных рядов, данные были переведены в относительные интенсивности ( $I$ ) согласно соотношению (8).

Результат частотного анализа методом Стеллингверфа приведен на рис. 22.

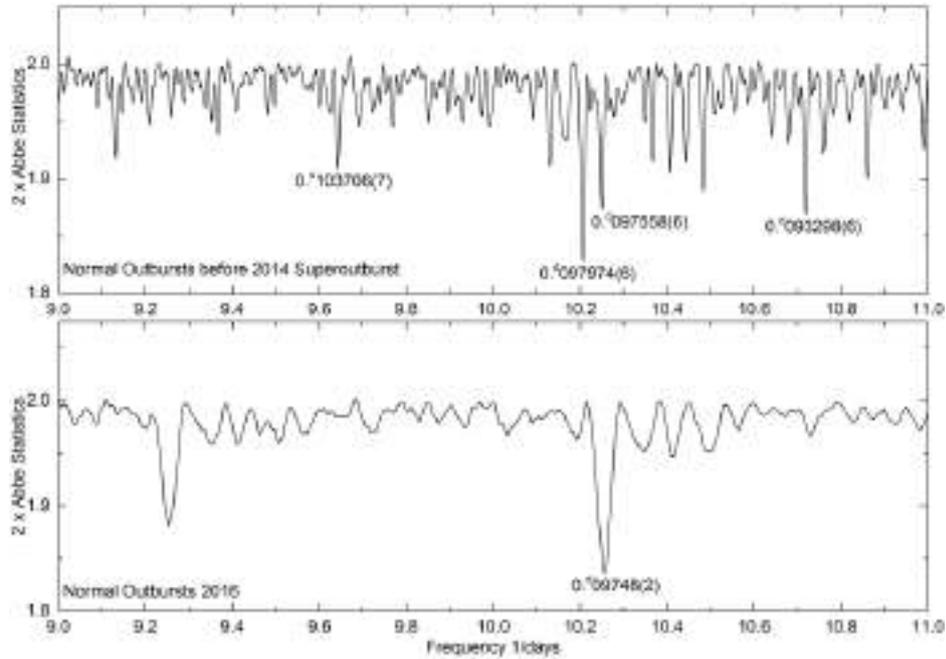


Рис. 22. Периодограммы для данных вне сверхвспышки: до сверхвспышки 2014 г. (верхняя панель), для всех данных 2016 г. (нижняя панель).

Наиболее сильными сигналами на участке до сверхвспышки 2014 г. являются периоды  $0.^d097974(6)$  и  $0.^d097558(6)$ , из них последний очень хорошо совпадает с величиной орбитального периода, полученного в предыдущих исследованиях данной звезды [84; 91]. Также достаточно сильными являются сигналы, соответствующие периодам  $0.^d093298(6)$  и  $0.^d103706(7)$ , не являющиеся суточными гармониками орбитального периода, но, вероятно, связанные суточной скважностью. Точность данных на третьем участке недостаточна для проведения периодограммного анализа. В 2016 г.

господствует исключительно орбитальный период  $0.^d09748(2)$ .

В качестве примера мы приводим фазовую кривую, полученную с периодом  $P = 0.^d09748(2)$  для данных на участке JD 2457574-2457596 2016 года (Рис. 23).

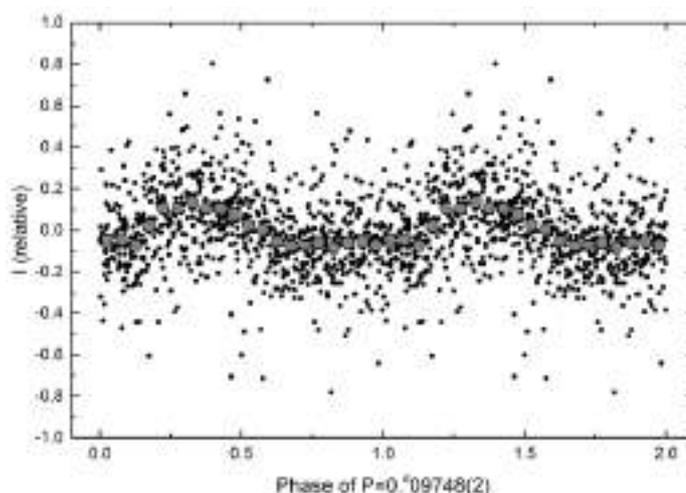


Рис. 23. Данные 2016 г. (JD=2457574-2457596), свернутые с периодом  $P = 0.^d09748(2)$ . Серыми точками обозначены средние значения с шагом 0.05 фазы. Размер серых кружков примерно соответствует среднеквадратичной ошибке измерения.

Профиль кривой блеска представляет собой горб, длящийся половину периода с амплитудой около  $0.2I$ . В течение второй половины периода блеск практически не изменяется.

### **3.1.6. Сверхвспышка: анализ эволюции сверхгорбов во время сверхвспышки 2014 г.**

На рис. 24 приведен пример некоторых кривых блеска во время сверхвспышки.

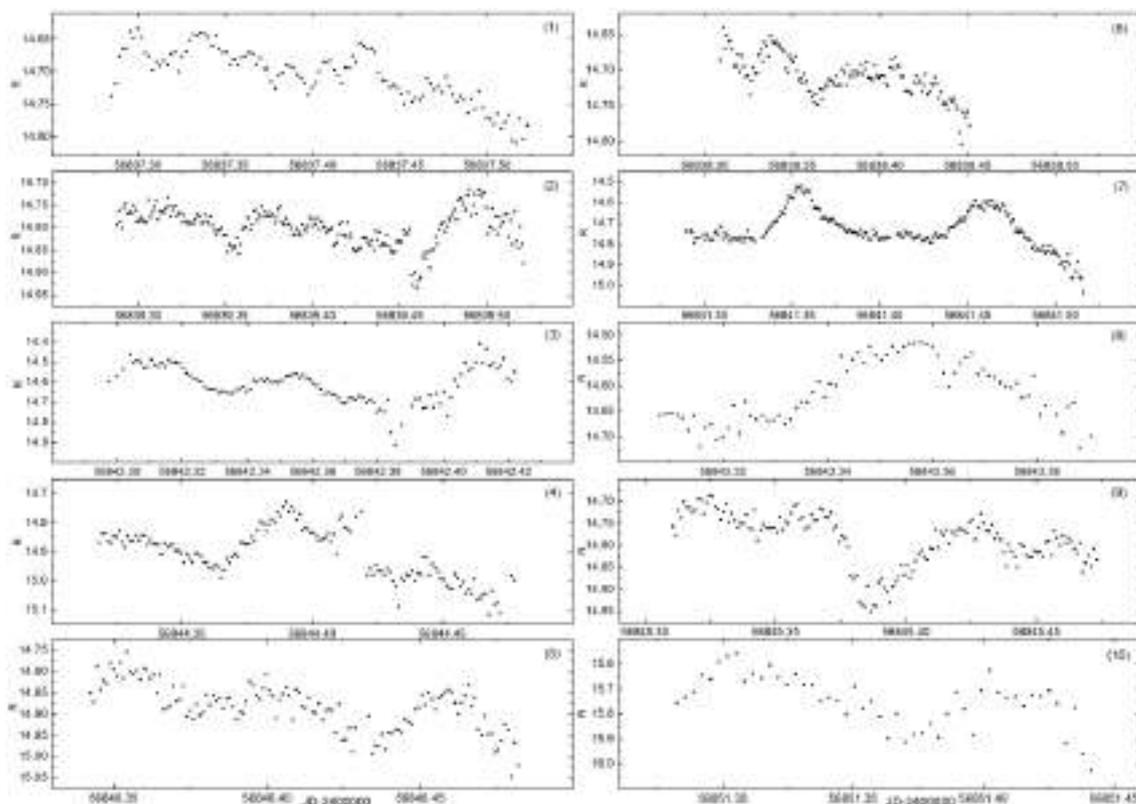


Рис. 24. Пример индивидуальных кривых блеска во время сверхвспышки.

На индивидуальных кривых блеска можно видеть колебания с амплитудой от  $\sim 0.05$  до  $\sim 0.2$  звездных величин. Форма кривой блеска также претерпевает заметные изменения в течении сверхвспышки. Анализ наблюдений нескольких сотен карликовых новых типа SU UMa, проведенный в серии работ "Survey of Period Variations of Superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae" (например статьи [43; 31; 38; 32; 44 и др.]) показал, что очень много объектов во время сверхвспышек демонстрируют средний профиль, сильно отличающийся от «характерного» и, к тому же, он может изменяться от момента появления до окончания.

Поиск периода был проведен для данных 19-и ночей участка  $JD=2456833-2456855$ . Полученная периодограмма представлена на Рис. 25.

Наиболее значимые пики указывают на периоды  $0.^d10463(2)$  и  $0.^d09466(2)$ , связанные суточной скважностью. Так как период  $0.^d10463(2)$  близок к

периоду сверхгорбов, полученному в более ранних работах [84; 91], мы делаем вывод о том, что во время сверхвспышки наблюдались положительные сверхгорбы. Однако стоит отметить, что пики на периодограмме являются очень широкими, что может говорить об изменениях значения периода за время наблюдений.

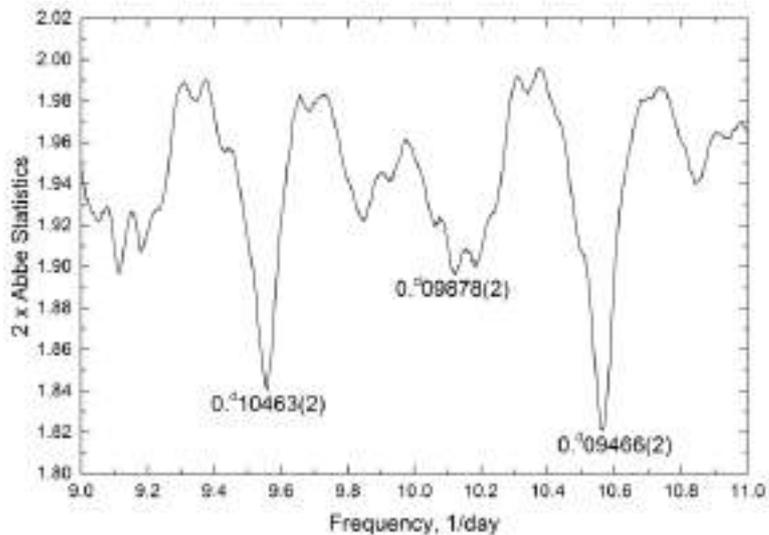


Рис. 25. Сегмент периодограммы по выборке из 19 ночей сверхвспышки 2014 года. Для самых значимых частот указаны соответствующие им периоды.

При помощи комбинирования метода совмещения хорошо прописанного профиля сверхгорба с изучаемой кривой блеска и метода хорд нами были определены моменты максимумов для всех ночей сверхвспышки, где это возможно. Полученные моменты и амплитуды максимумов приведены в таб. 2.

Далее мы использовали среднюю величину периода сверхгорбов, полученную из частотного анализа,  $P_{sh} = 0.⁰10463(2)$  для построения диаграммы О-С (Рис. 26). Так как присутствует неопределенность, вызванная возможным просчётом циклов, мы приводим 2 варианта диаграммы,

обозначенные как var1 и var2. Для большей наглядности мы также нанесли на рисунок с диаграммой O-C кривые блеска звезды и амплитуды сверхгорбов.

Таблица 2. Моменты максимумов (HJD) и их амплитуды.

HJD-2400000	Амплитуда колебания (зв. величины)	HJD-2400000	Амплитуда колебания (зв. величины)
56837.3374	0.043	56846.3540	0.078
56837.4256	0.052	56846.4612	0.118
56838.4116	0.050	56847.3400	0.083
56839.3919	0.067	56847.4420	0.082
56839.4941	0.163	56848.3751	0.089
56841.3561	0.223	56851.3186	0.147
56841.4658	0.187	56851.4120	0.205
56842.3187	0.090	56852.3562	0.20
56843.3588	0.136	56854.4248	0.117
56844.3926	0.202	56855.3750	0.218
56845.4268	0.195		

На графике изменения амплитуд сверхгорбов их значения находятся в пределах от  $0.^m04$  до  $0.^m22$ . Резкий рост амплитуды происходит на участке 2456839, а резкое её падение в ночь 2456841. Далее, в течение сверхвспышки наблюдаются волнообразные изменения амплитуды.

Для первого варианта (var1) можно видеть, что диаграмма O-C состоит из трёх линейных участков 2456837-2456841, 2456842-2456846 и 2456847-2456855. В данном представлении есть неоднозначность в

принадлежности точки 2456842, так как её можно отнести к обеим линиям. На отрезке 2456847-2456855 наклон О-С соответствует периоду  $0.^d1043$  – несколько меньшему, чем тот, который мы использовали для построения данной диаграммы.

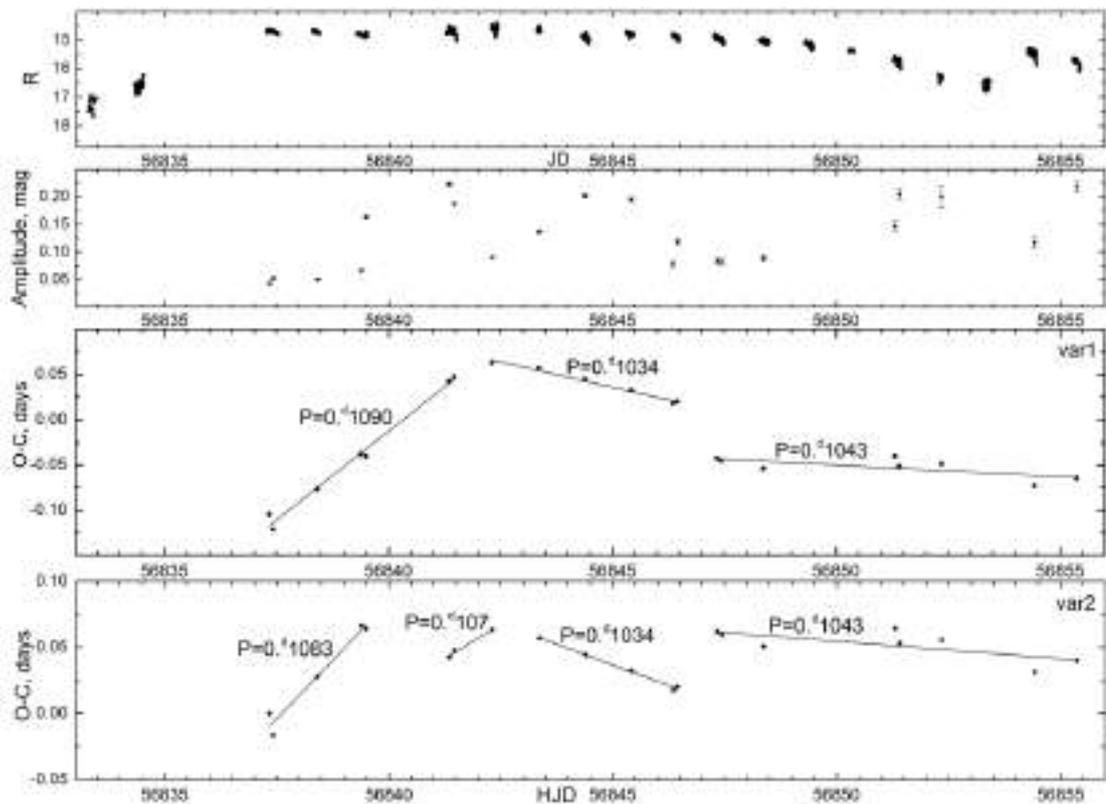


Рис. 26. сверху вниз: кривая блеска сверхвспышки; кривая изменения амплитуды сверхгорбов; оба варианта хода О-С максимумов сверхгорбов var1 и var2. Ошибки определения амплитуды соответствуют одному среднеквадратичному отклонению. На графиках О-С нанесены значения периодов, соответствующих линейной аппроксимации на данном участке.

Во втором варианте (var2) мы предположили возможный просчет на один цикл в интервале юлианских дат 2456837-2456839 и 2456847-2456855. В этом случае изменения О-С оказываются внутри более узкой полосы значений, чем в первом варианте. Обсуждение хода диаграммы О-С для обоих

вариантов будет дано далее.

Из хода О-С для var1 можно сделать вывод, что во время сверхвспышки действовало три постоянных периода, один из которых был длиннее выбранного нами периода  $P_{sh}=0.^d10463(2)$ , а два других - короче. По наклону графика О-С мы определили эти периоды: для участка 2456837-2456841 это  $P_{sh}=0.^d1090$ , для 2456842-2456846  $P_{sh}=0.^d1034$ , для 2456847-2456855  $P_{sh}=0.^d1043$ . Для var2 периоды составили: на 2456837-2456839 -  $P_{sh}=0.^d1083$ , 2456841-2456842 -  $P_{sh}=0.^d107$ , 2456842-2456846  $P_{sh}=0.^d1034$  и на 2456847-2456855 -  $P_{sh}=0.^d1043$ .

Для определения действующих периодов, наличие которых предполагается по диаграмме О-С, был проведен частотный анализ для разных участков сверхвспышки. Результат показан на рис. 27.

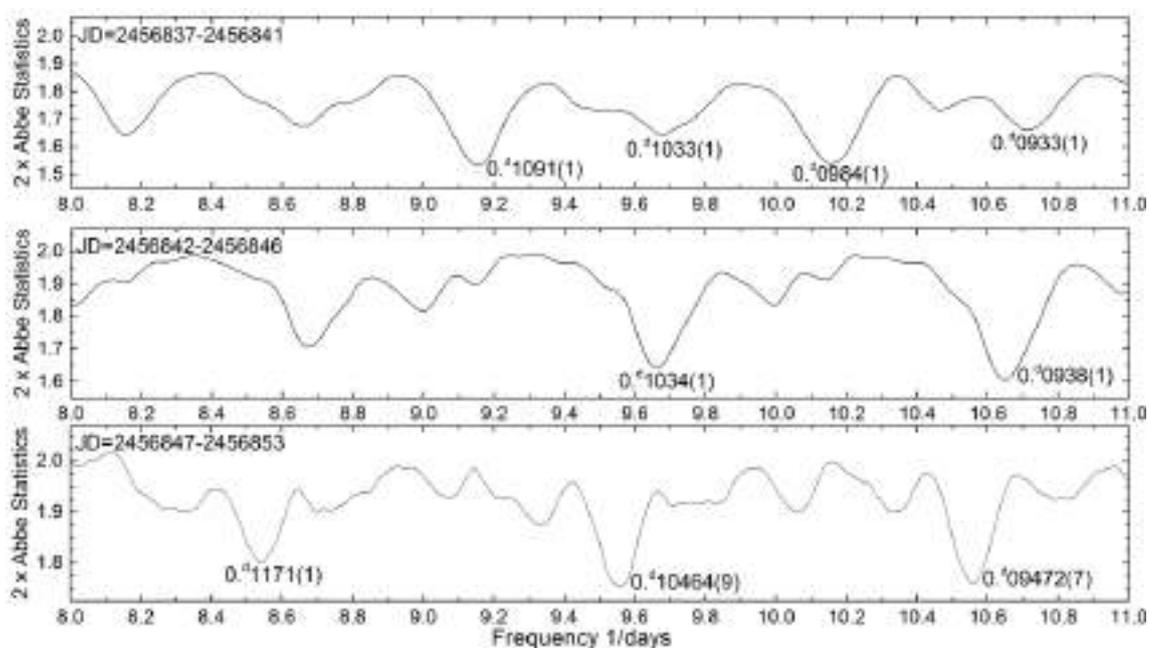


Рис. 27. Периодограммы для сверхвспышки 2014 года. На графиках указан диапазон юлианских дат, для которых проводился частотный анализ.

Самый сильный пик для данных участка сверхвспышки

JD=2456837-2456841 (прекурсор) соответствует периоду  $0.^d1091(1)$ , который совпадает со значением  $0.^d1090$ , определенным по наклону графика О-С. Пик на периоде  $0.^d0984(1)$  является суточно-сопряженным для  $0.^d109(1)$ . Также наблюдаются пики для периодов  $0.^d0933(1)$  и  $0.^d1033(1)$ , близкие к тем значениям, которые мы получили для данных, предшествовавших сверхвспышке.

На периодограмме участка сверхвспышки JD=2456842-2456846 сильнейшие пики соответствуют периодам  $0.^d0938(1)$  и его суточной гармонике  $0.^d1034(1)$ . Можно отметить, что данные пики также присутствовали на первом участке, хотя значимость их была меньше.

На участке JD=2456847-2456853 доминируют пик, соответствующий  $0.^d10464(9)$  и его суточные гармоники на периодах  $0.^d1171(1)$  и  $0.^d09472(7)$ . Также стоит отметить, что добавление данных ночей JD=2456854 и JD=2456855 не изменяет периодограмму, из чего можно сделать вывод, что в эти даты действовал тот же период. Этот результат также согласуется с выводом из анализа О-С.

Таким образом, частотный анализ подтвердил наличие трех разных доминирующих периодов, с первой сменой периодов в точке изменения наклона диаграммы О-С JD=2456842, соответствующей максимальному блеску сверхвспышки. Второй переход произошел в окрестности JD=2456846-2456847.

### **3.1.7. Обсуждение**

Здесь мы приводим возможные интерпретации полученных периодов для каждого из вариантов построения диаграммы О-С, а также рассматриваем их сильные и слабые стороны.

Для var1 мы предполагаем, что в течение 2456837-2456841 наблюдалась стадия А эволюции сверхгорбов с периодом  $0.^d1091(1)$ . В пользу вывода о наличии стадии А говорит сильное увеличение амплитуды сверхгорбов в этом интервале. Период  $0.^d0938(1)$  на участке JD=2456842-2456846 мы интерпретируем как период отрицательных сверхгорбов. В статье Павленко и др. [91] делалась оценка величины предполагаемого периода отрицательных сверхгорбов, которая составила  $\sim 0.^d094$ , что хорошо согласуется с нашим результатом. Можно отметить, что этот период наблюдался не только во время сверхвспышки, но и до неё. Период  $0.^d10464(9)$  хорошо соответствует периоду положительных сверхгорбов на стадии В  $0.^d104531(37)$ , который был получен в более ранних работах по данной звезде [91]. Поэтому мы тоже определяем данный период как период положительных сверхгорбов стадии В. Так как ночи JD=2456854 и JD=2456855 также показывают данный период, то мы классифицируем их как повторное поярчание (ребрайтинг) сверхвспышки.

Для var2 мы предполагаем, что период  $0.^d1091(1)$  является суточно-сопряженным для орбитального периода  $0.^d097558(6)$ , что также согласуется с маленькой амплитудой колебаний в течение прекурсора сверхвспышки. К стадии А мы относим только данные для JD 2456841 и 2456842, для которых грубая оценка периода по наклону О-С дает  $0.^d107$ . Данное значение мы принимаем как период на стадии А или на переходе от А к В. Интерпретация периодов для остальных участков не отличается от первого варианта.

Длительность стадии А для var1 находится в пределах от 4 до 8 дней, в зависимости от того, считать ли две первые ночи данного участка частью стадии А. Данная длительность соответствует количеству циклов от 36 до 73.

Для var2, длительность стадии А будет  $\sim 10$  циклов. Однако возможно, что стадия А началась раньше, но данную частоту на периодограмме перекрывала гармоника орбитального периода или его суточно-сопряженная. Считается, что длительность стадии А характеризует силу приливного взаимодействия в системе, чем длиннее стадия А, тем меньше приливные силы [39].

Так как участок стадии В является линейным, то величина изменения периода  $P_{\dot{}}$  близка к нулю.

4 ночи, которые мы в var1, относим к стадии А сверхвспышки 2014 года можно увидеть на Рис. 24 (графики (1), (2), (6) и (7)).

### 3.1.8. Отношение масс

В предположении, что наша интерпретация верна и мы выделили стадию А, можно оценить отношение масс компонентов системы для обоих вариантов значения периода.

Для получения оценки отношения масс компонент в двойной системе  $q=M_2/M_1$  использовались формулы (4), (6) и (7), приведенные в статье Като и Осаки [34].

Величина  $\varepsilon$  показывает избыток периода сверхгорбов. В качестве значения  $P_{sh}$  брался период на стадии А, так как на этой стадии можно пренебречь эффектом давления газа в аккреционном диске [31]. Для var1 бралось значения  $0.^d1091(1)$ , а для var2 -  $0.^d107$ . В качестве орбитального периода мы берем значение  $0.^d097558(6)$  и получаем следующие величины: 1.) для var1  $\varepsilon=0.118$ ,  $\varepsilon^*=0.106$ ,  $q=0.404(25)$ ; для var2  $\varepsilon=0.097$ ,  $\varepsilon^*=0.088$ ,  $q=0.308(27)$ .

Мы также определили величины  $\varepsilon$  для положительных сверхгорбов стадии В и отрицательных сверхгорбов. Их значения составили  $\varepsilon=0.072$  и  $\varepsilon=-0.038$

соответственно.

### 3.1.9. Сравнение с результатами других авторов

В первой интерпретации диаграммы O-C var1 мы получаем длительность стадии A на уровне 36 или более циклов, что согласуется с предположением о слабом приливном взаимодействии. Это предположение также подкрепляется наличием у данной системы «широких» нормальных вспышек, не достигнувших приливной неустойчивости [91]. Минусом данного варианта является то, что получаемое по нему значение  $q$  является очень большим. Однако данное значение также может быть связано со слабым приливным взаимодействием в системе.

Плюсом второго варианта var2 является меньшее значение  $q$ , которое не выходит за пределы ограничения  $q \sim 0.33$  [57]. Слабой стороной данной интерпретации является малая продолжительность стадии A  $\sim 10$  дней, что противоречит предположению о слабом приливном взаимодействии. Однако, можно предположить, что длительность стадии A была больше, но из-за малой амплитуды сверхгорбов её не удалось обнаружить на фоне орбитальной переменности.

Одной из основных проблем выбора между двумя полученными результатами является близость периода сверхгорбов стадии A для var1  $\sim 0.^d109$  и суточной гармоники орбитального периода  $\sim 0.^d108$ . Из-за этого, мы не можем сделать однозначный выбор одного из двух вариантов и приводим оба, как правдоподобные возможности.

Что касается особенностей изменения амплитуды сверхгорбов, подобные особенности были обнаружены у системы типа SU UMa V1504 Cyg по наблюдениям на космическом телескопе Кеплер [74] (Рис. 28).

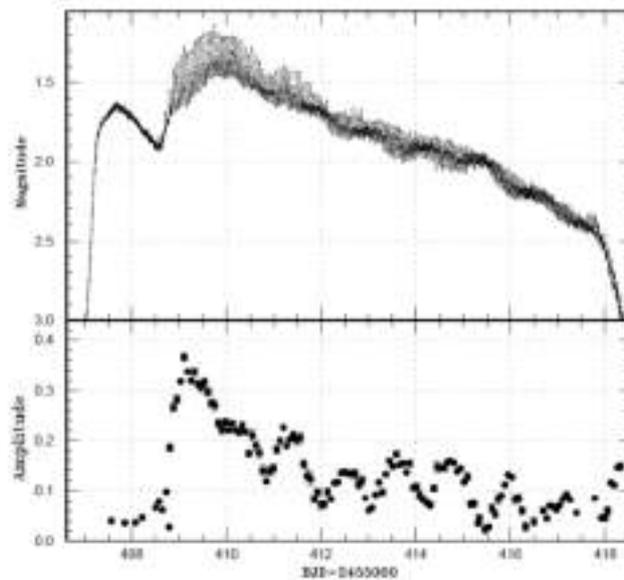


Рис. 28. Кривая блеска сверхвспышки и эволюция амплитуды сверхгорбов V1504 Cyg по данным телескопа Кеплер. Июль-Август 2010 года. Рисунок взят из статьи [74].

На данном рисунке можно видеть, что рост амплитуды происходит быстрее, чем за сутки. Падение амплитуды от  $0.^m36$  до  $0.^m24$  также происходит менее чем за сутки. Таким образом, мы видим, что особенности изменения амплитуды сверхгорбов у NY Ser и V1504 Cyg схожи.

Для разных вариантов описания диаграммы O-C нами были получены соответствующие величины  $q$ . Значение для var1 находится несколько выше предела отношения масс, при котором теоретически возможен резонанс 3:1  $q \sim 0.33$  [57], а значение для var2 не выходит за границы данного предела. Далее мы решили сравнить полученные нами результаты  $q=0.404(25)$  и  $q=0.308(27)$ , с другими звездами типа SU UMa, попадающими в «пробел» периодов. Для звезды V1006 Cyg значение  $q$  было определено в пределах от 0.26-0.34, для MN Dra –  $q=0.258(5)$ - $0.327(5)$  [42]. Можно видеть, у обеих данных звезд отношение масс близко к пределу стабильности резонанса 3:1.

Также стоит отметить большую продолжительность стадии А (в var1) у звезды NY Ser от 36 или более циклов, что соотносится со значениями для звезд V1006 Cyg - 32 цикла и MN Dra – 18-39 циклов [42]. Такая продолжительность объясняется медленным ростом резонанса для долгопериодических систем типа SU UMa [39].

Для рассмотрения полученных значений  $q$  и  $\varepsilon$ , точки для известных звезд в «пробеле периодов», а также полученные нами значения, были добавлены к оригинальным данным из статьи Паттерсона и др. [86], где значения  $q$  и  $\varepsilon$  получены независимо друг от друга. Результат представлен на Рис. 29. Данные для звезд в «пробеле периодов» взяты из статьи Като и др. [42], так же были нанесены точки, полученные для звезды NY Ser в данной работе. Для звезды MN Dra были нанесены обе пары значений. Для NY Ser мы нанесли оба варианта значений  $q$  и  $\varepsilon$  полученных нами. Стоит учесть, что данные взятые из работы Като и др. [42] рассчитывались по формуле Като и др. [31], поэтому они могут иметь сдвиг.

На графике видно, что добавленные значения хорошо ложатся на прямую, из чего мы можем сделать вывод, что обе пары полученных нами значений  $q$  и  $\varepsilon$  не выбиваются из общей зависимости. Также было проверено, как полученные нами величины ложатся на зависимость  $\log \varepsilon$  от  $\log P_{orb}$ , представленную в работе [76]. Оба наших значения  $\varepsilon$  попадают выше линейной аппроксимации, однако значение var2 имеет меньшее отклонение.

Похожий результат получается при нанесении наших точек на зависимость  $q$  от  $P_{orb}$ , представленную в работе [85]. Здесь данные var2 ложатся на теоретическую кривую, а данные для var1 лежат немного выше неё.

Для уверенного определения стадии А необходимы детальные многодолготные наблюдения на разных этапах развития сверхвспышки.

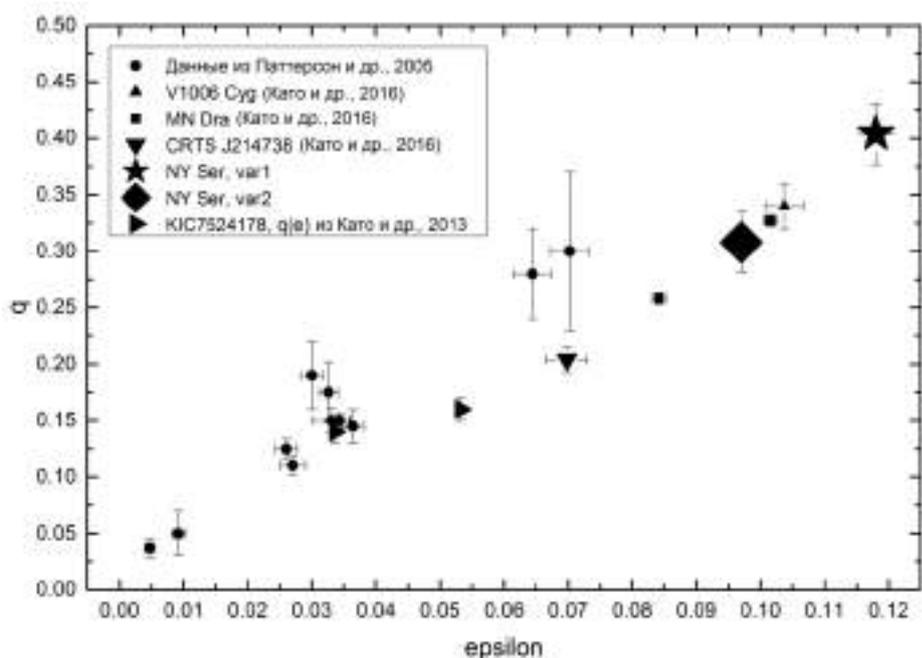


Рис. 29. Зависимость  $q$  от  $\epsilon$ , построенная по данным из работы Паттерсона и др. [86] и дополненная новыми данными для звезд в «пробеле периодов».

### 3.1.10. Выводы

Нами была проведена кампания по наблюдениям звезды NY Ser в 2014 г и 2016 г, позволившая получить уникальные наблюдения данной звезды как во время сверхвспышки так и во время нормальных вспышек.

Впервые была построена диаграмма хода О-С максимумов сверхгорбов для сверхвспышки у данной звезды. Получено 2 варианта интерпретации диаграммы О-С, имеющие свои сильные и слабые стороны. Во время сверхвспышки была впервые выделена стадия А, а также впервые обнаружены отрицательные сверхгорбы. Были измерены периоды сверхгорбов для всех обнаруженных стадий в 2-х вариантах интерпретации. Стадия А: для var1  $P_{sh}=0.^d1091(1)$ , для var2  $P_{sh}=0.^d107$ . Средний период отрицательных сверхгорбов составил  $0.^d0938(1)$ , средний период положительных сверхгорбов стадии В -  $0.^d10464(9)$ . Были получены величины избытка периода сверхгорбов на стадии В  $\epsilon=0.072$  и дефицита

периода отрицательных сверхгорбов  $\varepsilon = -0.038$ .

Для обоих вариантов хода О-С были получены величины избытка периода сверхгорбов на стадии их роста:  $\varepsilon = 0.118$ ,  $\varepsilon^* = 0.106$  (для var1) и  $\varepsilon = 0.097$ ,  $\varepsilon^* = 0.088$  (для var2). Соответствующие оценки отношения масс для каждого их 2-х вариантов составили  $q = 0.404(25)$  и  $q = 0.308(27)$ . Заметим, что увеличивающееся число звёзд типа SU UMa, попадающих в «пробел периодов» также показывает несколько завышенное отношение масс по сравнению с теоретическим пределом, необходимым для запуска приливной неустойчивости. Като и др. высказали необходимость поднятия этого предела [45].

Было показано, что характер изменения амплитуды сверхгорбов схож со звездой V1504 Cyg.

Также было показано наличие у данной системы нормальных вспышек как типа “outside-in”, так и типа “inside-out”.

**Личным вкладом диссертанта в данную работу является:**

Участие в постановке задачи

Получение и обработка 64-х ночей наблюдений на телескопе К-380.

Обработка 3-х ночей полученных на 1.5-м телескопе РТТ-150.

Обработка 14 ночей полученных на 50-см телескопе ARCSAT.

Частотных анализ и построение диаграмм О-С для всего объема наблюдений.

Определение моментов экстремумов для всего объема наблюдений.

Расчет отношения масс  $q$ .

Обсуждение полученных результатов.

Написание текста статьи.

### 3.2. Изменения периода отрицательных сверхгорбов карликовой новой типа SU UMa MN Dra (2009 - 2017 гг.)

Карликовая новая MN Dra имеет координаты  $\alpha=20:23:38.18$  и  $\delta=+64:36:26.58$ . Карта окрестности с отмеченной переменной и звездой сравнения представлена на рисунке 30.

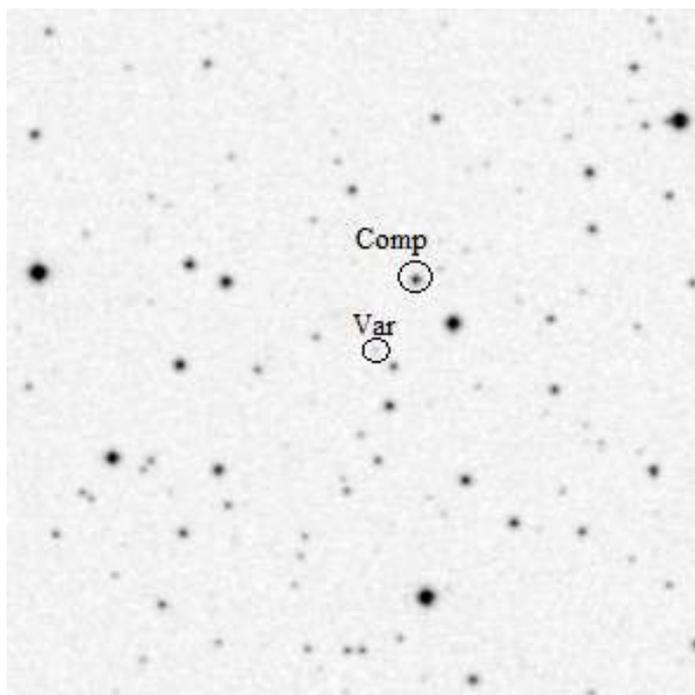


Рис. 30. Карта окрестности звезды MN Dra размером 5x5 угловых минут. Переменная звезда обозначена как Var, звезда сравнения как Comp.

Звезда MN Dra была обнаружена Антипиным на архивных фотопластинках в 2001 г. [1] Первоначально ей было присвоено обозначение Var73 Dra. Последовавшая кампания наблюдений классифицировала данную систему как карликовую новую типа SU UMa, с орбитальным периодом, попадающим в «пробел периодов» [1]. Период положительных сверхгорбов был определен как  $0.^d0954$ , но не исключен и вероятный суточно-сопряженный период  $0^d.104$ . Интервал между соседними нормальными вспышками был

относительно короткий – около 8 сут. [1]. Далее в 2002-2003 годах последовала ещё одна кампания по наблюдению данной звезды [60]. Период сверхгорбов был уточнен и составил  $0.^d104885(93)$ . Сверхцикл системы был определен как  $\sim 60$  дней. Также была обнаружена периодичность в минимуме блеска с периодом  $0.^d10424(3)$  [60]. Это послужило основой предположению о том, что у данной звезды наблюдаются перманентные положительные сверхгорбы. В 2009 г. период колебаний блеска в спокойном состоянии был уточнен до 0.096 дня, что позволило идентифицировать его как период отрицательных сверхгорбов [88; 98]. Орбитальный период системы был оценен Павленко и др. [88] как  $0.^d0998(2)$  и Баковской и др. как  $0,0994(1)$  [3]. Павленко и др. [88] впервые выявили, что период отрицательных сверхгорбов показывает тенденцию к увеличению по мере приближения к нормальной вспышке. Продолжение наблюдений в этом же году подтвердило наличие отрицательных сверхгорбов, средний период которых оказался равным  $0.^d095952$ . Авторы показали, что тенденция к увеличению периода отрицательных сверхгорбов к началу нормальной вспышки наблюдалась, по крайней мере, для двух циклов [89]. Заметим, что интервал между нормальными вспышками при этом был 15-16 сут., что вдвое больше, чем в 2001 г. В 2014 году Като и др. [39] впервые опубликовали оценки отношения масс компонент в данной системе:  $q = 0.327$  и  $q = 0.258$ . В 2018 году была опубликована работа [3], делающая вывод об увеличении сверхцикла у данной звезды до  $74 \pm 0.5$  дней.

Целью нашей работы является подробное изучение эволюции отрицательных сверхгорбов во время сверхцикла для нескольких сезонов наблюдений.

### 3.2.1. Изучение периодических процессов на разных стадиях вспышечной активности MN Dra в 2009 году

Фотометрические наблюдения MN Dra в 2009 году проводились в Крымской астрофизической обсерватории на 2.6-м телескопе ЗТШ и 38-см телескопе К-380, крымской станции института Штернберга с использованием 60-см телескопа Цейсс, в обсерватории Tatranska Lomnica на 50-см телескопе, а также на 60-см телескопе обсерватории Терскол. Наблюдения охватили 77 ночей (433 часа) в период с августа по ноябрь и позволили засечь 2 сверхвспышки и 5 нормальных вспышек. Наблюдения проводились в полосе R и в интегральном свете. Наблюдения в интегральном свете приводились к фильтру R. Общая кривая блеска представлена на рисунке 31. В это время блеск объекта изменялся от 15.5 до 20 звездной величины. В максимуме блеска наблюдения проводились на маленьких телескопах, в минимуме кроме ЗТШ (экспозиции 30-60 сек) объект наблюдался и на 60-см с экспозициями 3-5 мин. Эти экспозиции обеспечивали достаточную точность, учитывая большую амплитуду отрицательных сверхгорбов (до  $\sim 1.5$  зв. вел).

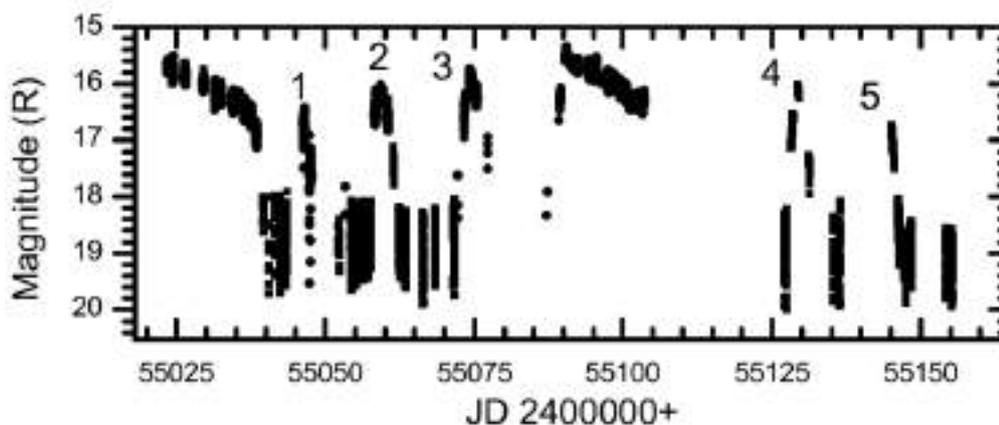


Рис. 31. Общая кривая блеска MN Dra по наблюдения 2009-го года.

Во время обеих сверхвспышек MN Dra показывала положительные

сверхгорбы, период которых уменьшался со временем. На Рис. 32 показана эволюция периода сверхгорбов для первой сверхвспышки.

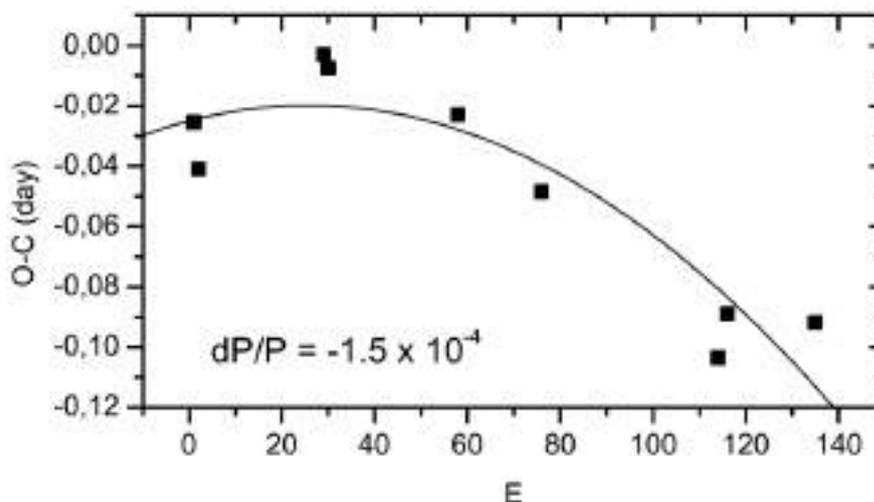


Рис. 32. Диаграмма O-C для максимумов положительных сверхгорбов во время 1-й сверхвспышки.

Можно видеть, что период положительных сверхгорбов уменьшался со скоростью  $P_{\dot{dot}} = -1.5 \times 10^{-4}$  на протяжении 135 циклов. Это находится в согласии с предыдущими измерениями величины  $P_{\dot{dot}}$ , полученными Като и др. [31], и Ногами и др. [60].

Переменность блеска наблюдалась также во время нормальных вспышек и в минимуме блеска. Данные колебания блеска были интерпретированы как отрицательные сверхгорбы. В то время как основные черты эволюции положительных сверхгорбов хорошо известны, сведений об эволюции отрицательных сверхгорбов к началу исследований (2009 г.) не было. Это мотивировало нас провести долговременные исследования на примере MN Dra. Примеры индивидуальных кривых блеска, содержащих отрицательные сверхгорбы, представлены на рисунке 33.

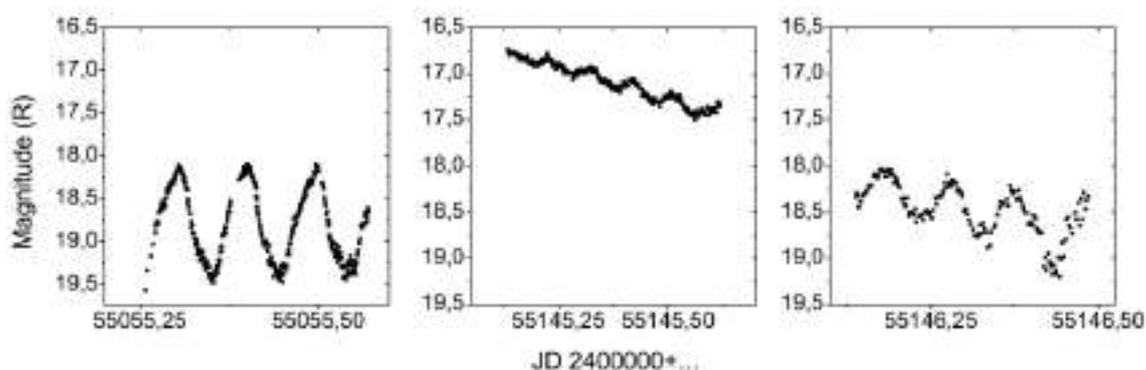


Рис. 33. Примеры индивидуальных кривых блеска содержащих отрицательные сверхгорбы в спокойном состоянии (левый график), схождение с максимума нормальной вспышки (средний график) и приближение к спокойному состоянию (правый график).

Как было показано ранее [88], амплитуды отрицательных сверхгорбов могут меняться от  $0^m.1-0^m.2$  во время нормальных вспышек, до  $1^m-1^m.4$  в минимуме. Они показывают рост амплитуды когда общая яркость системы уменьшается (рис. 34).

Моменты максимумов отрицательных сверхгорбов были определены для всех ночей, где это было возможно. Используя период  $0.^d09598$  была построена диаграмма О-С для отрицательных сверхгорбов, которая представлена на рисунке 35.

На диаграмме О-С можно видеть циклические изменения периода отрицательных сверхгорбов от одной вспышки к другой, имея наибольшую величину в спокойном состоянии перед вспышкой. Далее происходит скачкообразное изменение периода с наибольшего значения на наименьшее с началом нормальной вспышки, после чего период отрицательных сверхгорбов показывает тенденцию к увеличению до первоначального значения.

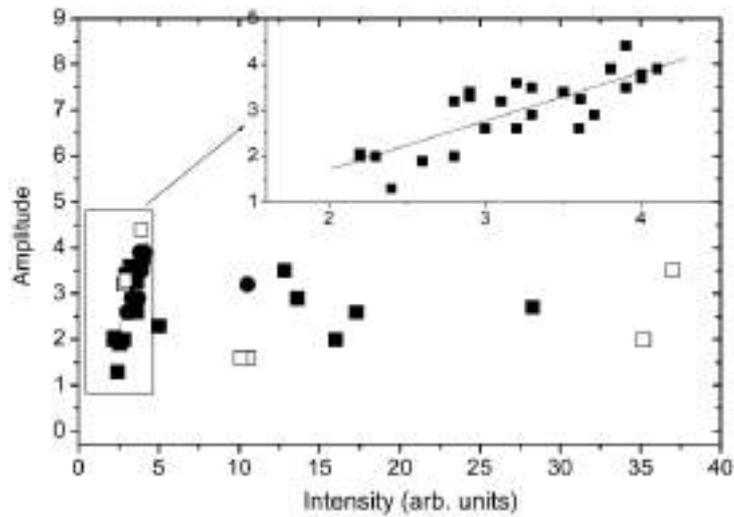


Рис. 34. Зависимость амплитуды отрицательных сверхгорбов от средней интенсивности в минимуме. Зависимость амплитуды от средней интенсивности для данных в минимуме блеска приведены на увеличенном графике. Данные полученные на телескопе ЗТШ обозначены заполненными кружками, на 60-см телескопе (Терскол) заполненными квадратами, а на 60-см телескопе (ГАИШ) – пустыми квадратами.

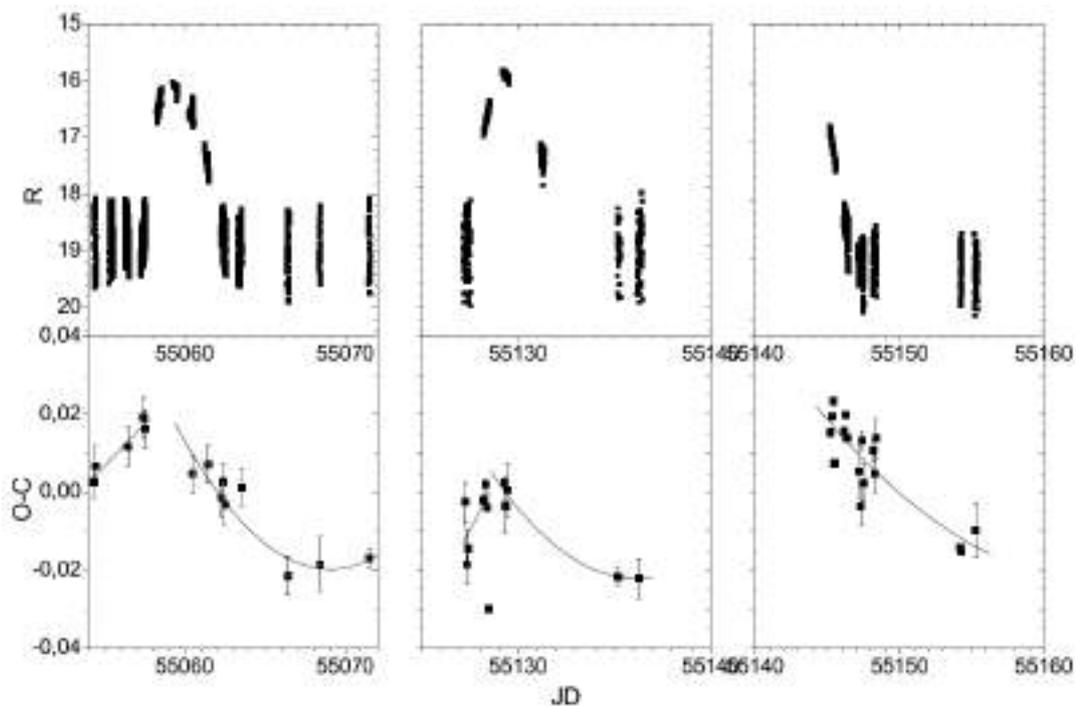


Рис. 35. Кривые блеска и диаграммы О-С для максимумов отрицательных сверхгорбов во время 3-х нормальных вспышек.

### **Результаты данной работы:**

В данной работе впервые показано циклическое поведение диаграммы O-C отрицательных сверхгорбов и зависимость амплитуды отрицательных сверхгорбов от общей яркости системы.

### **Личным вкладом диссертанта в данную работу является:**

Получение и обработка 61 ночи наблюдений на телескопе K-380.

Обработка 3-х ночей полученных на 2.6-м телескопе ЗТШ.

Частотных анализ и построение диаграмм O-C для обеих сверхвспышек и 3-х нормальных вспышек (1-3).

Обсуждение полученных результатов.

### **3.2.2. Изменения периода отрицательных сверхгорбов карликовой новой типа SU UMa MN Dra (2012 - 2017 гг.)**

Несколько кампаний по наблюдениям звезды MN Dra проводились в 2012 – 2017 гг в течение 145-х ночей на девяти телескопах без использования светофильтров. Журнал наблюдений приведен в Приложении к диссертации. Кампания 2012 г. проходила с 3 июня по 19 ноября на телескопах АЗТ-11 (1.25м, ПЗС ProLine PL23042) Крымской Астрофизической Обсерватории (КрАО), телескопе «Астротел» (30см, ПЗС Apogee Alta 9000) Казанского Федерального Университета, ARCSAT (50см, ПЗС APOGEE U-47UV) обсерватории Апачи-Пойнт (США). Полученные наблюдения охватили 82 ночи. В 2013 г. объект наблюдался в течение одной ночи на ЗТШ. В 2017 году наблюдения проходили с 28 апреля по 25 ноября в течение 63 ночей на телескопах K-380 (38см, матрица APOGEE ALTA E47), АЗТ-11(1.25м,

матрица ProLine PL23042) и ЗТШ (2.6м, матрица APOGEE ALTA E47) КрАО, телескопе СКАС (28см, матрица QSI 583wsg) Казанского Федерального Университета, телескопе АЗТ-8 (70-см, матрица FLI PL4710) наблюдательной станции в с. Лесники КНУ им. Тараса Шевченко, телескопах Zeiss 60 (60см, матрица Fli-ML3041) и 18см телескопе (18см, матрица SBIGST-10XME) наблюдательной станции в с. Стара Лесна Словацкой Академии Наук, телескопах Цейсс 60 (60см, матрица Ap47p), АЗТ-5 (50см, матрица Apogee Alta U16M) и ЗТЕ (1.25м, матрица VersArray-1300) в п. Научный Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ. В качестве звезды сравнения, относительно которой проводилась фотометрия, использовалась звезда с координатами  $20^{\text{h}}23^{\text{m}}35.358^{\text{s}}$ ,  $+64^{\circ}36'56.66''$  из каталога USNO-A2.0. Для нее были получены величины  $V = 16.{}^{\text{m}}33$ ,  $R = 15.{}^{\text{m}}58$  [1].

### **3.2.3. Вспышечные кривые блеска 2012 и 2017 гг.**

Наблюдения в 2012 году покрывают интервал с  $\text{JD}=2456082$  по  $\text{JD}=2456251$  и содержат в себе 82 ночи наблюдений. За это время нами было зарегистрировано 4 нормальные вспышки, одна сверхвспышка и один фрагмент, предположительно относящийся ко второй сверхвспышке. В 2013 г. наблюдения проводились в течение одной ночи. В 2017 году в интервале от  $\text{JD}=2457872$  до  $\text{JD}=2458083$ , содержащем 63 ночи наблюдений, мы зарегистрировали 3 нормальные вспышки и 2 сверхвспышки. Полученные вспышечные кривые представлены на Рис. 36.

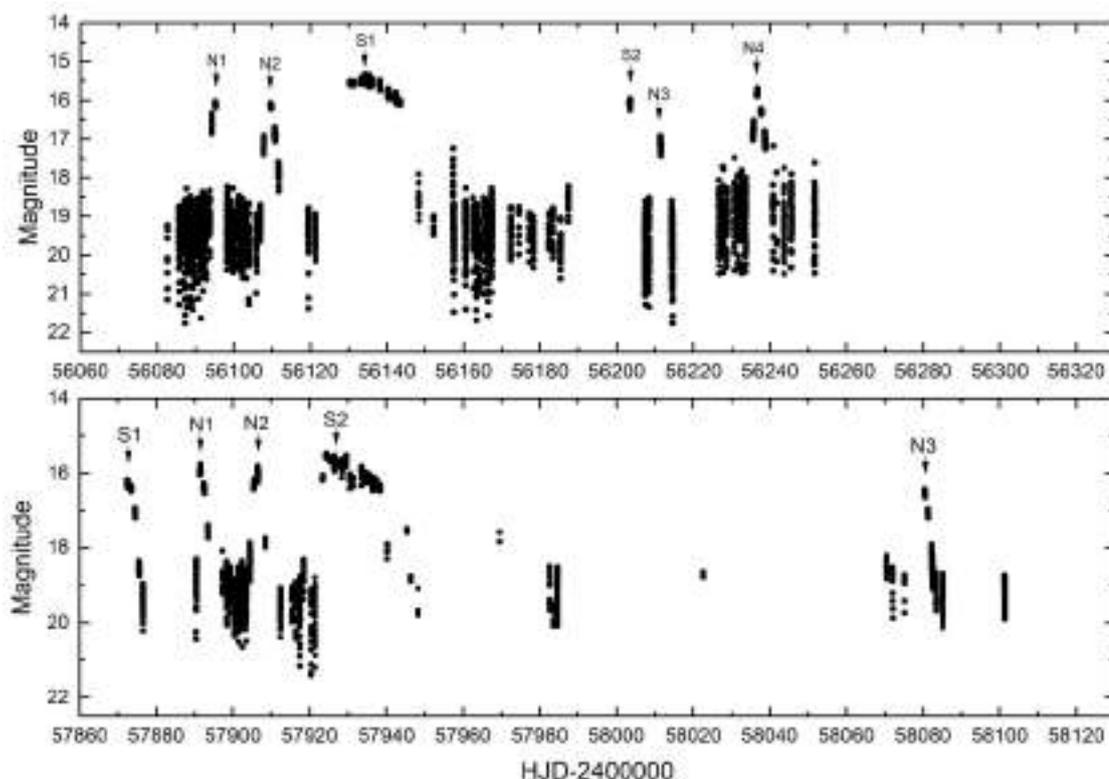


Рис. 36. Вспышечные кривые блеска звезды MN Dra в 2012 г. (вверху) и 2017 г. (внизу). Буквой N обозначены нормальные вспышки, S – сверхвспышки.

К сожалению, покрытие 2012 года наблюдениями не позволяет нам сделать выводы о количестве нормальных вспышек, заключенных в одном сверхцикле. Мы можем только констатировать, что их не менее 2-х. Также в данном году не представляется возможным определить продолжительность сверхцикла системы из-за недостаточного количества наблюдений сверхвспышки S2. В 2017 году мы также можем сказать, что наблюдается не менее 2-х нормальных вспышек за сверхцикл. Величина сверхцикла определяется нами как  $\sim 65$  сут., что больше, чем определенное в 2003 г. значение длины сверхцикла  $\sim 60$  дней [60], но меньше, чем значение  $74 \pm 0.5$  сут. полученное в работе [3] 2018 года. Во все годы наблюдений характерное время возникновения нормальных вспышек держалось на уровне  $\sim 15$  сут.,

как и в 2009 г. Их продолжительность составила 3-4 дня, амплитуда 3-3.5 звездные величины для обоих годов наблюдений. Продолжительность сверхвспышки S2 в 2017 г. составила 18 сут., а амплитуда сверхвспышек достигала  $\sim 4^m$  в 2012 и в 2017 гг.

### 3.2.4. Кривые блеска

Данные всех ночей наблюдений показывают короткопериодические колебания блеска, независимо от вспышечной активности системы. Примеры индивидуальных кривых блеска в разных состояниях системы представлены на Рис. 37. Амплитуды кривых изменяются от  $0^m.06$  в нормальных вспышках до  $2^m$  в неактивном состоянии между ними.

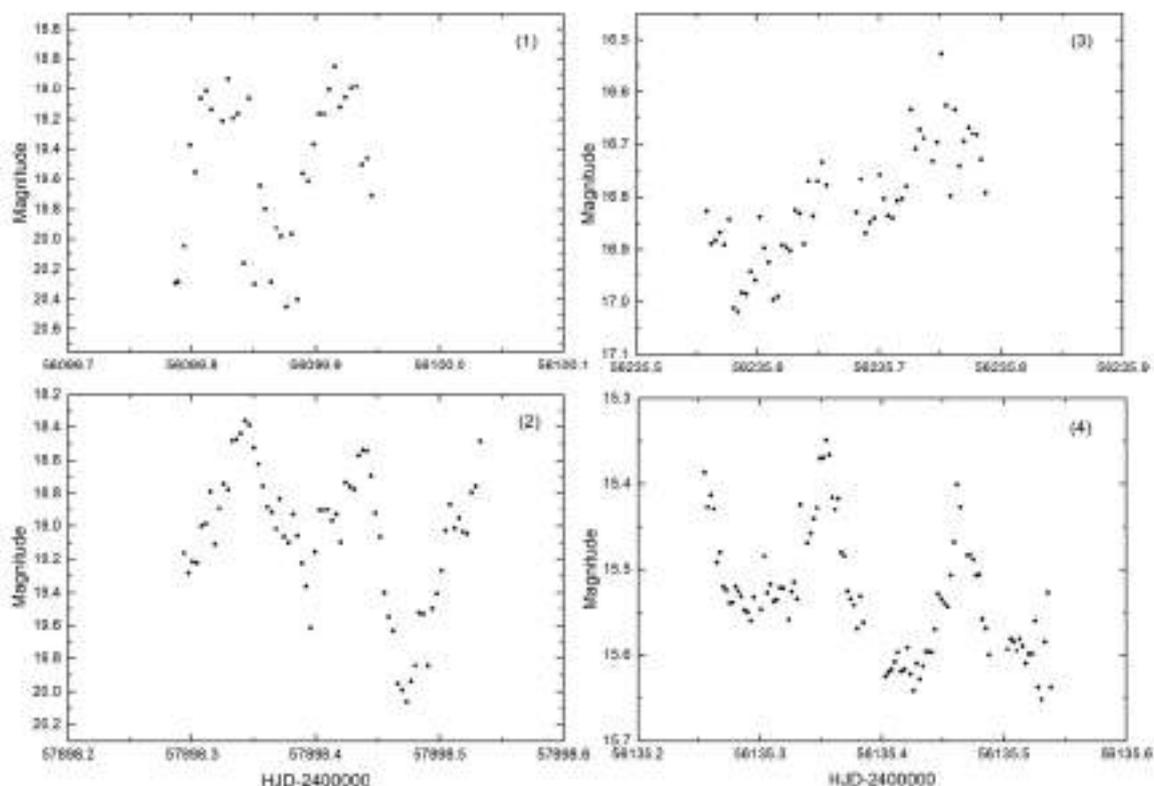


Рис. 37. Примеры индивидуальных кривых блеска на разных этапах вспышечной активности. (1) – в неактивном состоянии 2012 г.; (2) – в неактивном состоянии 2017 г.; (3) – во время нормальной вспышки 2012 г.; (4) - во время сверхвспышки 2012 г.

Нами было замечено ранее, что профиль кривых блеска отрицательных сверхгорбов чаще всего имеет асимметричную форму: более медленный подъем блеска, чем его падение. В этой связи интересна кривая блеска, полученная в 2013 г. (Рис. 38). Для нее характерно резкое увеличение блеска, его квази-остановка длительностью примерно в половину периода и такое же стремительное падение блеска (основной горб). Резкие возрастания и ослабления блеска происходили в среднем за 12 мин. со скоростью 0.06-0.08 зв. вел./минуту. В интервале между соседними основными горбами наблюдался меньший вторичный горб, амплитуда которого возрастала от цикла к циклу. Данные, свернутые с периодом отрицательных сверхгорбов, показывают, что наличие вторичного горба в среднем формирует асимметричный профиль кривой блеска. Заметим, что Земко и др. [120] также сообщили о спорадических появлениях вторичного горба на кривых блеска карликовой новой типа SU UMa ER UMa.

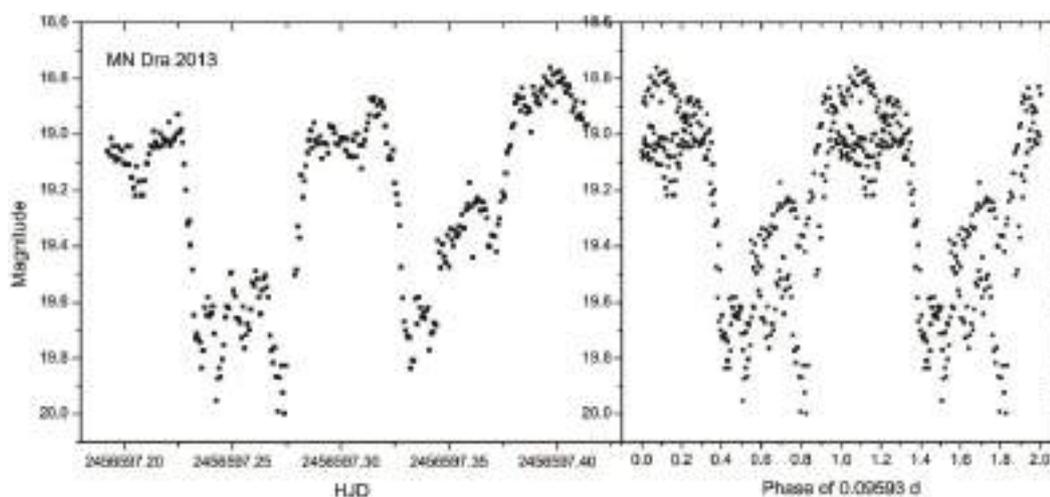


Рис. 38. Пример необычной кривой блеска отрицательных сверхгорбов MN Dra (слева) и фазовая кривая для этих данных (справа). Из кривых видна повторяемость появления вторичного горба (но с разной амплитудой) от цикла к циклу в течение ночи.

### 3.2.5. Частотный анализ данных

Для частотного анализа мы разделим все данные на наблюдения, относящиеся к сверхвспышкам и наблюдения, относящиеся к спокойному состоянию и нормальным вспышкам. Данное разделение производилось и для 2012-го года, и для 2017-го.

Для уменьшения влияния зависимости амплитуды колебаний от яркости системы на статистический анализ временных рядов, данные были переведены в относительные интенсивности ( $I$ ) согласно соотношению (8).

### 3.2.6. Сверхвспышки 2012 и 2017 гг.

Результат частотного анализа методом Стеллингверфа для сверхвспышек показан на рис. 39.

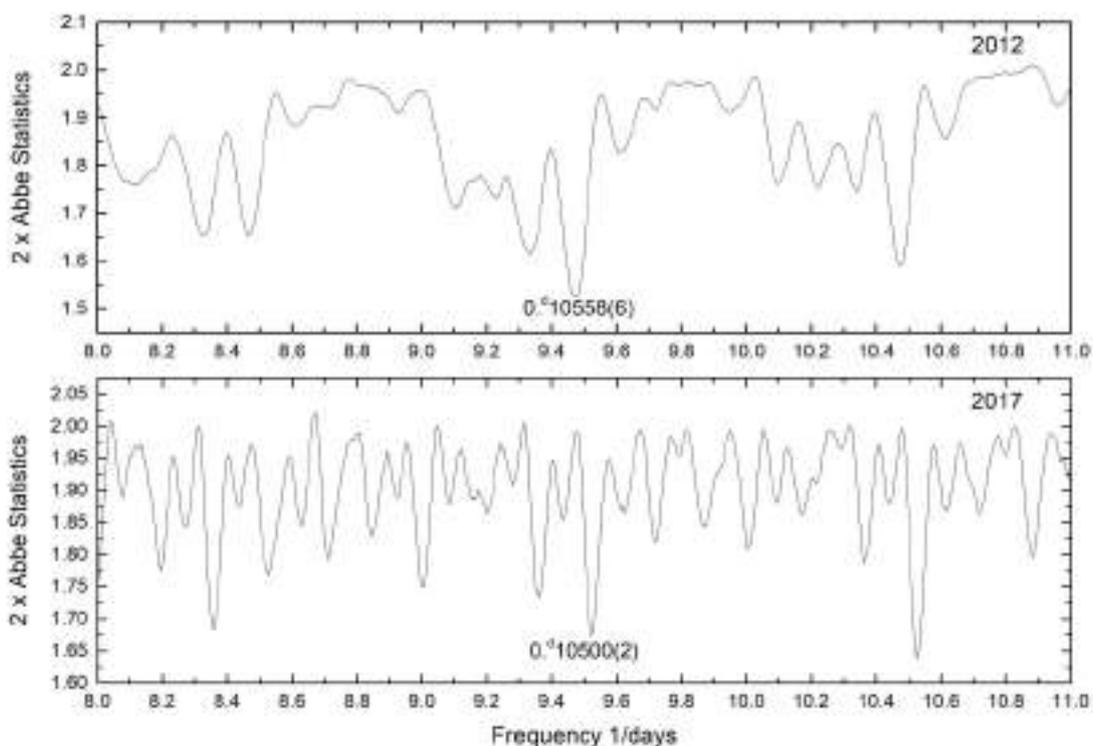


Рис. 39. Периодограммы для данных во сверхвспышках.

Самый сильный пик для наблюдений во время сверхвспышки 2012 г. указывает на период  $0.^d10558(6)$ , а во время сверхвспышки 2017 г. – на  $0.^d10500(2)$ . Мы интерпретируем их как средние периоды положительных сверхгорбов. Расхождение в значениях можно объяснить как разным покрытием сверхвспышек в 2012 и 2017 годах, так и возможными изменениями периода положительных сверхгорбов в течение сверхвспышек.

При помощи комбинирования метода совмещения хорошо прописанного профиля сверхгорба с изучаемой кривой блеска и метода хорд нами были определены моменты максимумов для всех ночей, где это было возможно. Полученные моменты и амплитуды максимумов для сверхвспышек приведены в таб. 3. Подробный анализ изменений O-C во время сверхвспышки 2012 г. дан в работе Като и др. [39].

Таблица 3. Моменты максимумов сверхгорбов (HJD) и их амплитуды для сверхвспышек 2012 и 2017 гг.

HJD-2400000	Амплитуда колебания (зв. величины)	HJD-2400000	Амплитуда колебания (зв. величины)
2012 год			
56130.4398	0.063	56135.4651	0.201
56130.5278	0.068	56138.2351	0.173
56131.4242	0.059	56140.407	0.169
56133.2965	0.119	56142.5072	0.178
56134.2773	0.199	56143.4612	0.107
56134.5012	0.185	56148.368	0.490

Таблица 3. (продолжение)

56135.3535	0.180		
2017 год			
57872.4497	0.121	57924.4093	0.078
57873.5015	0.101	57925.3744	0.05
57874.447	0.121	57926.4938	0.094
57875.4997	0.234	57929.517	0.166
57876.4561	0.565	57935.4134	0.159

### 3.2.7. Неактивное состояние и нормальные вспышки 2012 – 2017 гг.

Периодограммы для спокойного состояния и нормальных вспышек представлены на рис. 40.

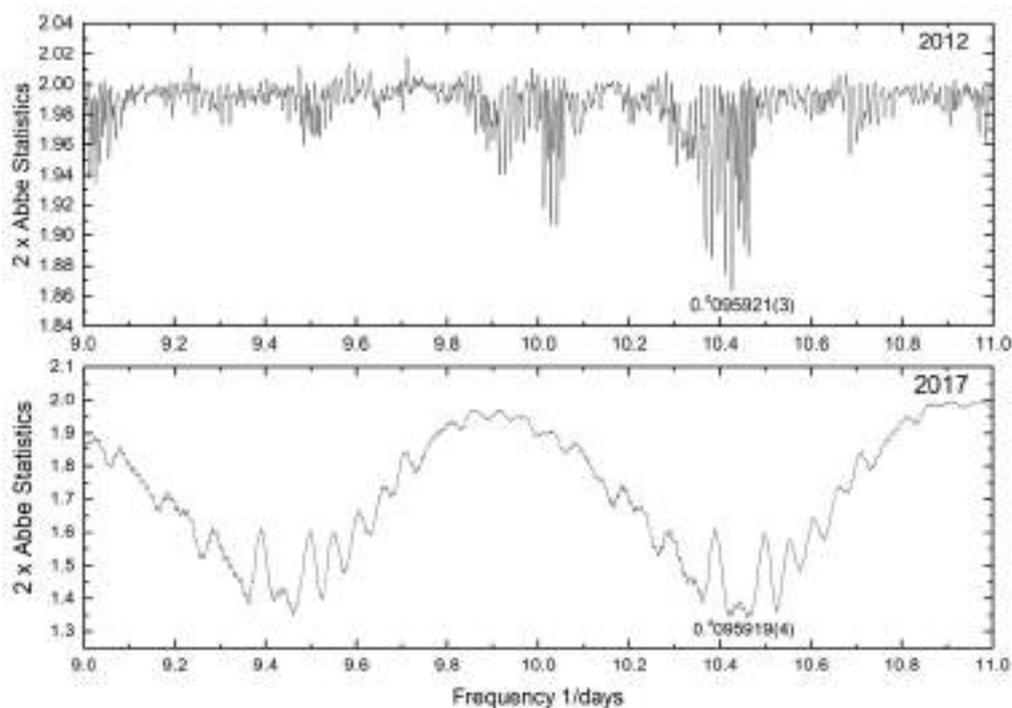


Рис. 40. Периодограммы для данных в спокойном состоянии и нормальных вспышках для 2012 г. (вверху) и 2017 г. (внизу). Частотный анализ проводился по всем имеющимся данным.

Наиболее сильным сигналом для данных 2012 года в неактивном состоянии является период  $0^d.095921(3)$ , который совпадает со средней величиной периода отрицательных сверхгорбов [88]. На периодограмме для 2017 года данный период также доминирует (пик на  $0.095919(4)$  сут.).

Обратим внимание, что на периодограммах обоих сезонов наблюдений пик, центрированный на частоту периода отрицательных сверхгорбов, расщеплен на более мелкие пики. Такое расщепление может быть вызвано тем, что этот период претерпевает изменения на шкале наблюдений, что было замечено для этого объекта ранее [88]. Анализ возможных изменений периода был проведен нами с помощью метода О-С для максимумов кривых блеска.

Полученные моменты и амплитуды максимумов для спокойного состояния и нормальных вспышек приведены в таб. 4.

Таблица 4. Моменты максимумов сверхгорбов (HJD) и их амплитуды для спокойного состояния и нормальных вспышек.

HJD-2450000	Амплитуда колебания (зв. величины)	HJD-2450000	Амплитуда колебания (зв. величины)	HJD-2450000	Амплитуда колебания (зв. величины)
2012 год					
6082.8057	1.575	6107.8702	0.294	6207.5454	1.585
6085.7851	1.603	6109.8816	0.084	6208.3941	1.998
6086.7572	1.502	6110.8403	0.175	6211.3548	0.181
6087.3366	1.361	6111.7921	0.497	6211.4593	0.197
6087.8132	1.333	6121.3466	1.010	6214.2421	1.687

Таблица 4. (продолжение)

6088.7762	1.823	6121.4377	0.921	6214.3418	1.899
6089.3526	1.333	6157.3838	1.440	6214.4358	1.907
6089.7418	1.772	6157.4779	1.476	6226.6402	1.718
6090.8022	1.125	6160.4536	1.905	6226.7439	1.756
6091.3811	1.656	6162.4716	1.278	6228.6464	1.461
6091.8646	1.602	6163.4396	1.919	6230.7577	1.676
6092.4512	1.385	6163.5351	1.832	6231.7222	1.536
6092.9284	0.945	6165.3635	2.062	6232.6745	1.704
6093.8955	0.918	6166.4232	1.992	6233.6411	1.737
6094.3935	0.091	6166.5226	2.065	6233.7341	1.720
6095.3345	0.057	6167.3866	1.439	6235.6534	0.201
6098.3968	1.348	6167.4853	1.473	6235.7546	0.177
6099.3538	1.001	6172.2681	1.145	6236.6106	0.072
6099.9182	1.215	6172.3579	1.332	6236.7143	0.075
6101.3552	1.140	6174.363	0.953	6237.6677	0.104
6101.8384	1.128	6177.3248	0.803	6238.7097	0.208
6102.3178	1.370	6178.2909	0.734	6240.7256	1.494
6103.3644	1.184	6182.3146	0.590	6243.5831	1.596
6103.9458	1.034	6183.3875	0.947	6243.6749	1.809
6105.8638	1.288	6185.3043	0.978	6245.6828	1.780
6106.8184	0.739	6187.3118	0.649	6251.621	1.962
6106.9158	0.739				
2017 год					
7890.3925	0.965	7903.3388	1.154	8070.4265	0.533

Таблица 4. (продолжение)

7891.3516	0.060	7904.3866	0.636	8072.1510	1.278
7891.4551	0.147	7905.4516	0.105	8080.4284	0.084
7892.3102	0.154	7906.5018	0.162	8081.1984	0.187
7892.4107	0.127	7908.4973	0.189	8082.2462	0.275
7892.5025	0.146	7916.3363	1.247	8082.3443	0.432
7893.4533	0.091	7917.4975	2.059	8082.4401	0.436
7898.3416	0.737	7918.3525	0.778	8083.2980	0.729
7898.4306	0.869	7920.3693	2.535	8083.3911	0.759
7899.3948	0.679	7921.4194	1.175	8085.2119	0.693
7900.4483	0.923	7982.566	0.952	8101.3190	0.813
7901.4065	1.109	7984.5747	1.219	8101.4015	1.045
7902.4643	1.033				

Используя периоды отрицательных сверхгорбов для каждого года наблюдений и моменты максимумов отрицательных сверхгорбов, мы получаем значения О-С для всех ночей, где это возможно. Полученные диаграммы представлены на Рис. 41 (2012 год) и Рис. 42 (2017 год).

Поведение амплитуды отрицательных сверхгорбов показывает одинаковую зависимость во всех стадиях вспышечной активности: рост амплитуды в спокойном состоянии, падение во время вспышек.

Диаграммы О-С для 2012 и 2017 гг. показывают непрерывное изменение периода отрицательных сверхгорбов во время всего сверхцикла. Это изменение носит циклический характер между нормальными вспышками. Для хорошо охваченных наблюдениями циклов в окрестности нормальных вспышек на JD 2456095, 2456211, 2456236, 2457891, 2457906 и, вероятно,

пропущенной вспышки в промежутке JD 2456167-2456172, видно, что ход О-С резко изменяется во время нормальных вспышек. В спокойном состоянии между вспышками, О-С постепенно увеличиваются, что соответствует увеличению периода отрицательных сверхгорбов, а во время самой вспышки период быстро уменьшается. Заметим, что точки диаграммы О-С, лежащие на JD=2456121, можно перенести на один период в верхнюю часть диаграммы, так как существует неоднозначность, вызванная возможным просчётом циклов.

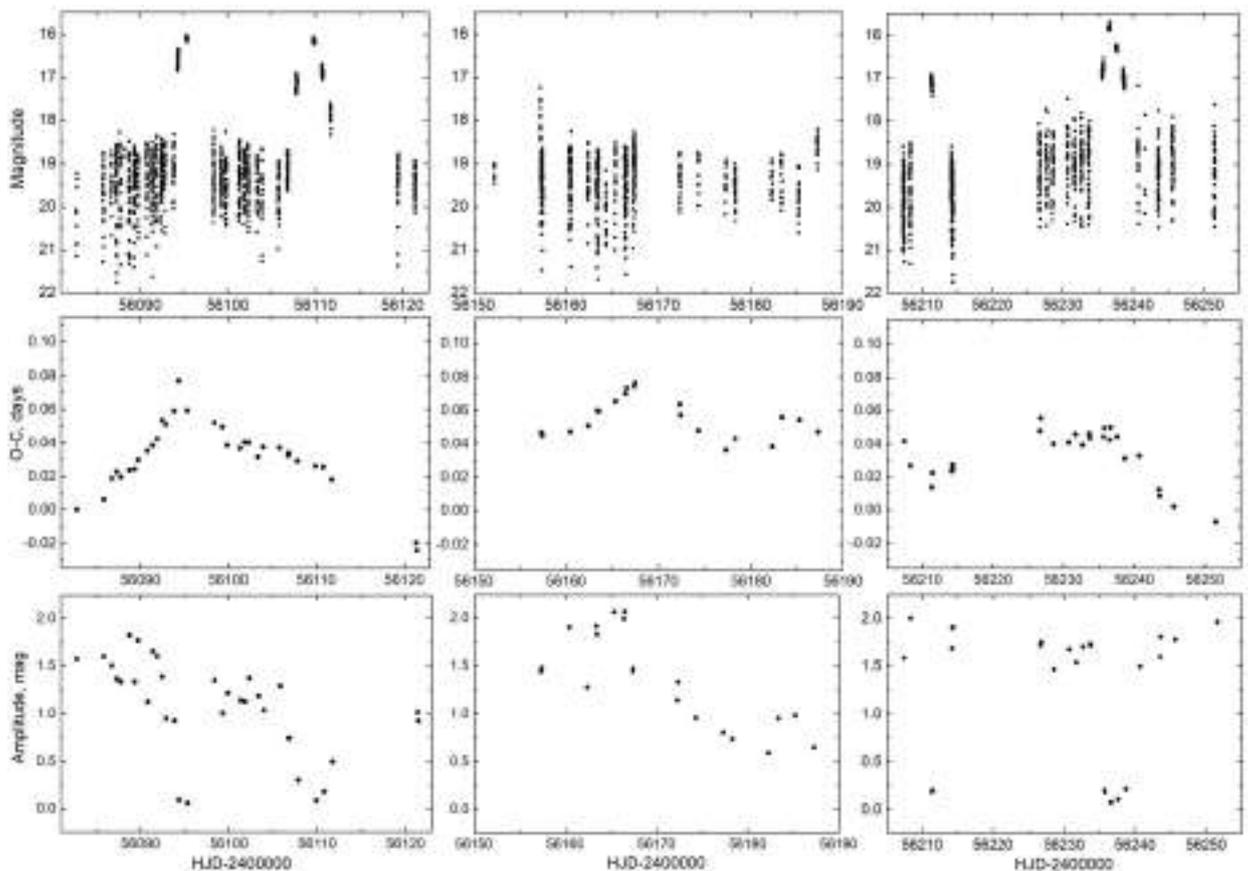


Рис. 41. Сверху вниз: общая кривая блеска; диаграмма О-С; кривая изменения амплитуды сверхгорбов для трех сетов 2012 г. Большой разброс данных в минимуме в отдельные ночи обусловлен уменьшением точности наблюдений из-за малого размера телескопа и/или погодных условий.

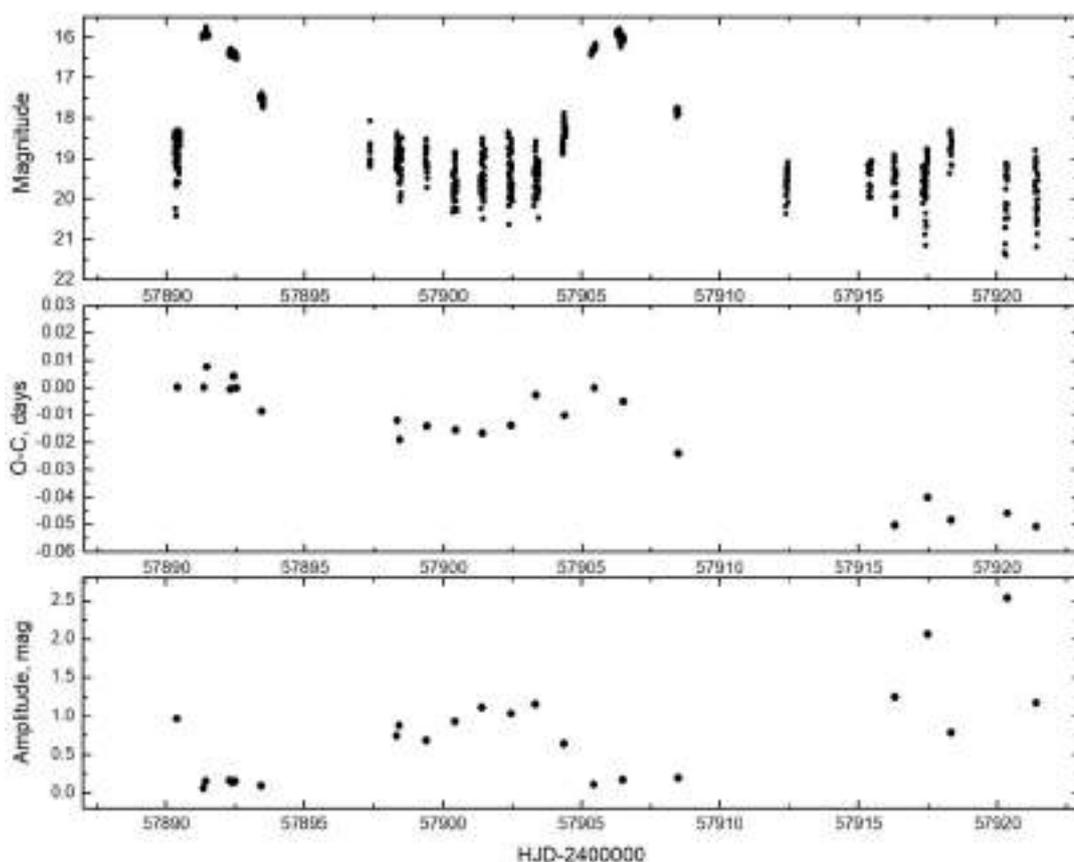


Рис. 42. Сверху вниз: часть общей кривой блеска за 2017 г; диаграмма О-С для максимумов отрицательных сверхгорбов; кривая изменения их амплитуды.

В это же время появилась информация о подобном изменении периода отрицательных сверхгорбов у карликовой новой V1504 Cyg по данным космического телескопа Кеплер [75]. Кроме того, О-С показывают тенденцию к уменьшению среднего периода отрицательных сверхгорбов в течение сверхцикла, что также было продемонстрировано для V1504 Cyg [75] и ER UMa [121]. Результаты периодограммного анализа MN Dra находятся в согласии с выводами анализа О-С. На рис. 43 для примера представлены периодограммы для рядов наблюдений во время одной из вспышек и в спокойном состоянии 2017 г. Согласно периодограммам, период отрицательных сверхгорбов во время вспышки был 0.0951 сут., а к концу

спокойного состояния он увеличился до 0.0961 сут.

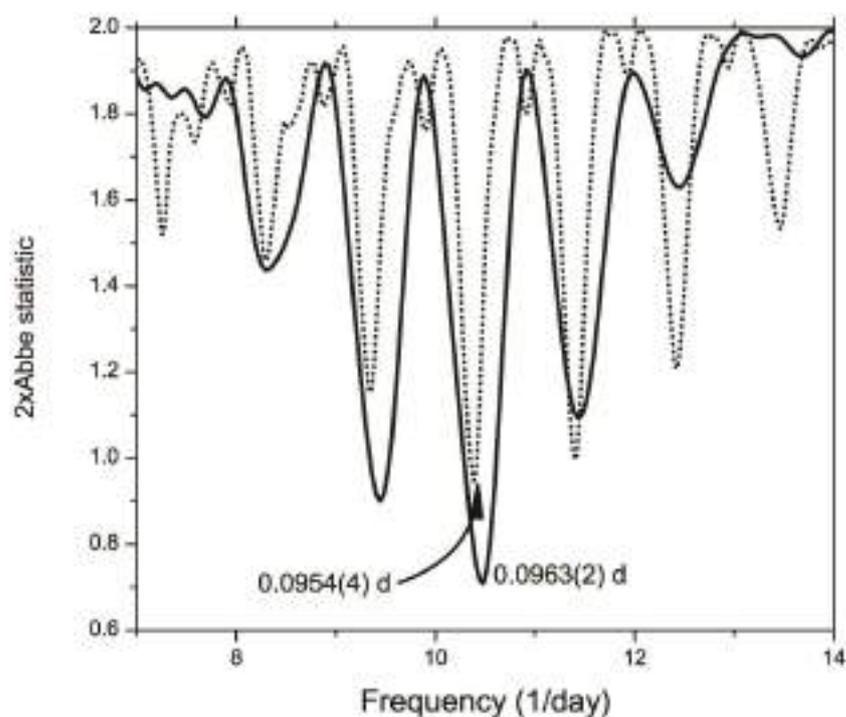


Рис. 43. Периодограммы для данных 2017 г. во вспышке N1 (две ночи в интервале  $JD = 2457891.45-2457892.46$ , сплошная линия) и в спокойном состоянии (четыре ночи в интервале  $JD = 2457900.45-2457903.49$ , точечная линия).

Осаки и Като обосновали важность выявления характера изменения периода сверхгорбов между нормальными вспышками и между сверхвспышками для определения эволюции аккреционного диска и, следовательно, получения аргументов подтверждающих или опровергающих ту или иную модель вспышек карликовых новых. По упрощенной модели Ларвуда [50] для ретроградной прецессии наклонного диска, радиус диска обратно пропорционален периоду отрицательных сверхгорбов. В рамках этой модели картина изменений O-C MN Dra соответствует расширению аккреционного диска во время нормальной вспышки и постепенному его

уменьшению в спокойном состоянии. При этом средний радиус аккреционного диска растет с ростом фазы сверхцикла. Такие изменения как раз предсказаны теорией приливно-тепловой неустойчивости аккреционного диска [67].

### 3.2.8. Выделение стадии роста положительных сверхгорбов и проблема экстремально резкого уменьшения $\dot{P}_{dot}$

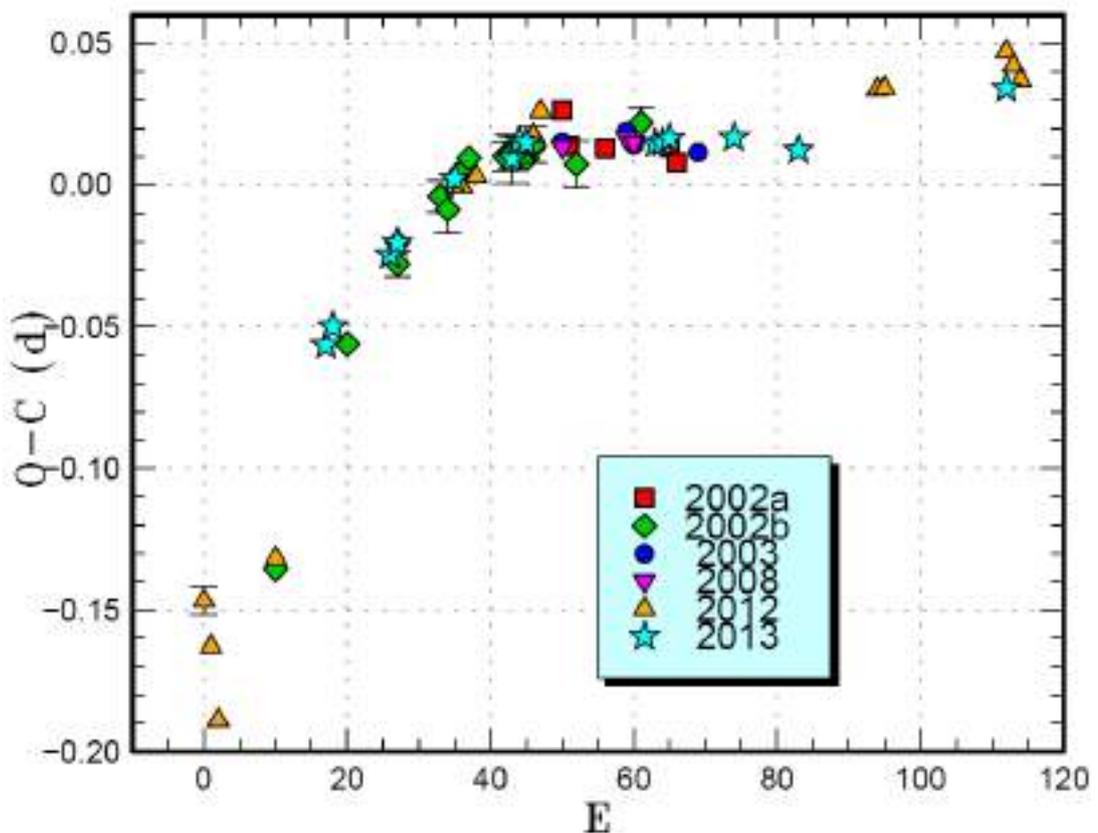


Рис. 44 Сравнение диаграмм О-С полученных для разных сверхвспышек звезды MN Dra. Для построения диаграммы использовался период  $0.^d1050$ . По оси x откладывалось предполагаемое количество циклов, прошедших с начала сверхвспышки 2012 г. Графики для других годов были сдвинуты для наилучшего согласования с диаграммой 2012 года.

По ранним наблюдениям сверхвспышки 2009 г. были определены О-С положительных сверхгорбов и глобальный  $P_{\text{dot}}$ , оказавшийся равным  $P = -1.5 \times 1.0^{-4}$ . Такая резкая скорость уменьшения периода сверхгорбов по сравнению с другими объектами, имеющими близкие по величине орбитальные периоды, наблюдалась у MN Dra и ранее [60; 31]. Проблема была разрешена после наблюдений сверхвспышек 2012 и 2013 годов [39], которые обеспечили более полное покрытие стадий эволюции сверхгорбов. Сравнение диаграмм О-С для разных сверхвспышек представлено на рисунке 44 [39].

Из данного графика можно сделать вывод, что высокие значения скорости изменения периода  $P_{\text{dot}}$  связаны с тем, что наблюдения полученные в 2003 и 2008 годах [60; 31], попадают на участок изменения периода сверхгорбов между стадиями А и В.

### **3.2.9. Первое обнаружение стадии роста сверхгорбов (стадии А) у MN Dra и оценка отношения масс**

Сверхгорбы на стадии А, с растущими амплитудами колебаний блеска, были обнаружена у системы MN Dra по анализу диаграммы О-С сверхвспышки 2012 года. Период сверхгорбов на стадии А был определен как  $0.^d10993(9)$ , что позволило сделать оценку отношения масс  $q=0.327(5)$ . Продолжительность стадии А была дольше чем ожидалось. Это позволяет сделать предположение, что радиус диска был заключен в области возбуждения резонанса 3:1 более длительное время, чем у обычных звезд типа SU UMa. Данное явление может быть объяснено близостью отношения масс  $q$  в данной системе к критическому значению, необходимому для возникновения приливной неустойчивости. Также, это может служить

объяснением сильных отрицательных изменений периода ( $P_{\text{dot}}$ ) сверхгорбов, наблюдавшихся ранее в системах с длинными орбитальными периодами.

### 3.2.10. Выводы

Были проведены две кампании по наблюдениям карликовой новой MN Dra в 2012-2017 гг. на девяти телескопах в течение 152-х ночей и наблюдения в течение одной ночи в 2013 г. Наблюдениями были охвачены четыре сверхвспышки и семь нормальных вспышек, а также спокойное состояние между ними.

Мы исследовали вспышечную активность системы и выявили, что для 2017 г. интервал между соседними сверхвспышками составил 65 сут., а между соседними нормальными вспышками – 15 сут.

Как и в 2009 г., в 2012 и 2017 гг. MN Dra во время сверхвспышек показывала положительные сверхгорбы, а в спокойном состоянии и в нормальных вспышках – отрицательные. Средний период положительных сверхгорбов для 2012 г. оказался равным 0.10558(6) сут., а в 2017 – 0.10500(2) сут.

Периодограммный анализ и анализ О-С максимумов блеска отрицательных сверхгорбов показал циклическое изменение периода сверхгорбов от одной нормальной вспышки к другой: В спокойном состоянии О-С постепенно увеличиваются, что соответствует увеличению периода отрицательных сверхгорбов, а во время самой вспышки период быстро уменьшается.

В рамках упрощенной модели наклонного диска [50] (Ларвуд), такие изменения О-С могут соответствовать расширению аккреционного диска во время нормальной вспышки и постепенному его уменьшению в спокойном состоянии, что как раз находится в соответствии с теорией

приливно-тепловой неустойчивости аккреционного диска [67].

Впервые была выделена стадия роста приливной неустойчивости, что дало возможность корректно определить отношение масс в этой системе.

Получена оценка отношения масс  $q=0.327(5)$ .

**Личным вкладом диссертанта в данную работу является:**

Получение и обработка 23-х ночей наблюдений на телескопе Astrotel.

Обработка 2-х ночей полученных на 28-см телескопе СКАС КФУ.

Частотный анализ и построение диаграмм О-С для всего объема наблюдений.

Определение моментов экстремумов для всего объема наблюдений.

Обсуждение полученных результатов.

Написание текста статьи.

### **3.3. Долгопериодическая SU UMa карликовая новая V1006 Cyg: вспышечная активность и периодичность на разных стадиях вспышечной активности**

Звезда V1006 Cyg была обнаружена Хоффмайстером как карликовая новая с диапазоном блеска 16-18 звездных величин [25]. По измерению лучевых скоростей был получен орбитальный период равный  $0^d.09903(9)$  суток [10]. V1006 Cyg была обнаружена в широкой вспышке продолжительностью более шести дней в 2007 году и более 5 дней в 2009 году [92], во время которых не наблюдались сверхгорбы, но обнаруживались изменения блеска с орбитальным периодом.

Сверхвспышка данной звезды 2015 года была очень подробно изучена, что позволило обнаружить период положительных сверхгорбов  $0^d.10541$  и классифицировать V1006 Cyg как карликовую новую типа SU UMa,

попадающую в пробел периодов [41]. Также была произведена оценка отношения масс в системе равная 0.26-0.33.

Фотометрическое изучение V1006 Cyg было проведено на 11 телескопах, находившихся в 7 обсерваториях, в фотометрической системе Джонсона-Куйзенса  $UBVR_cI_c$  или в интегральном свете. Измерения блеска проводились относительно звезды сравнения 140 из базы AAVSO. Наблюдения V1006 Cyg проводились со сверхвспышки 17 июля 2015 года до 27 ноября 2017 года, в течение 81 ночей (106 сетов наблюдений). Общая кривая блеска для наиболее плотной части наблюдений 2015 года показана на рисунке 45.

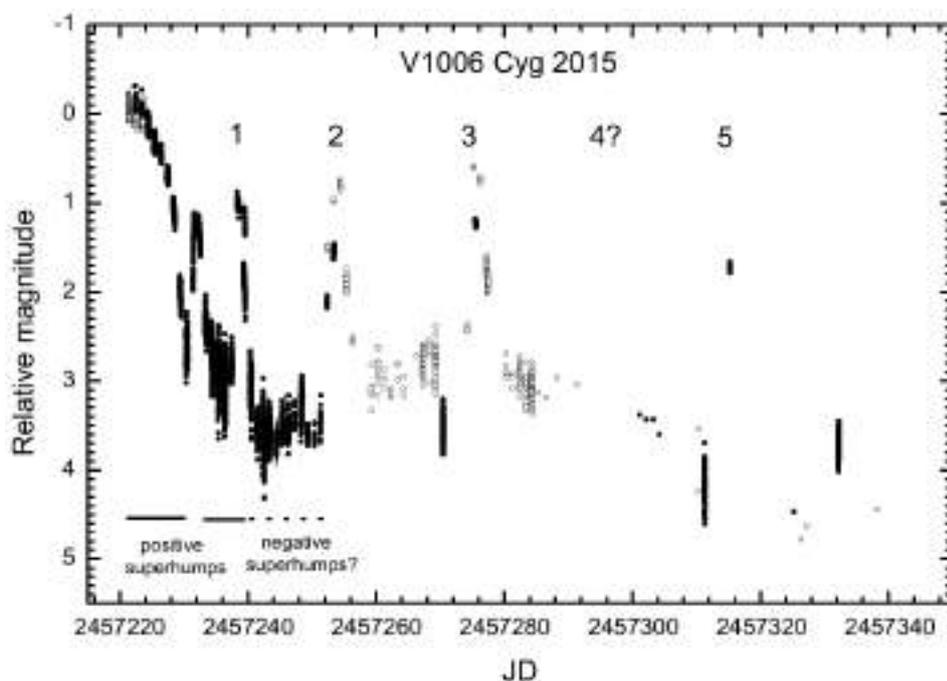


Рис. 45. Общая кривая блеска V1006 Cyg для 2015 года. Данные в фильтре  $R_c$  и данные в интегральном свете показаны пустыми и заполненными кружками соответственно. Звездные величины даны относительно звезды №140. Нормальные вспышки (включая возможную вспышку 4) отмечены номерами. Для участка JD 2457221 - 2457246 указаны типы наблюдаемой переменности.

Амплитуда сверхвспышки в фильтре  $R_c$  составила  $3^m.5$ , продолжительность 18-19 суток с учетом ребрайтинга. Амплитуды нормальных вспышек были на несколько десятых звездной величины меньше и переменными, что было вызвано большой переменностью яркости в спокойном состоянии. Первая нормальная вспышка произошла через 6 дней после ребрайтинга. Цикл между 1-й и 2-й нормальными вспышками был 16 суток, между 2-й и 3-й 22 суток.

Было проведено изучение короткопериодических колебаний блеска в первые 25 ночей от начала сверхвспышки 2015 года. Этот участок охватывал сверхвспышку, ребрайтинг и первую нормальную вспышку. Результаты частотного анализа представлены на рис. 46.

Положительные сверхгорбы, со средним периодом  $P1 = 0^d.10544(10)$ , были обнаружены во время сверхвспышки. В спокойном состоянии между ребрайтингом и началом 1-й нормальной вспышки средний период положительных сверхгорбов составил  $P2 = 0^d.10406(17)$ . Периодограмма в спокойном состоянии между 1-й и 2-й нормальными вспышками показала наиболее значимыми пиками  $P4 = 0^d.107594(85)$  and  $P5 = 0^d.097142(74)$ , которые являются суточно-связанными. Также на периодограмме присутствует период  $P3$ , который совпадает с периодом положительных сверхгорбов  $P2$ , но имеет меньшую значимость. Признаков орбитального периода на этой стадии не обнаружено. Из двух периодов  $P4$  и  $P5$  мы отдаем предпочтение  $P5$ , потому что он ближе к потенциально возможному периоду отрицательных сверхгорбов.

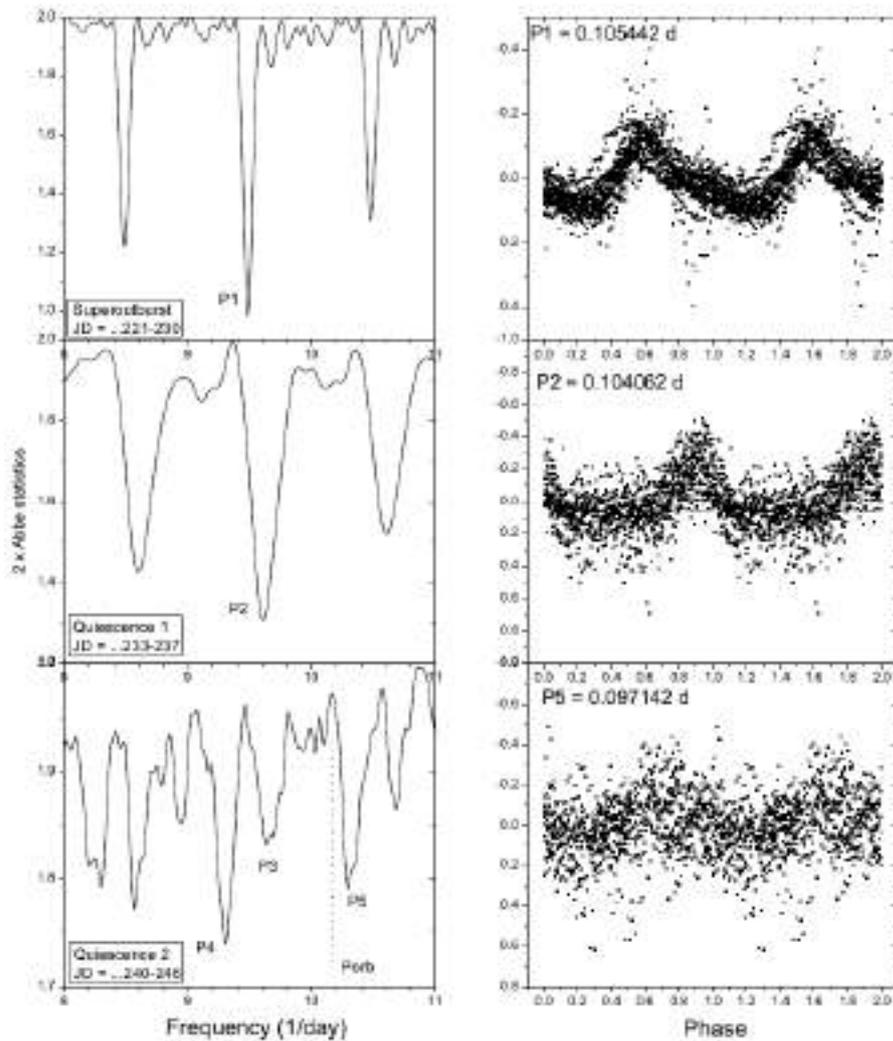


Рис. 46. В левой части рисунка сверху вниз представлены периодограммы для следующих участков: сверхвспышка, спокойное состояние между ребрайтенингам и первой нормальной вспышкой и спокойное состояние между 1-й и 2-й нормальными вспышками. Границы каждого из участков указаны. Помечены наиболее сильные пики на периодограмме, также отмечен орбитальный период. Фазовые кривые, свернутые с наиболее значимыми периодами для каждого участка, представлены в правой части рисунка.

Зная орбитальный период  $P_{orb} = 0^d.09903$ , период положительных сверхгорбов  $P2 = 0^d.104062$  и предположительный период отрицательных

сверхгорбов  $P_5 = 0^d.09714$ , можно посчитать избыток положительных сверхгорбов  $\varepsilon^+ = (P_{+sh} - P_{orb})/P_{orb}$  и дефицит отрицательных сверхгорбов  $\varepsilon^- = (P_{-sh} - P_{orb})/P_{orb}$  где  $P_{+sh}$  и  $P_{-sh}$  это периоды положительных и отрицательных сверхгорбов соответственно. Мы получили значения  $\varepsilon^+ = 0.051$ ,  $\varepsilon^- = -0.019$  и значение  $\varphi = \varepsilon^- / \varepsilon^+ = -0.037$ . Полученные результаты согласуются с эмпирической зависимостью между  $\varepsilon^-$ ,  $\varepsilon^+$  и орбитальным периодом [24]. Значению  $\varphi = -0.037$  соответствует отношение масс  $q \sim 0.30-0.32$ , что совпадает с независимо полученными оценками, полученными Като [41]  $q \sim 0.26-0.33$ . Исходя из этого можно заключить, что обнаруженный период  $0^d.09714$  действительно является периодом отрицательных сверхгорбов.

#### **Результаты данной работы:**

По наблюдения V1006 Cyg было определено, что сверхцикл системы превышает 126 суток, циклы были переменными со значениями 16 и 22 суток для 2015 года. Был обнаружен период положительных сверхгорбов, который существовал в течение сверхвспышки вплоть до 1-й, а возможно и 2-й нормальной вспышки. Период переменности обнаруженный в спокойном состоянии между 1-й и 2-й нормальными вспышками, вероятно, является периодом отрицательных сверхгорбов. Отношение дефицита отрицательных сверхгорбов к избытку положительных сверхгорбов дает отношение масс  $q \sim 0.30-0.32$ , что соотносится со значениями  $q \sim 0.26-0.33$  полученными ранее [41].

#### **Личным вкладом диссертанта в данную работу является:**

Получение и обработка 8 ночей наблюдений на 28-см телескопе северокавказской станции КФУ.

Полученные наблюдения попали на участок между 1-й и 2-й нормальной

вспышкой, в котором был обнаружен предполагаемый период отрицательных сверхгорбов.

### **Заключение к главе 3**

В данной главе представлены результаты исследований 3-х карликовых новых систем типа SU UMa, у которых наблюдались отрицательные сверхгорбы. Однако, характер наблюдаемых сверхгорбов является разным. У звезды MN Dra отрицательные сверхгорбы наблюдаются в течение нескольких лет в минимуме блеска, что показывает длительное поддержание состояния с наклоненным аккреционным диском. Для NY Ser было показано появление отрицательных сверхгорбов во время сверхвспышки, на шкале времени дни - десятки дней. Это указывает на то, что состояние наклонного аккреционного диска может возникать на относительно коротком промежутке времени во время вспышечной активности. Для V1006 Cyg представлено вероятное обнаружение отрицательных сверхгорбов на стадии ребрайтингов.

## Заключение

1.) Получены уникальные ряды фотометрических наблюдений катаклизмических переменных ASASSN-14cv, NY Ser и MN Dra в течение 126 ночей с 2012 по 2016 гг.

- Для NY Ser сверхцикл составил  $\sim 102$  суток. Средний интервал между нормальными вспышками 7-9 суток.

- Для MN Dra сверхцикл составил  $\sim 65$  суток. Средний интервал между нормальными вспышками 15 суток.

- У ASASSN-14cv было обнаружено восемь повторных поярчаний (ребрайтенингов) с характерным временем 4-5 суток, система была классифицирована как карликовая новая типа WZ Sge с многократными ребрайтенингами (тип В).

2) У NY Ser во время сверхвспышки 2014 г. впервые выделены две стадии эволюции периода положительных сверхгорбов: стадия роста сверхгорбов «А» с периодом  $P_{sh}=0.^d1091(1)$ , или  $P_{sh}=0.^d107$  для двух вариантов хода О-С; и стадии развитых сверхгорбов «В» со средним периодом  $0.^d10464(9)$ . Уточнён орбитальный период системы равный  $0.^d09748(2)$ . Впервые обнаружены отрицательные сверхгорбы во время сверхвспышки 2014 г. со средним периодом  $0.^d0938(1)$ .

- У MN Dra был выявлен циклический характер изменения периода отрицательных сверхгорбов в спокойном состоянии и в нормальных вспышках от одной нормальной вспышки к другой, воспроизводящийся для разных лет наблюдений. Обнаружено, что в спокойном состоянии О-С экстремумов блеска постепенно увеличиваются, что соответствует увеличению периода отрицательных сверхгорбов, а во время самой вспышки период быстро уменьшается. Среднее значение периода отрицательных

сверхгорбов по наблюдениям 2012 г. составил  $0^d.095921(3)$ .

- Выделена стадия А периода положительных сверхгорбов во время сверхвспышки 2012 года.

- У ASASSN-14cv впервые получен средний период сверхгорбов для стадии ребрайтенингов  $0^d.06042(8)$ , совпадающий с периодом положительных сверхгорбов стадии В сверхвспышки  $0^d.06042(1)$ ; обнаружено глобальное уменьшение периода сверхгорбов на этой стадии со скоростью  $P_{\text{dot}} = -1.1 \times 10^{-5}$ .

3) Для NY Ser и MN Dra получены оценки отношения масс компонентов  $q$ , составившие 0.404(25) и 0.308(27) для каждого их 2-х вариантов периода на стадии «А» у NY Ser и 0.327(5) у MN Dra. Эти оценки согласуются с теоретическим утверждением, что диски систем с орбитальными периодами в пробеле периодов во время сверхвспышек находятся на границе приливной неустойчивости. Характер изменения периода отрицательных сверхгорбов MN Dra может соответствовать расширению аккреционного диска во время нормальной вспышки и постепенному его уменьшению в спокойном состоянии, что находится в соответствии с теорией приливно-тепловой неустойчивости аккреционного диска.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы об их значимости и перспективах дальнейших исследований по данным направлениям. Построение эволюции сверхгорбов на стадии повторных вспышек у карликовой новой ASASSN-14cv дает нам значительный объем наблюдательных данных, который может быть использован для изучения причин возникновения ребрайтенингов в целом, и множественных ребрайтенингов в частности. Необходимо накопление большей статистики по эволюции сверхгорбов на стадии ребрайтенингов, чтобы понять

происходящие на этой стадии физические процессы. Получение значения периода положительных сверхгорбов на стадии А для звезд NY Ser и MN Dra, является важным способом определения отношения масс в системе, что позволяет нам делать выводы о динамических процессах в данных системах. Значения отношения масс для этих систем находятся на верхней границе предельного значения, для которого теоретически считается возможным возникновение приливной неустойчивости. Дальнейшее изучение отношений масс (и масс отдельных компонент) у карликовых новых попадающих а «пробел периодов», может позволить сделать вывод о физических особенностях данных систем. Обнаружение отрицательных сверхгорбов во время сверхвспышки NY Ser, а также подробное изучение эволюции периода отрицательных сверхгорбов у MN Dra, может в дальнейшем использоваться для построения и проверки динамических моделей наклонного аккреционного диска. Что, в свою очередь, может послужить материалом для изучения причин, по которым может возникать наклон аккреционного диска у карликовых новых звезд на разных стадиях вспышечной активности.

Автор диссертационной работы хотел бы выразить свою глубокую благодарность научному руководителю, доктору физ.-мат. наук Павленко Елене Петровне за руководство работой, терпение и ценные советы. Также, благодарность хотелось выразить сотрудникам кафедры астрономии и космической геодезии КФУ д.ф.-м.н. Бикмаеву И. Ф. и к.ф.-м.н. Шиманскому В. В. за помощь в подготовке текста диссертации и конструктивные замечания.

## Список литературы

- [1] Antipin S. V., Pavlenko E. P. Discovery and photometric study of the new in-the-gap SU UMa Dwarf Nova Var 73 Dra // *Astronomy and Astrophysics*. – 2002. – V. 391. – P. 565–569.
- [2] Bailey J. Two cataclysmic variables similar to WZ Sagittae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1979. – V. 189. – P. 41–44.
- [3] Bakowska K., Olech A., Pospieszynski R. et al. MN Draconis: a peculiar, active dwarf nova in the period gap // *Astronomy & Astrophysics*. – 2017. – V. 603. – ID A72. – P. 1–14.
- [4] Barrett P., O'Donoghue D., Warner B. Photometry of the intermediate polar TV Columbae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1988. – V. 233. – P. 759–771.
- [5] Barrett P., O'Donoghue D., Warner B. Erratum - Photometry of the Intermediate Polar Tv-Columbae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1989. – V. 236. – № 3. – P. 735–736.
- [6] Bateson F. M. The light curve of the dwarf nova, VW Hydri // *New Zealand Journal of Science*. – 1977. – V. 20. – P. 73–122.
- [7] Bath G. T. Dynamical instabilities and mass exchange in binary systems // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1975. – V. 171. – P. 311–328.
- [8] Bath G. T., Pringle J. E. The evolution of viscous discs. II - Viscous variations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1982. – V. 199. – P. 267–280.
- [9] Berardi P., Lester T., Teyssier F. Spectroscopic classification of ASASSN-14cv as a cataclysmic variable in outburst [Electronic resource] // *The*

Astronomer's Telegram. – 2014. – № 6258. – Режим доступа: <https://www.astronomerstelegram.org/?read=6258>, свободный. – Загл. с экрана.

[10] Bruch A., Schimpke T. Spectroscopy of poorly known northern dwarf novae. Part II. // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. – 1992. – V. 93. – P. 419–439.

[11] Buat-Menard V., Hameury J.-M. Superoutbursts, superhumps and the tidal-thermal instability model // *Astronomy and Astrophysics*. – 2002. – V. 386. – P. 891–898.

[12] Cannizzo J. K., Still M. D., Howell S. B. et al. The Kepler Light Curve of V344 Lyrae: Constraining the Thermal-viscous Limit Cycle Instability // *The Astrophysical Journal*. – 2010. – V. 725. – I. 2. – P. 1393–1404.

[13] Cannizzo J. K., Smale A. P., Wood M. A. et al. The Kepler Light Curves of V1504 Cygni and V344 Lyrae: A Study of the Outburst Properties // *The Astrophysical Journal*. – 2012. – V. 747. – I. 2. – ID 117. – P. 1–12.

[14] Downes R. A., Margon B. On the nature of WX Cet // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1981. – V. 197. – P. 35–38.

[15] Downes R. A. IUE Observations of WX Ceti in Outburst // *Astronomical Journal*. – 1990. – V. 99. – P. 339–343.

[16] Foulkes S. B., Haswell C. A., Murray J. R. Three-dimensional smoothed particle hydrodynamics simulations of radiation-driven warped accretion discs // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2006. – V. 366. – I. 4. – P. 1399–1409.

[17] Gansicke B. T., Dillon M., Southworth J. et al. SDSS unveils a population of intrinsically faint cataclysmic variables at the minimum orbital period // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2009. – V. 397. – I. 4. – P. 2170–2188.

- [18] Green R. F., Ferguson D. H., Liebert J., Schmidt M. Cataclysmic variable candidates from the Palomar Green Survey // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1982. – V. 94. – P. 560–564.
- [19] Green R. F., Schmidt M., Liebert J. The Palomar-Green catalog of ultraviolet-excess stellar objects // Astrophysical Journal Supplement Series. – 1986. – V. 61. – P. 305–333.
- [20] Hameury J.-M., Lasota J.-P., Warner B. The zoo of dwarf novae: illumination, evaporation and disc radius variation // Astronomy and Astrophysics. – 2000. – V. 353. – P. 244–252.
- [21] Hameury J. M. A review of the disc instability model for dwarf novae, soft X-ray transients and related objects // Advances in Space Research. – 2020. – V. 66. – I. 5. – P. 1004–1024.
- [22] Hameury J.-M., Lasota J.-P. Modelling rebrightenings, reflare, and echoes in dwarf nova outbursts // Astronomy and Astrophysics. – 2021. – V. 650. – ID A114. – P. 1–12.
- [23] Harvey D., Skillman D. R., Patterson J., Ringwald F. A. Superhumps in Cataclysmic Binaries. V. V503 Cygni // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1995. – V. 107. – P. 551–560.
- [24] Hellier C. On Echo Outbursts and ER UMa Supercycles in SU UMa-Type Cataclysmic Variables // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2001. – V. 113. – I. 782. – P. 469–472.
- [25] Hoffmeister C. Neue veranderliche Sterne // Astronomische Nachrichten. – 1963. – V. 287. – P. 169–182.
- [26] Imada A., Kubota K., Kato T. et al. Discovery of a New Dwarf Nova, TSS J022216.4+412259.9: WZ Sge-Type Dwarf Nova Breaking the Shortest Superhump Period Record // Publications of the Astronomical Society of Japan. –

2006. – V. 58. – № 4. – P. L23–L27.

[27] Ishioka R., Uemura M., Matsumoto K. et al. First detection of the growing humps at the rapidly rising stage of dwarf novae AL Com and WZ Sge // *Astronomy and Astrophysics*. – 2002. – V. 381. – P. L41–L44.

[28] Kato T., Matsumoto K., Nogami D. et al. 1998 Superoutburst of the Large-Amplitude SU UMa-Type Dwarf Nova WX Ceti // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2001. – V. 53. – № 5. – P. 893–900.

[29] Kato T. On the Origin of Early Superhumps in WZ Sge-Type Stars // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2002. – V. 54. – № 2. – P. L11–L14.

[30] Kato T., Pavlenko E., Maehara H. et al. SDSS J080434.20+510349.2: Eclipsing WZ Sge-Type Dwarf Nova with Multiple Rebrightenings // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2009. – V. 61. – № 3. – P. 601–613.

[31] 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*. – 2009. – V. 61. – I. SP2. – P. S395–S616.

[32] Kato T., Maehara H., Miller I. 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*. – 2012. – V. 64. – № 1. – ID 21. – P. 1–80.

[33] Kato T., Hamsch F.-J., Maehara H. et al. Survey of Period Variations of Superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae. IV. The Fourth Year (2011-2012) // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2013. – V. 65. – № 1. – ID 23. – P. 1–76.

[34] Kato T., Osaki Y. New Method of Estimating Binary's Mass Ratios by Using Superhumps // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2013. –

V. 65. – № 6. – ID 115. – P. 1–12.

[35] Kato T. ASASSN-14cv: updated period of early superhumps [Electronic resource] // vsnet-alert. – 2014. – № 17415. – Режим доступа: <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/17415>, свободный. – Загл. с экрана.

[36] Kato T. ASASSN-14cv: updated period of stage A superhumps [Electronic resource] // vsnet-alert. – 2014. – № 17466. – Режим доступа: <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/17466>, свободный. – Загл. с экрана.

[37] Kato T. ASASSN-14cv: stage B superhumps with a small Pdot [Electronic resource] // vsnet-alert. – 2014. – № 17499. – Режим доступа: <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/17499>, свободный. – Загл. с экрана.

[38] Kato T., Hamsch F.-J., Maehara H. et al. Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. V. The fifth year (2012-2013) // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2014. – V. 66. – I. 2. – ID 30. – P. 1–83.

[39] Kato T., Dubovsky P. A., Kudzej I. et al. Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. VI. The sixth year (2013-2014) // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2014. – V. 66. – I. 5. – ID 90. – P. 1–71.

[40] Kato T. WZ Sge-type dwarf novae // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2015. – V. 67. – I. 6. – ID 108. – P. 1–42.

[41] Kato T., Pavlenko E. P., Shchurova A. V. et al. V1006 Cygni: Dwarf nova showing three types of outbursts and simulating some features of the WZ Sge-type behavior // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2016. – V. 68. – I.

2. – ID L4. – P. 1–5.

[42] Kato T., Hamsch F.-J., Monard B. et al. Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. VIII. The eighth year (2015-2016) // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2016. – V. 68. – I. 4. – ID 65. – P. 1–64.

[43] Kato T., Isogai K., Hamsch F.-J. 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. – 2017. – V. 69, I. 5, ID 75. – P. 1–57.

[44] Kato T., Isogai K., Wakamatsu Y. et al. Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. X. The tenth year (2017) // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2020. – V. 72. – I. 1. – ID 14. – P. 1–88.

[45] Kato T., Tampo Y., Kojiguchi N. et al. BO Ceti: Dwarf nova showing both IW And-type and SU UMa-Type features // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2021. – V. 73. – I. 5. – P. 1280–1288.

[46] Knigge C. The donor stars of cataclysmic variables // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2006. – V. 373. – I. 2. – P. 484–502.

[47] Kozhevnikov V. P. Extensive photometry of the WZ Sge-type dwarf nova V455 And (HS2331+3905): Detection of negative superhumps and coherence features of the short-period oscillations // New Astronomy. – 2015. – V. 41. – P. 59–66.

[48] Kuulkers E., Howell S. B., van Paradijs J. SXTs and TOADs: Close Encounters of the Same Kind // Astrophysical Journal Letters. – 1996. – V. 462. – P. L87–L90.

[49] Lai D. Magnetically Driven Warping, Precession, and Resonances in Accretion Disks // The Astrophysical Journal. – 1999. – V. 524. – I. 2. – P.

1030–1047.

[50] Larwood J. On the precession of accretion discs in X-ray binaries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1998. – V. 299. – I. 2. – P. L32–L36.

[51] Lubow S. H. Simulations of Tidally Driven Eccentric Instabilities with Application to Superhumps // *Astrophysical Journal*. – 1991. – V. 381. – P. 268–277.

[52] Madej J., Paczynski B. Disk Structure in U Geminorum // *The Interaction of Variable Stars with their Environment, Proceedings of IAU Colloq. 42*. – 1977. – P. 313–321.

[53] Maloney P. R., Begelman M. C., Nowak M. A. Radiation-driven Warping. II. Nonisothermal Disks // *The Astrophysical Journal*. – 1998. – V. 504. – I. 1. – P. 77–92.

[54] Montgomery M. M. Atlas of tilted accretion discs and source to negative superhumps // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2009. – V. 394. – I. 4. – P. 1897–1907.

[55] Montgomery M. M. Numerical Simulations of Naturally Tilted, Retrogradely Precessing, Nodal Superhumping Accretion Disks // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2012. – V. 745. – I. 2. – ID L25. – P. 1–5.

[56] Montgomery M. M. Tilt, Warp, and Simultaneous Precessions in Disks // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2012. – V. 753. – I. 2. – ID L27. – P. 1–5.

[57] Murray J., Warner B., Wickramasinghe D. Superhumps in systems with intermediate mass ratios // *New Astronomy Reviews*. – 2000. – V. 44. – I. 1-2. – P. 51–56.

[58] Murray J. R., Chakrabarty D., Wynn G. A. et al. Magnetically warped discs in close binaries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2002. – V.

335. – I. 2. – P. 247–255.

[59] Nogami D., Kato T., Baba H., Masuda S. Discovery of the First in-the-Gap SU UMa-Type Dwarf Nova, NY Serpentis (=PG 1510+234) // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 1998. – V. 50. – P. L1–L4.

[60] Nogami D., Uemura M., Ishioka R. et al. In-the-gap SU UMa-type dwarf nova, Var73 Dra with a supercycle of about 60 days // Astronomy and Astrophysics. – 2003. – V. 404. – P. 1067–1075.

[61] O'Donoghue D. Observational evidence for tidal effects in cataclysmic variable accretion discs // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1990. – V. 246. – P. 29–41.

[62] Ohshima T., Kato T., Pavlenko E. P. et al. Discovery of Negative Superhumps during a Superoutburst of 2011 January in ER Ursae Majoris // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2012. – V. 64. – № 4. – L. 3. – P. 1–5.

[63] Ohshima T., Kato T., Pavlenko E. et al. Study of negative and positive superhumps in ER Ursae Majoris // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2014. – V. 66. – I. 4. – ID 67. – P. 1–22.

[64] Olech A., Schwarzenberg-Czerny A., Kedzierski P. et al. Curious Variables Experiment (CURVE). Superhump Period Change Pattern in KS UMa and Other Dwarf Novae // Acta Astronomica. – 2003. – V. 53. – P. 175–194.

[65] Osaki Y. An accretion model for the outbursts of U Geminorum stars // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 1974. – V. 26. – P. 429–436.

[66] Osaki Y. Irradiation-induced mass-overflow instability as a possible cause of superoutbursts in SU UMa stars // Astronomy and Astrophysics. – 1985. – V. 144. – P. 369–380.

[67] Osaki Y. A model for the superoutburst phenomenon of SU Ursae Majoris

stars // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 1989. – V. 41. – P. 1005–1033.

[68] Osaki Y. Dwarf-Nova outbursts // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1996. – V. 108. – P. 39–60.

[69] Osaki Y., Shimizu S., Tsugawa M. Repetitive Rebrightening in the Dwarf Nova EG CANCRI // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 1997. – V. 49. – P. L19–L23.

[70] Osaki Y., Meyer F., Meyer-Hofmeister E. Repetitive rebrightening of EG Cancr: Evidence for viscosity decay in the quiescent disk? // Astronomy and Astrophysics. – 2001. – V. 370. – P. 488–495.

[71] Osaki Y., Meyer F. Early humps in WZ Sge stars // Astronomy and Astrophysics. – 2002. – V. 383. – P. 574–579.

[72] Osaki Y., Meyer F. Is evidence for enhanced mass transfer during dwarf-nova outbursts well substantiated? // Astronomy and Astrophysics. – 2003. – V. 401. – P. 325–337.

[73] Osaki Y. The disk instability model for dwarf nova outbursts // Proceeding of the Japan Academy, Series B. – 2005. – V. 81. – P. 291–305.

[74] Osaki Y., Kato T. The Cause of the Superoutburst in SU UMa Stars is Finally Revealed by Kepler Light Curve of V1504 Cygni // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2013. – V. 65. – № 3. – ID 50. – P. 1–16.

[75] Osaki Y., Kato T. Study of Superoutbursts and Superhumps in SU UMa Stars by the Kepler Light Curves of V344 Lyrae and V1504 Cygni // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2013. – V. 65. – № 5. – ID 95. – P. 1–25.

[76] Otulakowska-Hypka M., Olech A., Patterson J. Statistical analysis of properties of dwarf novae outbursts // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2016. – V. 460. – I. 3. – P. 2526–2541.

[77] Paczynski B. A model of accretion disks in close binaries // *Astrophysical Journal*. – 1977. – V. 216. – P. 822–826.

[78] Pala A. F., Gansicke B. T., Townsley D. et al. Effective temperatures of cataclysmic-variable white dwarfs as a probe of their evolution // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2017. – V. 466. – I. 3. – P. 2855–2878.

[79] Papaloizou J. C. B., Bath G. T. Stellar stability in close binary systems // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1975. – V. 172. – P. 339–357.

[80] Patterson J. Rapid oscillations in cataclysmic variables. VI. Periodicities in erupting dwarf novae // *Astrophysical Journal*. – 1981. – V. 45. – P. 517–539.

[81] Patterson J., McGraw J. T., Coleman L. et al. A photometric study of the dwarf nova WZ SGE in outburst // *Astrophysical Journal*. – 1981. – V. 248. – P. 1067–1075.

[82] Patterson J., Kemp J., Saad J. et al. Superhumps in Cataclysmic Binaries. XI. V603 Aquilae Revisited // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 1997. – V. 109. – P. 468–476.

[83] Patterson J., Masi G., Richmond M. W. et al. The 2001 Superoutburst of WZ Sagittae // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 2002. – V. 114. – I. 797. – P. 721–747.

[84] Patterson J., Thorstensen J. R., Kemp J. et al. Superhumps in Cataclysmic Binaries. XXIV. Twenty More Dwarf Novae // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 2003. – V. 115. – I. 813. – P. 1308–1329.

[85] Patterson J., Thorstensen J. R., Kemp J. Pulsations, Boundary Layers, and Period Bounce in the Cataclysmic Variable RE J1255+266 // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 2005. – V. 117. – I. 831. – P. 427–444.

[86] Patterson J., Kemp J., Harvey D. et al. Superhumps in Cataclysmic Binaries.

XXV.  $q_{\text{crit}}$ ,  $\varepsilon(q)$ , and mass-radius // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 2005. – V. 117. – I. 837. – P. 1204–1222.

[87] Pavlenko E., Shugarov S. Yu., Katysheva N. A. et al. Discovery of the New WZ Sge Star SDSS J080434.20+510349.2 // 15th European Workshop on White Dwarfs ASP Conference Series. – 2007. – V. 372. – P. 511–514.

[88] Pavlenko E. P., Voloshina I. B., Andreev M. V. et al. The dwarf nova MN Dra: Periodic processes at various phases of the supercycle // Astronomy Reports. – 2010. – V. 54. – I. 1. – P. 6–16.

[89] Pavlenko E., Kato T., Andreev M. et al. MN Dra—In-the-Gap Dwarf Nova With Negative Superhumps // 17th European White Dwarf Workshop. AIP Conference Proceedings. – 2010. – V. 1273. – I. 1. – P. 320–323.

[90] Pavlenko E. P., Samsonov D. A., Antonyuk O. I. et al. Photometry of the dwarf nova V503 Cyg in 2010. Orbital and other periods // Astrophysics. – 2012. – V. 55. – I. 4. – P. 494–504.

[91] Pavlenko E. P., Kato T., Antonyuk O. I. et al. NY Serpentis: SU UMa-type nova in the period gap with diversity of normal outbursts // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2014. – V. 66. – I. 6. – ID 111. – P. 1–11.

[92] Pavlenko E. P., Kato T., Sosnovskij A. A. et al. Dwarf nova EZ Lyncis second visit to instability strip // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2014. – V. 66. – I. 6. – ID 113. – P. 1–11.

[93] Pfeiffer H. P., Lai D. Warping and Precession of Accretion Disks around Magnetic Stars: Nonlinear Evolution // The Astrophysical Journal. – 2004. – V. 604. – I. 2. – P. 766–774.

[94] Politano M. The formation of CVs with brown dwarf secondaries // The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects, ASP Conference Proceedings. – 2002. – V. 261. – P. 293–296.

- [95] Pringle J. E., Bateson F. M., Hassall B. J. M. et al. Multiwavelength monitoring of the dwarf nova VW Hydri. I. Overview // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1987. – V. 225. – P. 73–92.
- [96] Pringle J. E. Self-induced warping of accretion discs // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1996. – V. 281. – I. 1. – P. 357–361.
- [97] Ritter H., Kolb U. Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (Seventh edition) // *Astronomy and Astrophysics*. – 2003. – V. 404. – P. 301–303.
- [98] Samsonov D. A., Pavlenko E. P., Andreev M. V. et al. Positive and Negative Superhumps of the Dwarf Nova MN Dra // *Odessa Astronomical Publications*. – 2010. – V. 23. – P. 98–100.
- [99] Schreiber M.R., Hameury J.-M., Lasota J.-P. Delays in dwarf novae II: VW Hyi, the tidal instability and enhanced mass transfer models // *Astronomy and Astrophysics*. – 2004. – V. 427. – P. 621–635.
- [100] Smak J. Accretion in cataclysmic binaries. IV - Accretion disks in dwarf novae // *Acta Astronomica*. – 1984. – V. 34. – P. 161–189.
- [101] Smak J. On the models for superoutbursts in dwarf novae of the SU UMa type // *Acta Astronomica*. – 1991. – V. 41. – P. 269–277.
- [102] Smak J. New Interpretation of Superhumps // *Acta Astronomica*. – 2009. – V. 59. – № 1. – P. 121–130.
- [103] Smak J. On the Origin of Tilted Disks and Negative Superhumps // *Acta Astronomica*. – 2009. – V. 59. – № 4. – P. 419–430.
- [104] Soejima Y., Imada A., Nogami D. et al. Photometric Studies of a WZ Sge-Type Dwarf Nova Candidate, ASAS 160048-4846.2 // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2009. – V. 61. – № 2. – P. 395–401.
- [105] Stanek K. ASASN-14cv: bright ( $V=13.90$ ) CV candidate caught early

[Electronic resource] // vsnet-alert. – 2014. – № 17395. – Режим доступа: <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/17395>, свободный. – Загл. с экрана.

[106] Stellingwerf R. F. Period determination using phase dispersion minimization // *The Astrophysical Journal*. – 1978. – V. 224. – P. 953–960.

[107] Still M., Howell S. B., Wood M.A. et al. Quiescent Superhumps Detected in the Dwarf Nova V344 Lyrae by Kepler // *The Astrophysical Journal*. – 2010. – V. 717. – I. 2. – P. L113–L117.

[108] Uemura M., Arai A., Sasada M. et al. Outburst of a WZ Sge-type Dwarf Nova, AL Com in 2007 // *Information Bulletin on Variable Stars*. – 2008. – № 5815. – # 1. – P. 1–4.

[109] Uemura M., Arai A., Krajci T. et al. Discovery of a WZ Sge-Type Dwarf Nova, SDSS J102146.44+234926.3: Unprecedented Infrared Activity during a Rebrightening Phase // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. – 2008. – V. 60. – № 2. – P. 227–236.

[110] van Paradijs J. Superoutbursts – A general phenomenon in dwarf novae // *Astronomy and Astrophysics*. – 1983. – V. 125. – P. L16–L18.

[111] Verbunt F., Hassall B. J. M., Pringle J. E. et al. Multiwavelength monitoring of the dwarf nova VW Hydri. III. IUE observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1987. – V. 225. – P. 113–130.

[112] Vogt N. Photometric study of the dwarf nova VW Hydri // *Astronomy and Astrophysics*. – 1974. – V. 36. – P. 369–378.

[113] Vogt N. VW Hydri revisited - Conclusions on dwarf nova outburst models // *Astronomy and Astrophysics*. – 1983. – V. 118. – P. 95–101.

[114] Walker W. S. G., Marino B. F. VW Hydri: photoelectric observations of the normal outburst // *Publ. Variable Star Sect., R. Astron. Soc. N.Z.* – 1978. – № 6.

– P. 73–83.

[115] Warner B. Observations of rapid blue variables - XV. VW Hydri // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1975. – V. 170. – P. 219–228.

[116] Warner B. Systematics of Surperoutbursts in Dwarf Novae // Astrophysics and Space Science. – 1995. – V. 226. – I. 2. – P. 187–211.

[117] Wijers R. A. M. J., Pringle J. E. Warped accretion discs and the long periods in X-ray binaries // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1999. – V. 308. – I. 1. – P. 207–220.

[118] Wood P. R. Mass transfer instabilities in binary systems // Astrophysical Journal. – 1977. – Part 1. – V. 217. – P. 530–536.

[119] Wood M. A., Burke C. J. The Physical Origin of Negative Superhumps in Cataclysmic Variables // The Astrophysical Journal. – 2007. – V. 661. – I. 2. – P. 1042–1047.

[120] Zemko P., Kato T., Shugarov S. Yu. Detection of Change in Supercycles in ER Ursae Majoris // Publications of the Astronomical Society of Japan. – 2013. – V. 65. – № 3. – ID 54. – P. 1-8.

[121] Zemko P., Shugarov S., Kato T. et al. Study of a long and short—term variability of ER Ursae Majoris // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. – 2014. – V. 43. – № 3. – P. 319–324.

## Приложение

В Приложении диссертационного исследования представлены журналы наблюдений для звезд ASASSN-14cv, NY Ser и MN Dra. В таблицах приведены название телескопа, начало и конец наблюдений, фотометрическая система (w, сокр. от white, означает, что наблюдения проводились в интегральном свете). Качество изображений, определявшееся по полуширине изображения звезды (FWHM) и делилось на две группы. До 3.5 угловых секунд — «хорошее», от 3.5 до 5 — «удовлетворительное». Наблюдения звезды MN Dra проводились в 2012 – 2017 гг. без использования светофильтров, поэтому графа «фильтр» в соответствующей таблице отсутствует.

**Журнал наблюдений ASASSN-14cv в 2014 г.**

Телескоп	Начало наблюдений JD+2400000	Окончание наблюдений JD+2400000	Fil ter	Качество наблюдений	Телескоп	Начало наблюдений JD+2400000	Окончание наблюдений JD+2400000	Fil ter	Качество наблюдений
K-380	56856.292057	56856.535519	W	хор	K-380	56881.279739	56881.534022	W	хор
K-380	56857.346388	56857.519532	W	хор	K-380	56882.274111	56882.54353	W	хор
K-380	56858.308713	56858.389866	W	хор	K-380	56883.272542	56883.536551	W	хор
K-380	56859.484662	56859.533352	W	хор	K-380	56884.274285	56884.535621	W	хор
K-380	56860.325775	56860.531386	W	хор	K-380	56885.275569	56885.519026	W	хор
K-380	56861.307526	56861.372455	W	хор	K-380	56886.275157	56886.516936	W	хор
ЗТШ	56862.28468	56862.39711	V	хор	K-380	56887.267243	56887.328919	W	хор
РТТ-150	56864.328819	56864.426505	W	хор	АЗТ-11	56889.270008	56889.457596	W	хор
K-380	56864.342592	56864.39233	W	хор	АЗТ-11	56890.264523	56890.442765	W	удов
K-380	56865.285873	56865.393541	W	хор	АЗТ-11	56891.258974	56891.407942	W	удов

### Журнал наблюдений ASASSN-14cv в 2014 г. (продолжение)

K-380	56866.282591	56866.541206	W	хор	ЗТШ	56891.26911	56891.43449	V	хор
K-380	56867.284467	56867.538706	W	хор	K-380	56892.264593	56892.460164	W	хор
K-380	56868.294647	56868.397423	W	хор	K-380	56893.266073	56893.508385	W	хор
K-380	56869.295395	56869.386286	W	хор	K-380	56894.261207	56894.456155	W	хор
K-380	56870.293331	56870.541143	W	хор	A3T-11	56896.30933	56896.394692	W	хор
K-380	56871.276383	56871.334742	W	хор	A3T-11	56903.247054	56903.32339	W	удов
PTT-150	56872.279711	56872.397303	W	хор	A3T-11	56904.234453	56904.242979	W	удов
K-380	56872.289145	56872.472978	W	хор	A3T-11	56905.337528	56905.341789	W	удов
K-380	56874.295059	56874.542813	W	хор	A3T-11	56906.235542	56906.244067	W	хор
K-380	56875.286528	56875.553917	W	хор	A3T-11	56907.250334	56907.254597	W	хор
K-380	56876.293501	56876.559676	W	хор	A3T-11	56908.223431	56908.23637	W	хор
K-380	56877.299777	56877.53772	W	хор	A3T-11	56913.21629	56913.220551	W	удов
K-380	56879.260719	56879.438078	W	хор	A3T-11	56918.235766	56918.240027	W	удов
K-380	56880.284664	56880.538938	W	хор	A3T-11	56919.313505	56919.317766	W	удов

### Журнал наблюдений NY Ser в 2014 г.

Телескоп	Начало - конец наблюдений		Фот. Сист	Телескоп	Начало - конец наблюдений		Фот. Сист	Телескоп	Начало - конец наблюдений		Фот. Сист
	JD-2456000				JD-2456000				JD-2456000		
A3T-11	693.4701	693.6217	W	A3T-11	805.4040	805.4156	W	K-380	857.3136	857.3136	W
A3T-11	694.5301	694.6345	W	A3T-11	806.4103	806.4765	W	K-380	858.2868	858.2922	W
A3T-11	695.4433	695.6287	W	K-380	807.2946	807.3744	W	PTT-150	859.3029	859.3921	W
A3T-11	696.4577	696.6411	W	K-380	808.2685	808.3287	W	PTT-150	860.2523	860.2613	W
A3T-11	699.4043	699.4299	W	K-380	809.2693	809.2764	W	K-380	860.2732	860.2997	W
A3T-11	701.4047	701.5714	W	K-380	816.3222	816.3927	W	PTT-150	861.2650	861.2901	W

Журнал наблюдений NY Ser в 2014 г. (продолжение)

A3T-11	710.4343	710.5814	W	K-380	817.3330	817.4369	W	K-380	861.2704	861.2975	W
A3T-11	720.4248	720.5068	W	ARCSAT	818.6495	818.9114	Rj	A3T-11	861.2897	861.4324	W
A3T-11	722.3437	722.6116	W	ARCSAT	819.6581	819.9043	Rj	A3T-11	862.3299	862.3939	W
A3T-11	732.4428	732.4568	W	K-380	820.3096	820.3292	W	K-380	864.2791	864.2899	W
K-380	747.3599	747.3694	W	ARCSAT	820.6748	820.8682	Rj	K-380	865.2651	865.2759	W
K-380	748.3759	748.4633	W	ARCSAT	821.8625	821.9128	Rj	K-380	866.2652	866.2760	W
K-380	751.3550	751.5903	W	K-380	822.2844	822.3226	W	K-380	867.2651	867.2759	W
K-380	755.3936	755.4699	W	K-380	823.3421	823.4292	W	A3T-11	867.3291	867.4156	W
K-380	756.3744	756.5866	W	ARCSAT	823.6501	823.9116	Rj	K-380	868.2726	868.2834	W
K-380	757.3534	757.5803	W	K-380	824.3241	824.3795	W	A3T-11	868.3830	868.4469	W
K-380	758.3219	758.3261	W	ARCSAT	824.6367	824.8892	Rj	K-380	869.2727	869.2889	W
K-380	762.3311	762.4881	W	K-380	825.2786	825.3909	W	A3T-11	869.3047	869.4375	W
K-380	763.3614	763.5795	W	K-380	826.3176	826.3176	W	K-380	870.2667	870.2829	W
K-380	764.3080	764.3335	W	K-380	833.2868	833.4565	W	A3T-11	870.2705	870.4382	W
K-380	765.2803	765.5566	W	K-380	834.3225	834.5198	W	K-380	871.2620	871.2674	W
K-380	770.3346	770.5002	W	K-380	837.2851	837.5227	W	K-380	872.2646	872.2808	W
K-380	773.2585	773.3353	W	K-380	838.3088	838.4511	W	A3T-11	874.2700	874.4221	W
K-380	774.2708	774.4744	W	K-380	839.2879	839.5211	W	K-380	874.2723	874.2885	W
K-380	775.2554	775.3509	W	K-380	841.2897	841.5160	W	K-380	875.2587	875.2749	W
K-380	780.2959	780.3659	W	K-380	842.2973	842.4219	W	A3T-11	875.3445	875.4276	W
K-380	781.3060	781.5266	W	K-380	843.3080	843.3903	W	A3T-11	876.2527	876.4210	W
K-380	782.2759	782.3183	W	K-380	844.3184	844.4774	W	K-380	876.2666	876.2828	W
K-380	786.2594	786.3231	W	K-380	845.3107	845.4730	W	K-380	877.2772	877.2934	W
K-380	788.2570	788.3588	W	K-380	846.3424	846.4820	W	K-380	879.2685	879.2847	W
K-380	790.2816	790.5426	W	K-380	847.2844	847.4971	W	K-380	880.2542	880.2704	W

### Журнал наблюдений NY Ser в 2014 г. (продолжение)

ARCSAT	793.6348	793.9705	Rj	K-380	848.2817	848.4960	W	K-380	881.2541	881.2704	W
K-380	794.2934	794.3253	W	K-380	849.2943	849.4793	W	K-380	882.2514	882.2677	W
ARCSAT	794.6382	794.9559	Rj	K-380	850.2931	850.3863	W	K-380	883.2478	883.2684	W
K-380	795.2701	795.3656	W	K-380	851.2823	851.4413	W	K-380	884.2511	884.3948	W
ARCSAT	795.6414	795.9645	Rj	K-380	852.2856	852.3775	W	K-380	885.2515	885.2677	W
ARCSAT	796.8425	796.9436	Rj	K-380	853.2812	853.4272	W	K-380	886.2495	886.2657	W
ARCSAT	797.6350	797.9520	Rj	K-380	854.2868	854.4750	W	K-380	887.2433	887.2596	W
ARCSAT	798.6499	798.9035	Rj	A3T-11	854.2892	854.4708	W	K-380	889.2389	889.2562	W
K-380	799.2780	799.5363	W	K-380	855.2864	855.4386	W	K-380	892.2389	892.2551	W
ARCSAT	799.6433	799.9617	Rj	K-380	856.2759	856.2813	W	K-380	893.2367	893.2529	W
ARCSAT	802.8524	802.9606	Rj	A3T-11	856.2873	856.3150	W	K-380	894.2355	894.2529	W

### Журнал наблюдений NY Ser в 2016 г.

Телескоп	Начало – конец		Фот. Сист	Телескоп	Начало – конец		Фот. Сист	Телескоп	Начало – конец		Фот. Сист
	наблюдений				наблюдений				наблюдений		
	JD-2457000				JD-2457000				JD-2457000		
K-380	574.3318	574.3449	W	K-380	585.2935	585.4700	W	K-380	596.2885	596.4497	W
K-380	576.3245	576.5031	W	K-380	586.2970	586.4604	W	K-380	607.3359	607.4142	W
K-380	578.2897	578.4923	W	K-380	587.2855	587.4686	W	K-380	609.2643	609.3994	W
K-380	579.2785	579.3199	W	K-380	591.2699	591.4529	W	K-380	610.2491	610.3761	W
K-380	581.2742	581.4899	W	K-380	592.2810	592.4510	W	K-380	612.2589	612.3942	W
K-380	582.2974	582.4869	W	K-380	593.2799	593.4171	W	K-380	613.2851	613.3896	W
K-380	583.2821	583.4847	W	K-380	594.2656	594.4486	W				
K-380	584.2871	584.3721	W	K-380	595.2678	595.4508	W				

## Журнал наблюдений MN Dra в 2012 и 2017 гг.

Телескоп	Начало - конец наблюдений JD-2456000		Телескоп	Начало - конец наблюдений JD-2456000		Телескоп	Начало - конец наблюдений JD-2456000	
2012 год								
ARCSAT	082.7316	082.8401	ARCSAT	109.7768	109.9504	A3T-11	178.2494	178.3979
ARCSAT	085.7210	085.8464	ARCSAT	110.7863	110.9442	A3T-11	182.2387	182.3690
ARCSAT	086.7039	086.8267	ARCSAT	111.7785	111.8303	A3T-11	183.2742	183.4234
A3T-11	087.3102	087.3940	A3T-11	119.4392	119.5305	A3T-11	185.2174	185.3243
ARCSAT	087.7101	087.8408	A3T-11	121.3490	121.4453	A3T-11	187.2219	187.3224
A3T-11	088.2977	088.3019	A3T-11	130.3571	130.5509	Astrotel	203.2172	203.5897
ARCSAT	088.7007	088.8477	A3T-11	131.3008	131.4682	Astrotel	207.3530	207.5909
A3T-11	089.2874	089.3920	Astrotel	133.2431	133.3064	Astrotel	208.3475	208.4648
ARCSAT	089.7107	089.8362	Astrotel	134.2402	134.5267	Astrotel	211.2989	211.4871
ARCSAT	090.6996	090.8251	Astrotel	135.2546	135.5381	Astrotel	214.2129	214.5197
A3T-11	091.3086	091.4468	Astrotel	136.2462	136.3042	ARCSAT	226.5878	226.8011
ARCSAT	091.8160	091.9415	Astrotel	138.2446	138.3107	ARCSAT	227.5816	227.7960
A3T-11	092.3840	092.5158	Astrotel	140.3192	140.5225	ARCSAT	228.5504	228.7897
ARCSAT	092.8231	092.9437	Astrotel	142.2417	142.5435	ARCSAT	230.6901	230.8065
ARCSAT	093.8176	093.9442	Astrotel	143.3146	143.5178	ARCSAT	231.6157	231.7939
A3T-11	094.3191	094.3966	Astrotel	148.2870	148.4000	ARCSAT	232.5906	232.7725
A3T-11	095.2971	095.3955	Astrotel	152.2330	152.2852	ARCSAT	233.5975	233.7693
A3T-11	098.3308	098.4626	Astrotel	157.2709	157.5404	ARCSAT	235.5581	235.7875
A3T-11	099.2821	099.4140	Astrotel	160.3418	160.5559	ARCSAT	236.5718	236.7689
ARCSAT	099.7865	099.9457	Astrotel	162.4191	162.5030	ARCSAT	237.6026	237.7632
A3T-11	101.2994	101.3999	Astrotel	163.3481	163.5552	ARCSAT	238.6125	238.7910

Журнал наблюдений MN Dra в 2012 и 2017 гг. (продолжение)

ARCSAT	101.8009	101.9479	Astrotel	164.3272	164.3730	ARCSAT	240.6761	240.7696
A3T-11	102.3026	102.3989	Astrotel	165.3199	165.3783	ARCSAT	241.6335	241.6479
A3T-11	103.3278	103.3990	Astrotel	166.3182	166.5588	ARCSAT	243.5402	243.7413
ARCSAT	103.8369	103.9427	Astrotel	167.2770	167.5416	ARCSAT	245.5879	245.7663
ARCSAT	105.7937	105.9410	A3T-11	172.2505	172.3853	ARCSAT	251.5368	251.7127
ARCSAT	106.8030	106.9421	A3T-11	174.3262	174.4515			
ARCSAT	107.8002	107.9490	A3T-11	177.2540	177.3501			
2017 год								
Телескоп	Начало - конец наблюдений JD-2457000		Телескоп	Начало - конец наблюдений JD-2457000		Телескоп	Начало - конец наблюдений JD-2457000	
A3T-11	872.3866	872.5187	A3T-11	917.3226	917.5159	KFU	937.3274	937.5038
A3T-11	873.3987	873.5308	A3T-11	918.3310	918.3918	18см SL	937.4928	937.5441
A3T-11	874.3920	874.5283	A3T-11	920.2974	920.4001	KFU	938.3639	938.5113
A3T-11	875.4606	875.5437	A3T-11	921.3837	921.5033	18см SL	938.4675	938.4675
A3T-11	876.4163	876.5442	Zeiss 60	923.4867	923.5589	Zeiss 60	940.2881	940.2966
A3T-11	890.2972	890.5071	18см SL	924.3025	924.4847	A3T-11	945.3496	945.3581
ЗТШ	891.2792	891.5451	A3T-11	925.3143	925.5136	A3T-11	946.3060	946.3124
ЗТШ	892.2714	892.5391	K-380	926.3344	926.5006	A3T-11	948.2775	948.2860
A3T-11	893.3906	893.5314	18см SL	926.4129	926.5532	Zeiss 60	969.5778	969.5787
A3T-11	897.3600	897.3702	Zeiss 60	927.4650	927.4849	Zeiss 60	982.5705	982.5956
A3T-11	898.2945	898.5338	K-380	928.3890	928.3890	Zeiss 60	983.5471	983.5879
A3T-11	899.3637	899.4376	Zeiss 60	928.4927	928.5466	Zeiss 60	984.5018	984.5833
A3T-11	900.3718	900.5125	Zeiss 60	929.4570	929.5459	Zeiss 60	1022.5852	1022.5870
A3T-11	901.3487	901.5141	K-380	930.4051	930.5297	A3T-5	1070.3568	1070.4636

Журнал наблюдений MN Dra в 2012 и 2017 гг. (продолжение)

АЗТ-11	902.3702	902.5075	К-380	931.3287	931.3820	АЗТ-5	1071.3661	1071.3661
АЗТ-11	903.2869	903.4734	АЗТ-11	933.3498	933.3964	АЗТ-5	1072.1438	1072.1835
АЗТ-11	904.3219	904.4486	18см SL	933.5089	933.5544	АЗТ-5	1075.2020	1075.2429
АЗТ-11	905.3391	905.5325	АЗТ-11	934.2986	934.3177	Цейсс 60	1080.3402	1080.4903
АЗТ-11	906.2832	906.5342	Zeiss 60	934.4922	934.5597	Цейсс 60	1081.1864	1081.2381
АЗТ-11	908.4299	908.5108	АЗТ-11	935.3111	935.5047	Цейсс 60	1082.1528	1082.4748
АЗТ-11	912.3773	912.4864	АЗТ-11	936.3388	936.3769	Цейсс 60	1083.2772	1083.4195
АЗТ-8	915.3621	915.4892	18см SL	936.4961	936.5517	ЗТЕ	1085.1400	1085.2306
АЗТ-11	916.3022	916.3972	АЗТ-11	937.3211	937.3719	АЗТ-8	1101.3035	1101.3985