

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 524.7-77

ГАБДЕЕВ МАКСИМ МАРАТОВИЧ

**ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ
ПЕРЕМЕННЫХ**

Специальность 01.03.02 —
астрофизика и звездная астрономия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Борисов Николай Владимирович

Нижний Архыз – 2016

Содержание

Введение	4
1 Магнитные катаклизмические переменные. Поляры	15
1.1 Основные наблюдательные особенности	16
1.1.1 Видимый и инфракрасный диапазон	16
1.1.2 Рентгеновский диапазон	21
1.2 Модель аккреции вещества	22
1.3 Поиск кандидатов в магнитные катаклизмические переменные	24
2 Поляриметрические исследования полярных	26
2.1 Наблюдения и обработка	26
2.2 Анализ наблюдательных данных	30
2.2.1 MT Dra	30
2.2.2 1RXS J184542.4+483134	30
2.2.3 USNO-A2.0 0825-8396733	33
2.2.4 CRTS CSS081231 J071126+440405	34
2.2.5 IPHAS J052832.69+283837.6	34
2.2.6 CRTS CSS130604 J215427+155714	38
3 Фотометрические исследования полярных	41
3.1 Наблюдения и обработка	41
3.2 Исследованные объекты	44
3.2.1 USNO-A2.0 0825-8396733	44
3.2.2 IPHAS J052832.69+283837.6	46
3.2.3 1RXS J073346.0+261933	47
3.2.4 CSS 130604 215427+155714	50
4 Спектральные исследования полярных	53
4.1 Наблюдения и обработка	53

4.2	USNO-A2.0 0825-8396733	54
4.2.1	Результаты спектроскопических наблюдений	54
4.2.2	Определение параметров системы	59
4.2.3	Доплеровские карты	60
4.3	BS Tri	61
4.3.1	Результаты спектроскопических наблюдений	63
4.3.2	Оценка параметров системы	72
4.3.3	Доплеровские карты	74
4.4	CSRT CSS081231 J071126+440405	77
4.4.1	Результаты спектроскопических наблюдений	77
4.4.2	Определение параметров системы	82
4.4.3	Доплеровские карты	87
4.4.4	Моделирование циклотронного излучения	91
Заключение		96
Список литературы		98

Введение

Поляры относятся к группе интереснейших астрофизических объектов магнитным катаклизмическим переменным. Это тесные взаимодействующие двойные системы на поздней стадии эволюции с сильно замагниченным белым карликом ($B > 10^6$ Гс) и красным карликом класса М-К, заполняющим свою полость Роша. В таких системах присутствует как гравитационное, так и лучевое взаимодействие. Вещество красного карлика покидает поверхность, через особую точку L1. Магнитосфера белого карлика, сравнимая с размерами системы, захватывает его и аккрецирует на ограниченную область на один или оба магнитных полюса белого карлика. В месте столкновения вещества с белым карликом формируется горячее пятно, а вблизи его поверхности – аккреционная колонна. Излучение полярных – сильно переменное и регистрируется в широком диапазоне электромагнитного спектра: от рентгеновского (0.05-30 кэВ) до радио (~ 0.1 метра). Шкала переменности блеска полярных начинается с секунд и заканчивается годами. Высокочастотная квазипериодичность является следствием небольших изменений плотности аккреционного потока [1]. Аккреционная колонна имеет небольшие размеры и изменение её положения и ориентации с орбитальным периодом приводит к высокой амплитуде переменности блеска. Орбитальные периоды катаклизмических переменных лежат в диапазоне от 70-80 минут до 8 часов. Практически не встречаются системы в промежутке периодов от 2 до 3 часов, формируются условия в которых останавливается аккреция вещества [2]. Долговременная переменность блеска полярных (высокие и низкие состояния) с амплитудой в видимом диапазоне до 3^m , происходит на временной шкале месяцы, годы [3]. Предполагается, что при переходе в низкое состояние блеска темп аккреции значительно уменьшается из-за временной остановки переполнения полости Роша [4]. При этом кривые блеска могут меняться как по амплитуде, так и по форме (см., например, [5]).

Основной особенностью полярных звезд является наличие в оптическом диапазоне сильной переменной линейной и круговой поляризации излучения. Излучение поляризовано в следствие работы циклотронного механизма, охлаждающего плазму вблизи области выпадения вещества на поверхность белого карлика. При определенных условиях в видимом спектре объекта регистрируются циклотронные гармоники. Оптический спектр полярных звезд содержит интенсивные линии водорода серии Бальмера, нейтрального и ионизованного гелия. Линия $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$ сравнима по интенсивности с линией водорода H_{β} [6, 7]. Профили эмиссионных линий сильно переменны и отражают многокомпонентную структуру области их формирования. На данный момент известно порядка 136 систем, представленных в каталоге Риттера и Колба [8] с приведением известных параметров. Отметим, что несмотря на общую совокупность критериев классификации полярных звезд, которые перечислены выше, каждый представитель этой группы индивидуален в своих наблюдательных проявлениях [9].

Актуальность задачи

Как отмечено выше, белый карлик в полярных звездах сильно замагничен. Величина магнитного поля достигает значений порядка $10^7 - 10^8$ Гс и определяет весь спектр их наблюдательных проявлений. Это даёт возможность исследовать излучение плазмы в сильных магнитных полях, в условиях, которые невозможно воспроизвести в земных лабораториях. Важным аспектом таких исследований является нахождение фундаментальных параметров компонентов системы и аккреционной структуры. Вторичный компонент системы представляет большой интерес для проверки наших представлений о внутреннем строении и эволюции звезд Главной Последовательности, в случае когда масса звезды не сохраняется, а её радиус ограничен критической полостью Роша.

Цели и задачи исследования

Исследуется выборка новых полярных звезд с целью определения их фундаментальных параметров, таких как орбитальный период, угол наклона орбиты к лучу зрения, массы белого и красного карликов, большая полуось орбиты, напряженность магнитного поля. А также исследовать аккреционную структуру на основе

изучения областей формирования эмиссионных линий. Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

- Провести новые фотометрические, спектральные и поляриметрические наблюдения кандидатов в поляры на телескопах БТА и Цейсс-1000 САО РАН и обработать их результаты. Провести классификацию объектов по полученным наблюдениям.
- Используя методы анализа спектральных и фотометрических данных определить фундаментальные параметры исследуемых систем. Применить программу Спруита [10] для наблюдательных данных с телескопа БТА САО РАН и построить доплеровские карты областей излучения эмиссионных линий для исследуемых объектов.
- Выделить вклад циклотронного излучения у объекта CRTS CSS081231 J071126+440405 для дальнейшего моделирования и определения напряженности магнитного поля белого карлика.
- Исследовать возможность моделирования эффектов переизлучения по двухпиковым эмиссионным линиям в объектах CRTS CSS081231 J071126+440405 и BS Tri.

Научная и методическая новизна

- Впервые, на основе поляриметрических наблюдений, на телескопе БТА было открыто два новых поляров. Для четырех объектов была проведена однозначная классификации.
- В работе проводился комплексный анализ оригинальных фотометрических, спектральных и поляриметрических наблюдений объектов.
- Определены физические параметры компонент в трех исследованных системах. Для двух систем применено теоретическое моделирование эффектов переизлучения на поверхности вторичной компоненты.
- Впервые в течении суток наблюдалось изменение наклона континуума и профилей эмиссионных линий объекта CRTS CSS081231 J071126+440405. Сделан вывод, что произошли локальные изменения структуры аккреции вещества.

Научная и практическая значимость

- По фотометрическим данным, полученными в период с 2010 по 2015 гг., были найдены или уточнены орбитальные периоды 4 систем. Фотометрические наблюдения затмения объекта CRTS CSS081231 J071126+440405 на телескопе БТА позволили определить длительность затмения и наложить ограничение на угол наклона системы.
- Определены физические параметры трех исследованных систем посредством анализа спектральных данных, в частности кривых лучевых скоростей. Для систем CRTS CSS081231 J071126+440405 и BS Tri был выделен вклад излучения эмиссионных линий, формирующийся на поверхности вторичной компоненты. Использованы теоретические модельные спектры переизлучения для определения поправки скорости орбитального движения вторичного компонента.
- Метод поляриметрических наблюдений, реализованный на телескопе БТА, показал свою эффективность в поиске круговой поляризации излучения у объектов до 20^m . Все исследуемые объекты были классифицированы как поляры по поляриметрическим данным впервые.
- Создана программа, строящая модельные спектры циклотронных гармоник. Путем сравнения модельных спектров с наблюдаемыми спектрами циклотронных гармоник найдены параметры аккреционной колонны объекта CRTS CSS081231 J071126+440405.
- Получены ряды спектральных данных 3 объектов, по которым были построены доплеровские карты. Основными областями формирования эмиссионных линий являются струя аккрецирующего вещества и область переизлучения на поверхности красного карлика. Показано, что дисковая аккреция в данных системах отсутствует.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Шесть катаклизмических переменных были классифицированы как поляры, по результатам поляриметрических наблюдений на телескопе БТА САО РАН. Показано, что излучение объектов исследования обладает сильной круговой поляризацией. У 4 объектов из выборки зарегистрирована сме-

на знака круговой поляризации, свидетельствующая об аккреции на оба магнитных полюса белого карлика.

2. Значения периодов орбитального движения 4 систем, определенные по фотометрическим данным с телескопа Цейсс-1000. Обнаружение долговременной переменности.
3. Фундаментальные параметры нескольких систем, а также их доплеровские карты, построенные по основным эмиссионным линиям.
4. Параметры аккреционной колонны объекта CRTS CSS081231 J071126+440405: $B=31-34$ МГц, $T_e = 10 - 12$ кэВ, $\Theta = 80 - 90^\circ$ и $\Lambda = 10^5$, найденные в результате сравнительного анализа циклотронных гармоник в спектрах с теоретическими моделями.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

1. Международная конференция “The Present and Future of Small and Medium Size Telescopes”, пос. Нижний Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 19-22 октября 2015 г.
2. Международная конференция “Astronomical polarimetry”, Grenoble, France, 26-30 мая 2014 г.
3. Международная конференция “Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes” Tatranská Lomnica, Slovakia, 23-26 сентября, 2013 г.
4. Всероссийская молодежная астрономическая конференция “Наблюдаемые проявления эволюции звезд”, пос. Нижний Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 15 - 19 октября 2012 г.
5. Международная конференция “Звёздные атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля”, пос. Научный, Крымская астрофизическая обсерватория, 10-14 июня 2012 г.
6. Международная молодежная конференция “19th Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics”, Киев, Киевский НГУ, 25-30 апреля 2012 г.
7. Ежегодная конкурс-конференции САО РАН посвященная дню науки, 2014-2015 гг.

8. Общий астрофизический семинар САО РАН
9. Астрофизический семинар института физики Казанского (Приволжского) федерального университета

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в шести рецензируемых журналах (рекомендованных ВАК и индексируемых WoS). Основные результаты изложены в следующих статьях:

1. Н. В. Борисов, М. М. Габдеев, В. В. Шиманский, Н. А. Катыхева, А. И. Колбин, С. Ю. Шугаров, В. П. Горанский “Фотополяриметрические и спектральные исследования затменного поляра CRTS CSS081231 J071126+440405”, Астрофизический бюллетень, том 71, №1, с. 108-121, 2016
2. Н. В. Борисов, М. М. Габдеев, В. Л. Афанасьев “Фотополяриметрические наблюдения выборки кандидатов в поляры”, Астрофизический бюллетень, том 71, №1, с. 101-107, 2016
3. М. М. Габдеев “Фотометрический мониторинг кандидатов в поляры”, Астрофизический бюллетень, том 70, №4, с. 487-492, 2015
4. Н. В. Борисов, М. М. Габдеев, В. В. Шиманский, Н. А. Катыхева, С. Ю. Шугаров “Спектральные исследования поляра BS Tri”, Astronomy Letters, том 41, №11, с. 701–714, 2015
5. В. Л. Афанасьев, Н. В. Борисов, М. М. Габдеев “Фотометрические и поляриметрические наблюдения нового поляра USNO-A2.0 0825-18396733”, Астрофизический бюллетень, том 70, №3, с. 347-351, 2015
6. М. М. Габдеев, Н. В. Борисов, В. В. Шиманский, О. И. Спиридонова. “Спектральные и фотометрические исследования поляра USNO-A2.0 0825-18396733”, Астрономический журнал, том 92, №3, с. 244-252, 2015

Личный вклад автора

Автор принимал участие в постановке целей и задач исследования и получении наблюдательных данных. Обработка наблюдательных данных полностью проводилась автором работы. Анализ и интерпретация результатов, подготовка текстов статей выполнялись наравне с соавторами.

Содержание и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (– наименования). Объем работы — 104 страницы печатного текста, включая 46 рисунков и 5 таблиц.

Во **Введении** дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность исследования, приводятся цели и задачи, научная новизна и научная и практическая ценность; приводятся результаты, выносимые на защиту, дается список конференций и работ, где были представлены результаты диссертации, описывается степень личного вклада автора, дано краткое содержание диссертационной работы.

В **Главе 1** приводится история открытия полярнов, описываются основные наблюдательные свойства полярнов во всем диапазоне длин волн (**Раздел 1.1**), более детально описано поведение в видимом диапазоне электромагнитного спектра. **Раздел 1.2** посвящен историческим и современным представлениям о модели аккреции вещества в полярных. Перечисляются основные каталоги и обзоры, которые существенно увеличивают количество открытий новых катаклизмических переменных звезд (**Раздел 1.3**). **Глава 2** посвящена описанию метода поляриметрических наблюдений на телескопе БТА САО РАН, их обработке и последующему анализу. В **Разделе 2.1** описывается методика получения поляриметрических данных, показаны примеры получаемых изображений, формулы расчета круговой поляризации и интенсивности объекта. В ней обсуждается метод контроля за точностью получаемых измерений, способ реализации и перспективы наблюдений слабых объектов с целью обнаружения круговой поляризации.

Раздел 2.2 главы посвящен 6 объектам исследования. Представлены первые поляриметрические наблюдения шести катаклизмических переменных: MT Dra, 1RXS J184542.4+483134, USNO-A2.0 0825-8396733, CRTS

CSS081231 J071126+440405, IPHAS J052832.69+283837.6 и CRTS CSS130604 215427+155714. Наблюдения в полосе V показали, что все объекты обладают значительной круговой поляризацией. У четырех объектов меняется знак поляризации в течение орбитального периода, что говорит об активности обоих магнитных полюсов белого карлика. Поляризация излучения CRTS CSS130604 215427+155714 не меняет знак в течении орбитального периода, оставаясь в отрицательных значениях. У USNO-A2.0 0825-8396733 тоже не зафиксирована смена знака, в связи с отсутствием данных на фазах, близких к 0. Выполнено сравнение USNO-A2.0 0825-8396733 с исследованными системами V834 Cen [11] и RX J1313.32-3259 ([12]), у которых схожие по форме кривые блеска и круговой поляризации. У обеих систем на фазах минимума блеска происходит ослабление круговой поляризации. Авторы предполагают, что происходит затмение области циклотронного излучения аккреционной структурой. При этом у RX J1313.32-3259 наблюдается изменение знака круговой поляризации в синем диапазоне и в белом свете (см. рис. 9 и 10 в [12]). Объект 1RXS J184542.4+483134 наблюдался в двух состояниях блеска в 2011 и в 2012 гг. Ослабление блеска системы сопровождалось увеличением вклада циклотронного излучения в общий блеск системы и, следовательно, амплитуды изменения круговой поляризации. В заключении главы делается вывод о магнитной природе исследованных систем и классификации их как полярнов.

В **Главе 3** представлены фотометрические исследования 4 полярнов по данным полученным на телескопе Цейсс-1000 САО РАН. **Раздел 3.1** содержит информацию о телескопе Цейсс-1000, штатном фотометре и проведенных наблюдениях. Показаны изображения площадок с отмеченными объектом исследования и опорной звездой. Дана таблица с информацией об опорных звездах для каждого объекта и журнал наблюдений с 2010 по 2015 гг. **Раздел 3.2** посвящен исследованным объектам: USNO-A2.0 0825-8396733, 1RXS J073346.0+261933, IPHAS J052832.69+283837.6 и CRTS CSS130604 215427+155714. Для каждого объекта проводился анализ временных рядов методом Лафлера-Кинмана [13] с целью определения орбитального периода системы и построения эфемериды объекта. Все системы обладают сильной орбитальной переменностью блеска с амплитудой выше 1^m . Многоцветная фотометрия полярна USNO-A2.0 0825-8396733, показала, что кривые блеска в шкале орбитального периода имеют устойчивую и одинаковую форму в полосах B, V, R_c . Система имеет избыток

в красном диапазоне $(V - R) = 1^m$. Он не может быть обусловлен межзвездным поглощением, так как расстояние до известных катаклизмических переменных невелико [14]. Данный избыток можно объяснить вкладом циклотронных гармоник в видимый диапазон излучения, наличие которых косвенно подтверждается сильной круговой поляризацией излучения. У 1RXS J073346.0+261933 и IPHAS J052832.69+283837.6 наблюдалась долговременная переменность блеска. Если первый объект не показал изменений форм и амплитуды кривых блеска с изменением среднего блеска системы, то у второго изменились не только формы кривых блеска, появился вторичный максимум и увеличилась амплитуда переменности, но и поменялся цвет системы. В 2015 г. с увеличением блеска объекта, показатель цвета $(B - R)$ уменьшался. Провалы, обнаруженные на кривых блеска 1RXS J073346.0+261933 и IPHAS J052832.69+283837.6, часто связаны с частичным самозатмением аккреционной структуры и повсеместно встречаются в кривых блеска полярных звезд. Изменение блеска CRTS CSS130604 215427+155714 с орбитальным периодом происходит квазисинусоидально и не имеет выраженных особенностей. За полгода фотометрических наблюдений объект не наблюдался в другом состоянии блеска.

В **Главе 4**, посвященной спектральным исследованиям, содержатся разделы о наблюдениях и обработке трех исследованных систем: USNO-A2.0 0825-8396733, BS Tri и CRTS CSS081231 J071126+440405. В **Разделе 4.1** описывается режим спектральных наблюдений с длинной щелью приборов SCORPIO [15] и SCORPIO-2 [16]. Результаты анализа спектральных данных полярной звезды USNO-A2.0 0825-8396733 представлены в **Разделе 4.2**. В спектрах объекта наблюдаются однопиковые эмиссионные линии водорода, гелия и высокоионизованных тяжелых элементов, характерные для излучения полярных звезд с рентгеновским облучением вторичного компонента. Профили эмиссионных линий состоят из нескольких компонент. Для построения кривой лучевых скоростей была выделена узкая компонента с высокой амплитудой смещения пика в шкале длин волн. На основе анализа лучевых скоростей и предшествовавших фотометрических данных были получены оценки массы белого карлика $M_1 \sim 0.75 M_\odot$, красного карлика $M_2 \sim 0.19 M_\odot$ и угла наклона системы $i \sim 80^\circ$. Построенные карты доплеровской томографии и кривые лучевых скоростей указывают на расположение основной области излучения линий H_β и $HIII$ $\lambda 4686\text{\AA}$ на поверхности вторичной компоненты. В **Разделе 4.3** пред-

ставлены спектральные наблюдения катаклизмической переменной BS Tri. Их исследование показало, что спектры имеют плоский континуум с наложенными на него сильными эмиссионными линиями водорода и нейтрального гелия, боуэновской бленды и сравнимой по интенсивности с водородными линией $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$. Профили линий имеют сложную структуру и испытывают переменность в шкале фаз орбитального периода системы. Анализ этой структуры выявил наличие в ней двух компонент, имеющих различные значения лучевых скоростей и связанных с облучаемой поверхностью вторичной компоненты и потоком вещества, перетекающего с нее на белый карлик. Сравнение блеска системы, интенсивностей эмиссионных линий и их лучевых скоростей в 2011 и 2012 гг., показало что при неизменном блеске системы формирование всех линий сместилось в области с меньшей скоростью. При этом изменился балмеровский декремент, со значительным ослаблением линии H_α , а линии $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$ усилились с одновременным ослаблением линий HeI . Таким образом баланс $HeI/HeII$ сместился в сторону более высокой стадии ионизации. Использование спектров достаточно высокого разрешения и значительное разделение компонент линии $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$ в интервале фаз $\varphi = 0.2 - 0.6$ позволило нам получить набор лучевых скоростей вторичной компоненты. На их основе с применением эволюционных треков звезд Главной Последовательности был найден набор динамических параметров BS Tri: $M_1 = 0.75 \pm 0.02 M_\odot$, $M_2 = 0.16 \pm 0.02 M_\odot$, $R_2 = 0.18 \pm 0.02 R_\odot$, $A = 0.74 \pm 0.05 R_\odot$. Доплеровские карты, построенные по линиям $H_\alpha, H_\beta, HeII\ \lambda 4686\text{\AA}, HeI\ \lambda 5876\text{\AA}$, не показывают наличия даже слабой дисковой аккреционной структуры, подтверждая принадлежность BS Tri к классу полярнов. Окончательное подтверждение такой классификации должно быть сделано на основе поляриметрических наблюдений объекта. Из результатов его доплеровского картирования следует, что основные области образования эмиссионных линий в его спектрах связаны с действием эффектов переизлучения на поверхности вторичной компоненты и излучения плазмы в оптически тонких частях струи аккрецируемого вещества. В обоих случаях степень поляризации излучения в линиях может быть достаточной большой, что делает перспективными спектрополяриметрические наблюдения объекта.

Итог работы по исследованию полярна CSS081231 представлен в **Разделе 4.4**. В спектрах объекта, типичных для катаклизмических переменных, присутствуют

эмиссионные линии H Π , HeI, HeII. Объект наблюдался в последовательные ночи 20 и 21 сентября 2001 г. Наблюдаемые изменения вида спектров и профилей эмиссионных линий говорят о том, что в эти ночи произошли изменения геометрии областей формирования эмиссионных линий и распределения энергии в оптическом спектре объекта. Анализ доплеровских карт показал, что во время наблюдений 20.09.11 эмиссионные линии формировались в основном на поверхности вторичного компонента, красного карлика, что подтверждается появлением на фазах $\varphi = 0.34 - 0.49$ красных пиков в профилях линий. Сутками позже (21.09.11), эта область перестала доминировать, появилась другая область, расположенная на доплеровских картах вблизи $V_x = -500$ км/сек. Вероятно, что возникновение этой дополнительной области разреженного газа ответственно за появление компонент поглощения в профилях эмиссионных линий H Π , HeI и HeII в фазах орбитального периода $\varphi = 0.84 - 0.95$ в ночь 21.09.11. В расчетах параметров системы использовались полуамплитуда лучевых скоростей, измеренная по линии H_α и её поправка на центр массы красного карлика, рассчитанная по модельным спектрам эффектов переизлучения, а также продолжительность затмения. В итоге получены следующие параметры: $M_1 = 0.86 \pm 0.08 M_\odot$, $M_2 = 0.18 \pm 0.02 M_\odot$, $q = 0.21 \pm 0.01$, $R_{L2} = 0.20 \pm 0.03 R_\odot$, $A = 0.8 \pm 0.03 R_\odot$. Сравнение теоретического спектра красного карлика со спектром, полученным в затмении, подтвердило надежность определения параметров и использованного метода. Сравнение наблюдаемых линий циклотронного излучения с теоретическими позволило оценить параметры аккрецирующей структуры вблизи поверхности белого карлика: $B = 31 - 34$ МГс, $T_e = 10 - 12$ кэВ, $\theta = 80^\circ - 90^\circ$ и $\Lambda = 10^5$, где B – напряженность магнитного поля, T_e – температура плазмы, θ – угол наклона магнитной оси к лучу зрения и Λ – безразмерный параметр, зависящий от геометрической толщины излучающей области.

В Заключение суммированы основные результаты работы.

В Списке литературы дан перечень публикаций, цитируемых и используемых в работе.

Глава 1

Магнитные катаклизмические переменные. Поляры

Катаклизмические переменные (КП) – это взаимодействующие тесные двойные системы (ТДС) с короткими орбитальными периодами, состоящие из белого карлика (первичный компонент) и красного карлика позднего спектрального класса К-М (вторичный компонент). В таких системах, как правило, вторичный компонент заполняет свою полость Роша и теряет массу, перенос которой, осуществляется через внутреннюю точку Лагранжа L1, формируя при этом аккреционную структуру вблизи поверхности белого карлика. Если белый карлик обладает сильным магнитным полем $B > 10^6$ Гс, этот тип объектов называется магнитными катаклизмическими переменными (МКП). Для дальнейшего разделения МКП на подтипы нужно ввести определение альвеновского радиуса. Альвеновский радиус r_a – это расстояние от белого карлика на котором давление магнитного поля сравнивается с давлением падающего вещества. На расстоянии $r < r_a$ аккрецирующее вещество контролируется уже не силами тяготения, а магнитным полем, двигаясь по магнитным силовым линиям. В случае, когда магнитное поле белого карлика недостаточно сильное $B = 10^6 - 10^7$ Гс, $r_a < a$, где a – большая полуось системы, вещество, покидающее красный карлик сначала движется по кеплеровской орбите, образуя промежуточный аккреционный диск и только потом захватывается магнитным полем. Такие системы называются промежуточными полярами. В случае, когда $B > 10^7$ Гс и $r_a > a$, вещество

покидая точку L1 захватывается магнитным полем и вещество движется по магнитным силовым линиям на один или оба магнитных полюса белого карлика. Струя аккрецирующего вещества выпадает на ограниченную поверхность белого карлика, формируя горячее пятно и аккреционную колонну. Такие системы называются полярами. Сам термин поляр был введен в 1977 г. чешским астрономом Кржеминским [17]. Отметим, что в данной работе исследуются только поляры, поэтому далее будет идти речь только об этом типе систем.

1.1 Основные наблюдательные особенности

МКП как тип были выделены после открытия у известного рентгеновского источника AM Her [18] поляризованного излучения. Тапия [19, 20] обнаружил линейную и круговую поляризацию в полосах V и I . Линейная поляризация в максимуме достигала 6.8%, круговая поляризация варьировалась от 4% до -9.5% . По результатам этих наблюдений автор сделал вывод, что белый карлик обладает сильным магнитным полем порядка 2×10^8 Гс. Последующие спектральные наблюдения AM Her в низком состоянии блеска показали, что напряженность магнитного поля белого карлика, определенная по положениям зеемановских компонент водородных линий оказалась 13×10^6 Гс [21–23], что на порядок меньше. С 1977 по 1979 были открыты ещё три поляра AN UMa [17], VV Pup [24], EF Eri [25]. К 1990 г. список известных полярных насчитывал уже 14 объектов. Их наблюдательные особенности и модели детально были описаны в обзорных работах Войханской [26] и Кроппера [27]. Наиболее полный на сегодняшний день каталог катаклизмических переменных, в том числе магнитных, Риттера и Колба [8] содержит сведения о 136 объектах, классифицированных изучавшими их исследователями как поляры. Однако далеко не во всех работах проводились поляриметрические наблюдения. Далее мы перечислим наблюдательные особенности полярных, которые выделяют их из остальной группы КП.

1.1.1 Видимый и инфракрасный диапазон

Основной поток излучения регистрируемый в видимом диапазоне связан с аккреционной колонной. Характеристики этого излучения напрямую зависят от внутреннего состояния аккрецирующей структуры. Наблюдения в оптическом

диапазоне наиболее эффективны за счёт большей чувствительности приёмной аппаратуры и спектрального разрешения. Эти наблюдения являются определяющими в понимании процессов аккреции. А детальные поляриметрические наблюдения, позволяю получить информацию об ориентации излучающей области и о её физических параметрах.

Полярам свойственна долговременная переменность блеска (высокие и низкие состояния на временной шкале месяцы, годы), амплитуда которой может достигать 3^m [3]. У новоподобных звёзд, к которым относятся и полярны, переход из низкого в высокое состояние блеска происходит спонтанно, и трудно предсказать, в каком состоянии будет находиться система в тот или иной промежуток времени. Вопрос о механизме перехода полярны в разные состояния блеска и сегодня остается открытым. Единственное, в чем сходятся все гипотезы – это изменение темпа аккреции вещества. При этом кривые блеска могут меняться как по амплитуде, так и по форме (см., например, [5]). Орбитальные периоды полярны лежат в диапазоне от 80 минут до 8 часов с обусловленным эволюцией дефицитом в промежутке периодов от 2 до 3 часов [2]. Полярны делятся на два вида: с аккрецией на один и на оба магнитных полюса белого карлика. В однополюсных системах один полюс всегда находится в поле зрения, а другой, на дальней полусфере белого карлика, и экранируется лимбом белого карлика. В двухполюсных системах один из полюсов испытывает эпизодические затмения лимбом белого карлика. Блеск системы ослабевает до тех пор, пока аккрецирующая область не появится на видимой полусфере.

На рис.1.1 показана кривая блеска и поляризации для двухполюсной системы ST LMi. Яркая и слабая фазы хорошо видны на кривой блеска. На протяжении всего периода линейная поляризация выше нуля. Максимум она достигает в фазе ослабления яркости, в этот момент угол между магнитной осью и лучем зрения максимально приближается к 90° . Круговая поляризация равна нулю во время слабой фазы и начинает расти при появлении излучающей структуры, и достигает максимума в середине яркой фазы, когда луч зрения наблюдателя направлен вдоль магнитной оси. Кривые блеска и поляризации сильно отличаются в однополюсных системах (рис.1.2).

Здесь кривая блеска квазисинусоидальна. Максимум блеска совпадает с максимумом линейной поляризации. Вид кривой круговой поляризации более сложен. Максимум появляется при малых углах к линиям поля в двух фазах: 0.8

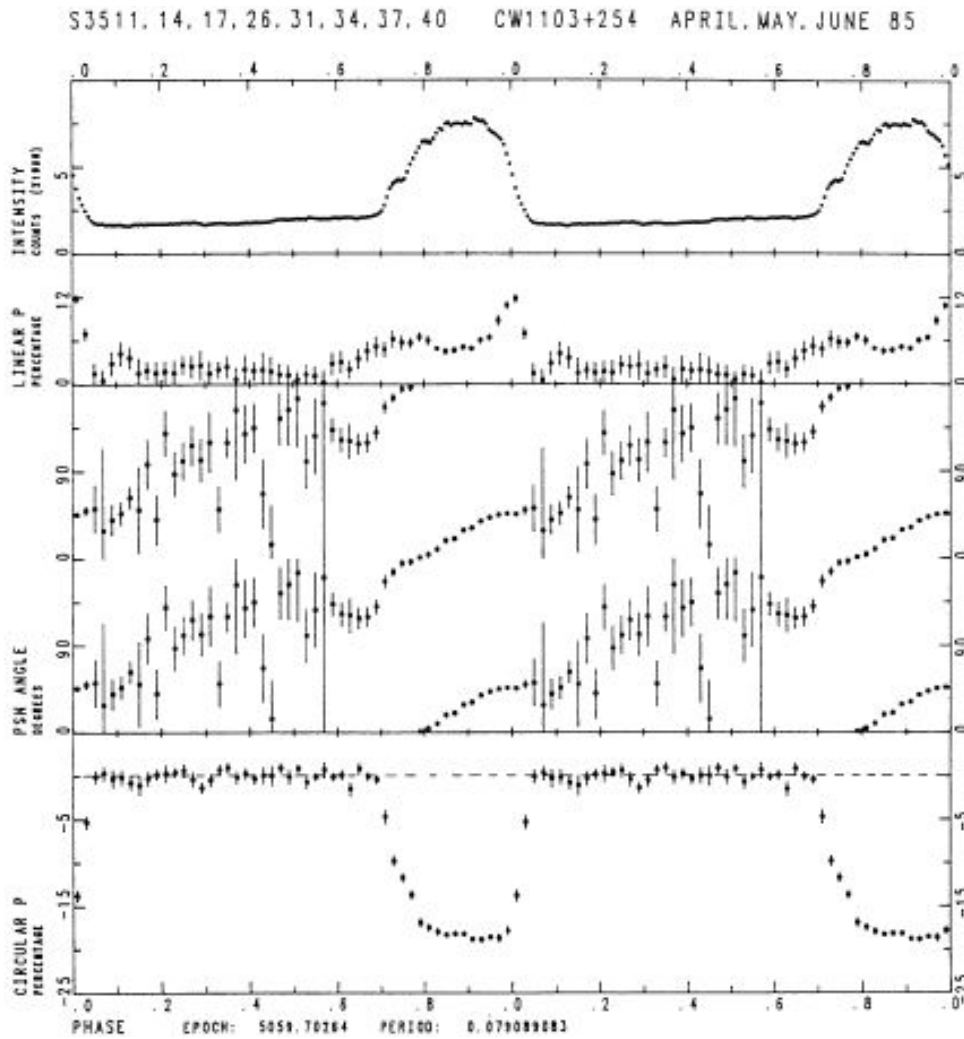


Рис. 1.1: На рисунке показаны сверху вниз: кривая блеска в единицах интенсивности (отсчеты $\times 1000$), линейная поляризация в процентах, изменение позиционного угла в градусах, круговая поляризация в процентах. Для двухполюсной системы ST LMi [28].

и 0.2. Используя кривые блеска и круговой поляризации двухполюсных систем можно получить строгие условия для размеров и высоты области циклотронного излучения. Если эта область располагается на некоторой высоте от поверхности белого карлика, тогда она будет видна короткое время в начале и в конце яркой фазы. Круговая поляризация должна пересекать нулевое значение и менять знак в этот короткий промежуток времени. Но на рис.1.2, нет изменения знака круговой поляризации. Это ограничивает высоту излучающей области на уровне $0.005 R_{wd}$ [28, 29]. Максимум блеска достигается дольше, чем происходит спад. Можно предположить, что в одном сечении аккреционная колонна более протяженна, чем в другом.

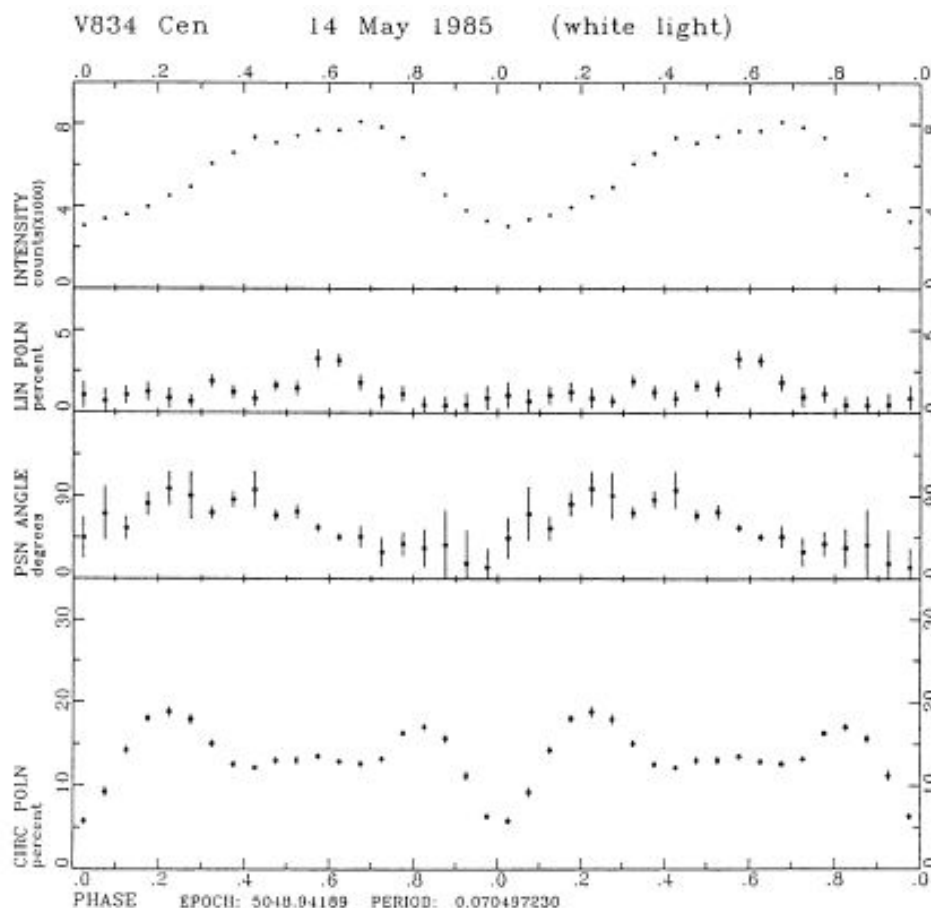


Рис. 1.2: Наблюдаемые характеристики аналогичные рис.1.1 для однополюсной системы V834 Cen [11].

Быстрые переменности, обнаруженные в кривых блеска, вспышки и фликеринг, говорят о неоднородности потока аккрецирующего вещества. Более плотные части при столкновении с поверхностью белого карлика выделяют больше тепла, что кратковременно увеличивает яркость объекта. Быстрые квазипериодические осцилляции с периодом в 1-3 секунды были обнаружены в кривых блеска V834 Cen [30] и AN UMa [31]. Возникновение этой переменности приписывают воздействию альвеновских волн, поперечных магнитогидродинамических волн, распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля. Они управляют аккреционным потоком, регулируя темп аккреции, что приводит к изменениям блеска [1]. Одноразовые вспышки наблюдаются у некоторых полюсов в спокойном состоянии. Увеличение яркости происходит во всех диапазонах. Возможные объяснения этому: магнитные вспышки на вторичной компоненте системы, уплотненные нити падающего на белый карлик вещества, эпизодиче-

ские выбросы вещества вторичной компонентой из-за магнитной активности или корональных выбросов [32].

В видимом спектре полярных областей наблюдаются эмиссионные линии водорода серии Бальмера H_I , HeI , $HeII$ $\lambda 4686$ Å и бленда $CIII/NIII$. Интенсивности $HeII$ $\lambda 4686$ Å и H_β сопоставимы [6, 7]. Профили линий сильно зависят от фазы периода двойной системы, и в основном показывают сложные формы, вклад в которые дают разные компоненты с разными амплитудами скоростей. Присутствие сложных форм профиля были обнаружены ещё в спектрах среднего разрешения AM Her [33] и EF Eri [34]. Полную картину об областях излучения можно составить с помощью реконструкции доплеровских томограмм [35, 36]. Построение доплеровских томограмм подтверждает многокомпонентность областей формирования эмиссионных линий. Линии ионизованного гелия образуются в горячих областях находящихся вблизи поверхности белого карлика, а линии водорода и нейтрального гелия в струе перетекающего вещества вблизи точки L1. Рентгеновское излучение горячего пятна нагревает поверхность красного карлика, которая становится источником излучения узкой компоненты эмиссионных линий.

Проявление компонент системы в наблюдаемых спектрах затруднено. Тем не менее в низком состоянии блеска, когда темп аккреции мал, светимость белого карлика начинает доминировать. Становится возможным увидеть линии белого карлика. Обнаружение термов зеемановского расщепления линий водорода позволяет оценить величину магнитного поля. В некоторых системах в красном диапазоне спектра наблюдаются широкие полосы поглощения. Такое происходит, когда красный карлик частично или полностью затмевает аккреционную структуру. Сравнивая наблюдаемые спектры красного карлика с теоретическими моделями можно определить спектральный класс вторичного компонента. Проявление сильного магнитного поля в полярах так же наблюдается в виде линий циклотронного излучения. Впервые они были обнаружены у объекта VV Pup в 1979 г. [37–39]. Первые модели предполагали, что излучение в континууме проходит через холодное вещество, где оно поглощается на частотах кратных циклотронной частоте [40]. Это не соответствовало модели горячей области излучения [41]. В 1982 г. было показано, что модели непоглощаемого циклотронного излучения лучше описывают наблюдаемые спектры [42].

Выше перечисленные особенности касаются также и инфракрасного диапазона, излучение сильно переменно как на орбитальной, так и долговременной шкале времени. Циклотронные гармоники в инфракрасном диапазоне проявляются значительно сильнее, а инфракрасная фотометрия позволяет определить расстояние до объектов. Бейлей [14] представил зависимость звездной величины красного карлика в полосе K от эффективной температуры. Сравнение с расстояниями, найденными другими методами, показало хорошее соответствие. Расстояние до КП редко превышают 1 кп.

1.1.2 Рентгеновский диапазон

Выше отмечалось, что в полярах аккреция вещества происходит на ограниченную поверхность белого карлика, в этой области образуется горячее пятно, в котором, и формируется рентгеновское излучение под действием механизмов синхротронного и тормозного излучения [43]. Тормозное излучение отвечает за жесткий компонент рентгеновского излучения (20-30 КэВ), синхротронное излучение имеет пик в ультрафиолетовом диапазоне, мягкое рентгеновское излучение (<10 КэВ) формируется переизлучением фотонов высоких энергий.

Первые рентгеновские наблюдения жесткой рентгеновской компоненты были получены Ротшильдом [44] для AM Her и Уайтом [45] для EF Eri с помощью космической обсерватории HEAO-1. Сравнение наблюдаемого рентгеновского спектра с моделями чернотельного излучения, показало, что температура горячего пятна находится на уровне $T_e = 30.9 \pm 4.5$ КэВ для AM Her, для EF Eri была измерена температура $T_e \sim 20$ КэВ [46]. Наблюдения полярных областей в мягком рентгеновском диапазоне [47, 48] показали, что интегральный поток в нем превосходит интегральный поток в жестком. Этот эффект впервые был предсказан Кингом и Ласотой [49] и был назван “проблемой мягкого рентгена”.

Переменность в рентгеновском диапазоне идентична с оптическим, но более зависима от фаз раскрытия горячего пятна. Масон [50] разделил поляры на два типа. Кривые потока рентгеновского излучения первого типа в течение орбитального периода имеют один максимум, в момент раскрытия аккреционной структуры. В других фазах поток может равняться нулю. Второй тип имеет два максимума, переходящие один в другой, с менее продолжительными падением потока. Так же обнаружены изменения среднего рентгеновского потока излучения в разные эпохи наблюдений [51, 52].

1.2 Модель аккреции вещества

Стандартная модель аккреции в полярах предполагает, что вещество покидающее поверхность красного карлика, заполняющего свою полость Роша, захватывается магнитным полем белого карлика. Оно “вмораживается” в магнитно-силовые линии, реализуется канализированный тип аккреции. Вещество направляется на один или оба магнитных полюса белого карлика, где формируется аккрецирующая колонна в форме арки [53, 54]. Арка неоднородна и содержит сгустки плотности (blobs), а степень неоднородности определяется темпом аккреции, величиной и геометрией магнитного поля. Это порождает значительное различие в наблюдаемых характеристиках рентгеновского излучения. Задача определения модели аккрецирующей области усложняется, тем что системы с одинаковыми параметрами наблюдаются поразному в зависимости от угла наклона орбиты к лучу зрения.

Рассмотрим модель с равномерной плотностью аккрецирующей колонны. Вещество красного карлика сталкивается с поверхностью белого карлика со скоростью превышающей скорость звука, формируя ударный фронт. Скорость потока уменьшается в 4 раза проходя через фронт и охлаждается после слияния с поверхностью белого карлика 1.3.

Температура за ударным фронтом рассчитывается по формуле [55]:

$$T_e = \frac{3}{8} \frac{GM\mu m_H}{kR}$$

Для стандартных параметров белого карлика $T \sim 10^8$ К. Таким образом главным механизмом охлаждения вещества у основания колонны становится тормозное рентгеновское излучение в 10 – 20 КэВ, остальная часть колонны остужается за счёт циклотронного механизма в оптическом диапазоне. Стоит отметить, что при сильном магнитном поле и низком темпе аккреции циклотронный механизм может стать более эффективным. Следовательно, взаимодействие двух механизмов охлаждения зависят от параметров ударной волны, величины магнитного поля и темпа аккреции. Третий механизм - рассеивание фотонов за счёт столкновения релятивистских электронов, работает в областях с уже охлажденным веществом. За счёт него формируется ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение [56]. На рис.1.4 показаны доминирующие механизмы охлаждения в плоскости $B - \log L/f$, где L/f - темп аккреции на единицу

поверхности, L - светимость, зависящая от темпа аккреции, f - площадка на поверхности белого карлика, покрываемая аккреционной колонной.

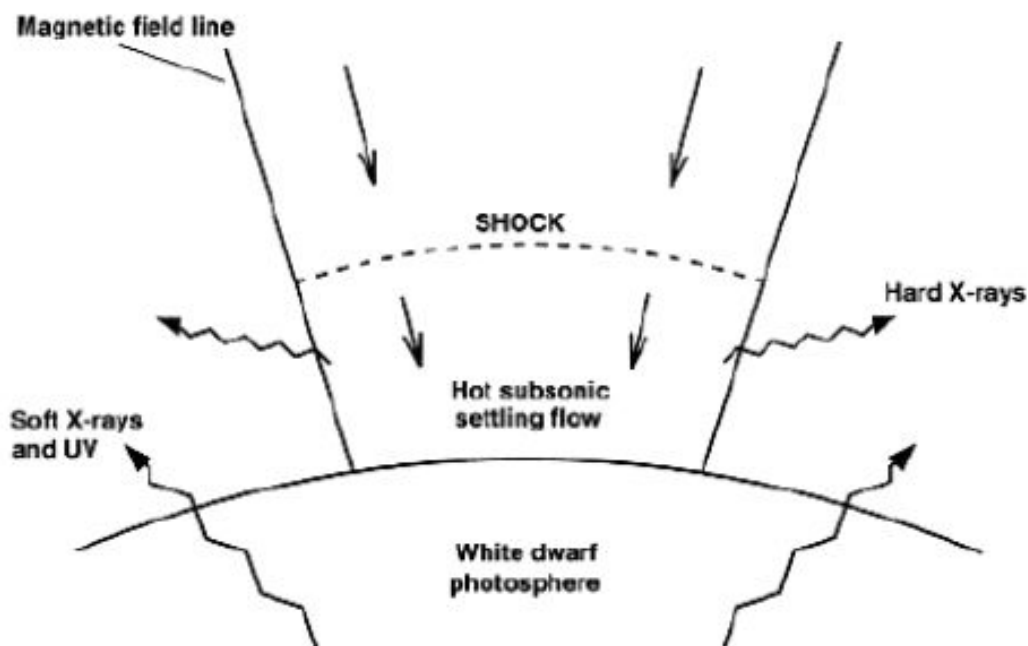


Рис. 1.3: Схематическое изображение области аккреции [57].

Однако, модель аккреционной колонны однородной плотности предсказывает доминирование потока рентгеновского излучения L_{hard} над L_{soft} , что расходится с наблюдениями. Для решения проблемы избытка мягкого рентгеновского диапазона была предложена неоднородная аккреционная колонна [59]. Это привело к тому, что начали рассматривать ударные волны, которые проникали под поверхность белого карлика на разную глубину, в зависимости от плотности вещества. Таким образом, жесткое рентгеновское излучение проходит через вещество белого карлика с большой оптической толщиной и теряет энергию.

Несмотря на то, что строятся теоретические модели кривых блеска в рентгене и видимом диапазоне [60, 61], кривых круговой и линейной поляризации [62, 63], а также модельные спектры циклотронного излучения [64, 65], необходимо продолжать совершенствовать наше представление о физике поля-

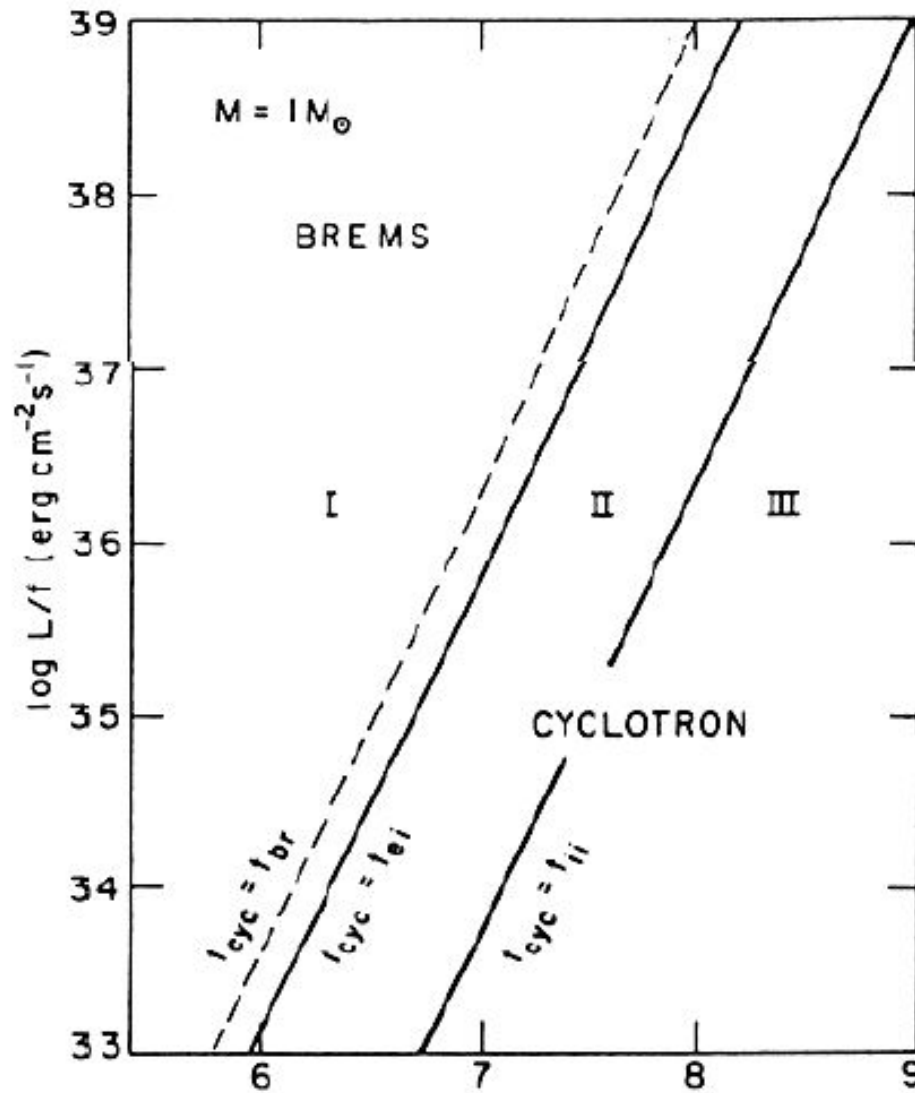


Рис. 1.4: Механизмы охлаждения в плоскости $B - \log L/f$, где L/f - темп аккреции на единицу поверхности, L - светимость, зависящая от темпа аккреции, f - площадка на поверхности белого карлика, покрываемая аккреционной колонной. Для модели белого карлика солнечной массы [58].

ров. Строить новые более полные модели аккреции вещества в магнитных катаклизмических переменных.

1.3 Поиск кандидатов в магнитные катаклизмические переменные

На данный момент известно 136 систем, классифицированных как полярны [8]. И каждый представитель этой группы индивидуален в своих наблюдательных проявлениях [9]. Необходимо увеличивать количество полярных для улучшения

статистики и более детального изучения модели аккреции вещества на сильно замагниченный белый карлик. Обнаружение и исследование затменных полярков дает возможность расширить число систем с известными базовыми параметрами, определенными с более высокой степенью достоверности.

Вышеперечисленные наблюдательные особенности позволяют с использованием фотометрических и рентгеновских обзоров находить кандидатов в магнитные катаклизмические переменные. По результатам программы Swift Burst Alert Telescope (BAT) за 70 месяцев наблюдений было открыто 55 КП, 41 из них магнитные: 31 промежуточный поляр и 10 полярков [66]. На космическом телескопе International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL)/IBIS открыто 33 катаклизмические переменные: 25 промежуточных полярка и четыре полярка [67]. По данным телескопе ROSAT, рассчитанного на детектирование более мягкого рентгеновского излучения, было найдено 72 переменных объекта, без уточнения их классификации, и отождествлены их оптические компоненты [68]. По фотометрическим обзорам Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [69], Catalina Sky Survey CSRT [70], отбираются кандидаты в катаклизмические переменные по вспышечной активности и в дальнейшем проводятся дополнительные исследования для классификации объектов (см. напр. [71]). С помощью оригинального метода поиска объектов с сильной линией H_{α} по данным каталога The INT Photometric H_{α} Survey of the Northern Galactic Plane (IPHAS)¹ было найдено 11 кандидатов в катаклизмические переменные [72]. Один из этих объектов исследован в диссертационной работе.

Идеальным для поиска полярков будет обзор направленный на поиск круговой поляризации и фотометрический обзор в эмиссионной линии $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$.

¹<http://www.iphas.org>

Глава 2

Поляриметрические исследования полярнов

Весь спектр наблюдательных особенностей полярнов определяется наличием в системе сильнозамагниченного белого карлика. Излучение аккрецирующей плазмы в сильных магнитных полях обладает высокой степенью поляризации, природа которой связана с циклотронным механизмом. Поляриметрические наблюдения являются важной частью детальных исследований физических процессов происходящих в системе. Но для данного типа объектов они весьма затруднены из-за слабости их блеска.

2.1 Наблюдения и обработка

Поляриметрические наблюдения в полосе V проводились на телескопе БТА САО РАН с применением редуктора светосилы SCORPIO-2 [16] и матрицы EEV 42-90 (4600 x 2048). В качестве анализатора круговой поляризации использовалась призма Волластона (WOLL-1) [73]. При наблюдениях регистрируется два изображения с интенсивностью I_o и I_e (рис.2.1). Для измерения круговой поляризации в пучок вводится $\lambda/4$ -фазовая пластина, которая поворачивается на два угла - 0° и 90° . В этом случае величина круговой поляризации (V-параметр Стокса) находится из соотношения:

$$V = 0.5 \left(\frac{I_o - I_e}{I_o + I_e} \right)_{\theta=0^\circ} - 0.5 \left(\frac{I_o - I_e}{I_o + I_e} \right)_{\theta=90^\circ}$$

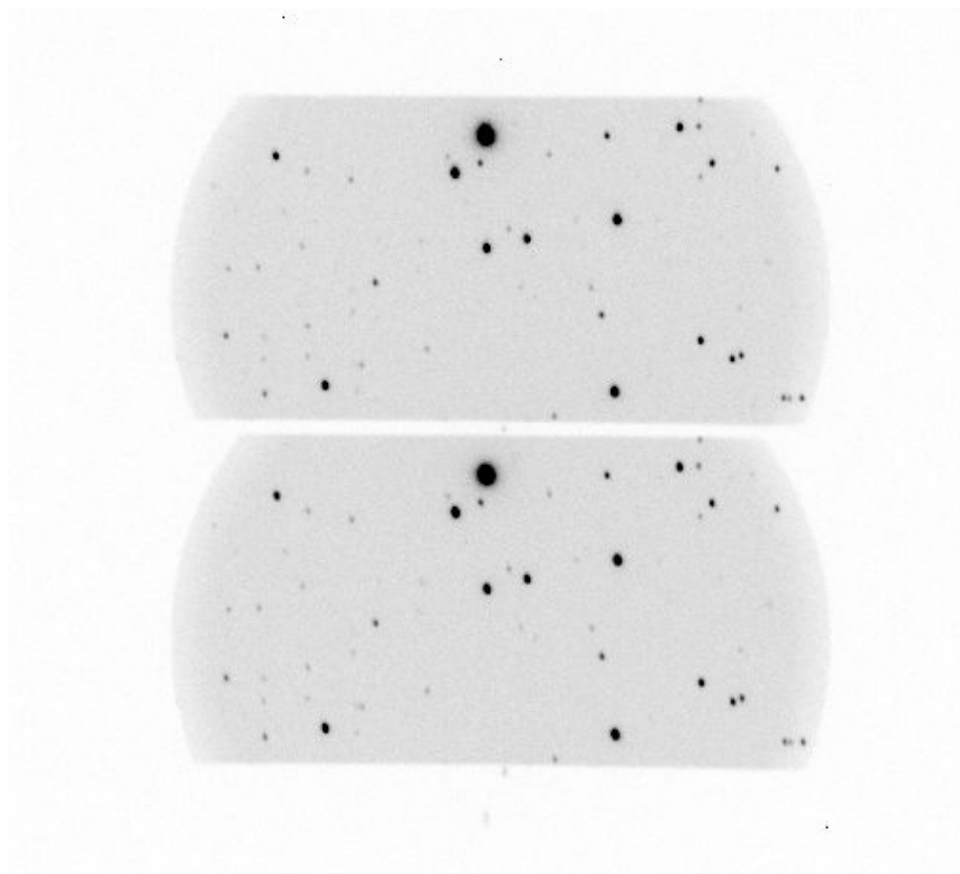


Рис. 2.1: Пример поляриметрического изображения, полученного на телескопе БТА с прибором SCORPIO-2. При угле $\theta = 0^\circ$ обыкновенные лучи I_o сверху, I_e - снизу, при угле $\theta = 90^\circ$ наоборот.

Интенсивность объекта рассчитывалась складыванием потоков в обыкновенных и необыкновенных лучах. Обработка данных проводилась в среде IDL¹.

Не для всех объектов удалось провести их в течение всего орбитального периода. В таблице 2.1 приведен журнал наблюдений, а также интервалы фаз, определенные для каждого кандидата по опубликованным или полученным авторами в ходе обработки фотометрических данных эфемеридам и периодам, представленным в разделе 3. Юлианские даты и значения фаз рассчитывались на середину экспозиции. В качестве звезды сравнения и стандарта нулевой круговой поляризации выбиралась звезда поля, в предположении, что ее излучение не поляризовано и нет переменности блеска. Координаты, звездные величины, если таковые были известны из предыдущих работ или определены авторами данной работы, ошибки фотометрических и поляриметрических измерений звезд сравнения даны в таб. 2.2. Ошибки определения звездной величины и степени по-

¹<http://www.ittvis.com/idl>

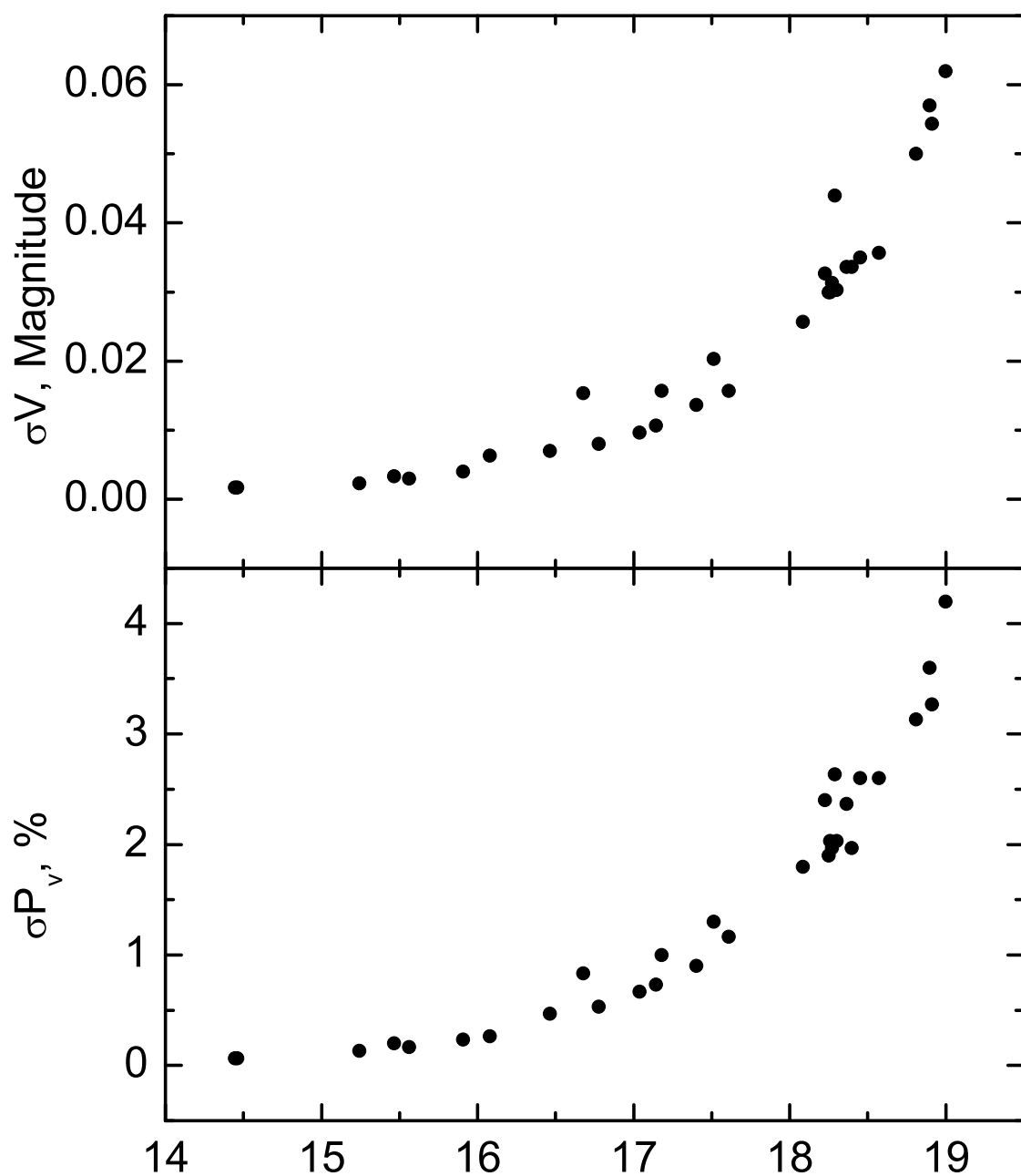


Рис. 2.2: Ошибки определения звездной величины (вверху) и соответствующей степени поляризации (внизу) при 30 секундной экспозиции и хорошей прозрачности на 6-м телескопе БТА с использованием прибора SCORPIO-2 в режиме прямых поляризметрических изображений.

Таблица 2.1: Журнал поляриметрических наблюдений.

Object name	Data, yymmdd	Time, HJD 2400000+	Exposure, sec x num	Seeing, arcsec	Phase coverage
USNO0825	101106	55507.138-.203	60x40	1.8	0.19-0.95
MT Dra	110527	55709.454-.500	120x34	1.5	0.62-1.21
RXS184542	110828	55802.340-.371	30x60	1.1	0.94-1.49
	120423	56041.477-.549	120x44	2.0	0.92-1.86
CSS081231	120423	56041.313-.388	60x78	2.5	0.84-1.76
IPHAS0528	121115	56247.428-.491	10x226	1.0	0.5-1.5
CSS130604	141121	56983.122-.218	120x66	1.0	0.54-1.96

Таблица 2.2: Информация о звездах сравнения

Object name	Comp. star parameters				
	α hh:mm:ss	δ dd:mm:ss	V mag	σ_{phot} mag	σ_{pol} %
USNO0825	20:31:34	-00:05:23	17.61	0.03	0.30
MT Dra	18:47:03	+55:39:03	-	0.009	0.14
RXS184542	18:45:40	+48:31:47	-	0.003	0.09
	18:45:40	+48:31:47	-	0.017	0.51
CSS081231	07:11:22.8	+44:04:14	16.57	0.01	0.59
IPHAS0528	05:28:29	+28:38:32	14.49	0.005	0.20
CSS130604	21:54:32	+15:58:01	17.9	0.03	1.14

ляризации при 30 секундной экспозиции и хорошей прозрачности показаны на рис. 2.2. На последующих графиках колебания блеска и круговой поляризации звезд сравнения представлены незаполненными кружками. Изменения блеска исследуемых объектов выражены в относительных звездных величинах.

На телескопе БТА с прибором SCORPIO-2 реализована методика поляриметрических наблюдений слабых объектов до $V \simeq 20^m$, в режиме поляриметрии с представленной авторами точностью. Наблюдение более слабых объектов требует значительного увеличения экспозиции, что затрудняет исследовать фазовую орбитальную переменность поляризованного излучения и делает такие наблюдения менее ценными. Оптимальное соотношение временного разрешения и точности поляриметрических наблюдений получается для объектов 17^m .

2.2 Анализ наблюдательных данных

2.2.1 MT Dra

Впервые этот объект исследовали Шварц и др. [74] в рентгеновском и оптическом диапазонах. Ими было показано, что объект имеет несколько состояний блеска. Аккреция в высоком состоянии происходит на оба магнитных полюса белого карлика. Фотометрическое исследование системы было выполнено Зубаревой и др. [75]. В ходе долговременных наблюдений авторы обнаружили высокие, $R \sim 17^m$, и низкие, $R \sim 18^m$, состояния блеска системы, которые объясняются изменением темпа аккреции. Наблюдался переход объекта в низкое состояние блеска в течение одной ночи. За 17 лет не зафиксировано изменений орбитального периода MT Dra. Представленная в [75] эфемерида равнялась:

$$HJD = 2454676.^d446(\pm 0.001) + 0.^d0893869(\pm 0.0000001) E,$$

где нулевая фаза соответствует минимуму блеска.

Поляриметрические наблюдения объекта MT Dra были проведены нами 27 мая 2011 г. на телескопе БТА в качестве дублирующей программы. Результаты показаны на рис.2.5. Небольшая амплитуда переменности $\sim 0.75^m$ кривой блеска и плавный подъем на фазах $\varphi = 0.6 - 0.9$ говорят о том, что объект находился в высоком состоянии [75]. Круговая поляризация изменяется в диапазоне от $P_v = -6 + 12\%$. Она растет с увеличением блеска и достигает максимума вблизи фазы $\varphi = 0.9$. Во время плато, $\varphi = 0.95 - 1.2$, круговая поляризация меняет знак несколько раз, достигая значения -6% в фазе $\varphi = 1.15$. Изменение знака круговой поляризации указывает на аккрецию на оба полюса белого карлика, подтверждая вывод, сделанный в работе [74].

2.2.2 1RXS J184542.4+483134

В 2011 году Денисенко и Соколовский [76], используя оригинальный метод поиска кандидатов в катаклизмические переменные по опубликованным данным, обнаружили переменность данного объекта. 1RXS J184542.4+483134 (далее RXS184542) был исследован в рентгеновском, ультрафиолетовом и видимом диапазонах Павленко и др. [77]. Они зарегистрировали сильную орбитальную

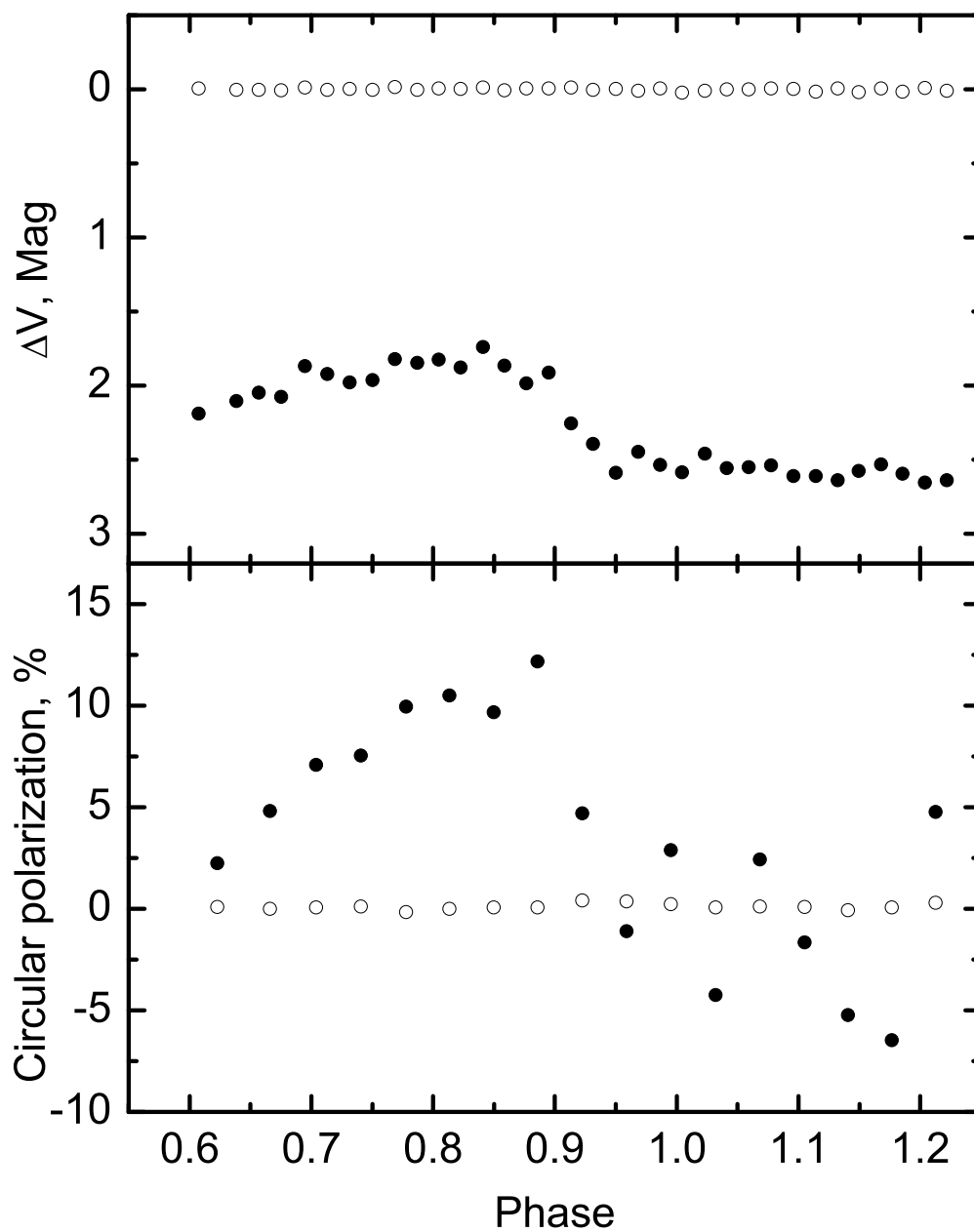


Рис. 2.3: Орбитальные кривые блеска (вверху) и круговой поляризации (внизу) объекта MT Dra (кружки). Незаполненные кружки – звезда сравнения.

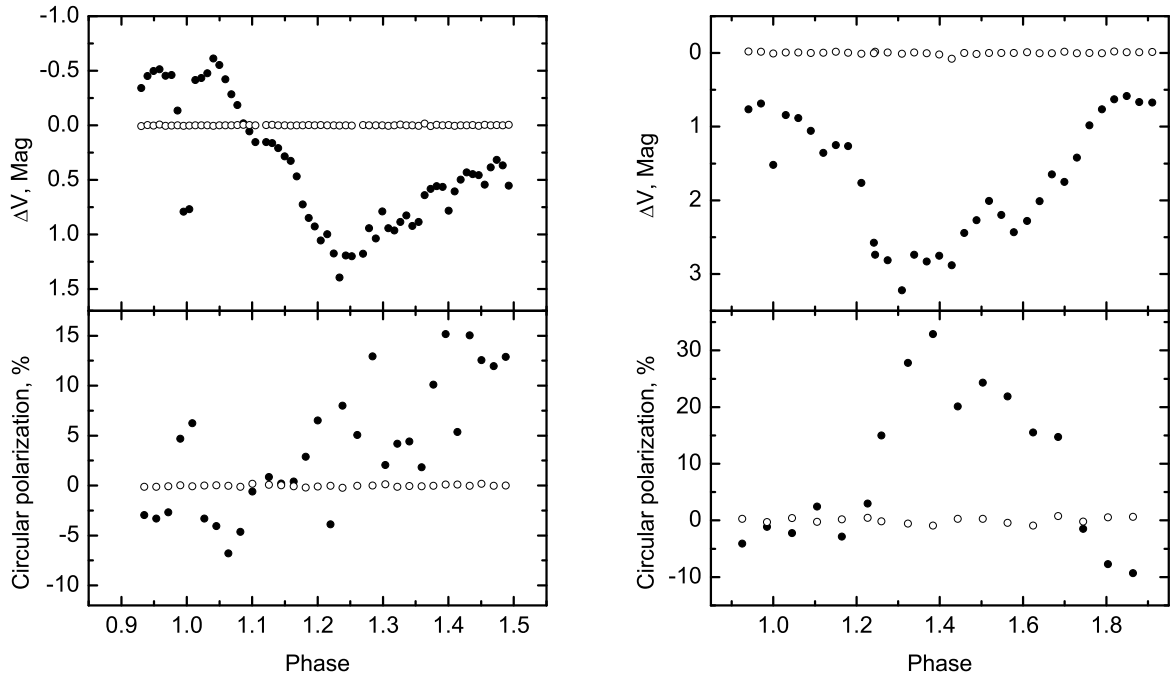


Рис. 2.4: То же, что на рисунке 2.3, для объекта 1RXS J184542.4+483134, в 2011 г. (слева) и в 2012 г. (справа).

переменность блеска в видимом и ультрафиолетовом диапазонах и долговременную переменность в рентгеновском. Орбитальный период оказался коротким, $P_o = 0.^d05490(8)$ ($\simeq 78$ мин.). Было обнаружено кратковременное затмение глубиной более 2 звездных величин. На основе наблюдаемых особенностей система была классифицирована как поляр.

Мы провели фотополариметрические наблюдения для подтверждения магнитной природы данного объекта. Первые наблюдения, в 2011 г., были оценочными и не покрыли полный орбитальный период. Это удалось сделать во время вторых, запланированных, в 2012 г. Результаты показаны на рис.2.4. В 2011 г. объект находился в более высоком состоянии блеска, амплитуда кривой блеска составляла $\sim 2^m$, глубина затмения $\sim 1.25^m$. Круговая поляризация отрицательна до -7% в момент максимума блеска $\varphi = 0.95 - 1.1$, с изменением знака в момент минимума $\varphi = 0$. С падением блеска круговая поляризация меняла знак и достигала значения 15% в фазе $\varphi = 1.4$. В 2012 г. в более низком состоянии амплитуда изменений блеска системы возросла до $\sim 2.5^m$. Наблюдалось значительное изменение степени круговой поляризации: от -10% до 33% , что указывает на увеличение вклада циклотронного излучения. В связи со скважно-

стью наблюдений не удалось наблюдать полную глубину затмения и изменение знака круговой поляризации в фазе $\varphi = 0$.

2.2.3 USNO-A2.0 0825-8396733

Исследуемый объект USNO-A2.0 0825 18396733 (далее USNO0825) был обнаружен при наблюдениях площадки в созвездии Орла командой астрономов-любителей [78]. Используя 30-см телескоп системы Ричи–Кретьена обсерватории Астротел-Кавказ и ПЗС-приемник Apogee Alta U9000, они получили 98 изображений без фильтра с 300-секундными экспозициями. По ним была определена эфемерида системы:

$$HJD = 2455387.^d3976(\pm 0.001) + 0.^d0840(\pm 0.0004) \times E,$$

где нулевая фаза соответствует моменту минимума блеска. Короткий период и значительная амплитуда переменности блеска объекта довольно типичны для катаклизмических переменных. В спектре, полученном Н. Борисовым и В. Шиманским на 6-м телескопе в августе 2010 г., видны сильные линии H , HeI и линия $HeII$ 4686Å. Отношение интенсивностей $I_{HeII4686}/I_{H\beta} \sim 0.8$, что характерно для полярных [6, 7].

Результаты поляриметрических наблюдений объекта были свернуты с нашим периодом, представленным в Главе 3. Кривая круговой поляризации в фильтре V показана на рис.2.8(а). Круговая поляризация достигает значения -31% в фазе $\varphi = 0.9$, минимальное значение -2% в фазе $\varphi = 0.38$. К сожалению, мы не смогли отнаблюдать весь период. Возможно, что степень круговой поляризации будет ещё выше или станет уменьшаться и поменяет знак. Мы провели сравнение объекта с исследованными системами V834 Cen [11] и RX J1313.32-3259 ([12]), которые схожи по форме кривых блеска и круговой поляризации. У обоих объектов на фазах минимума блеска происходит ослабление круговой поляризации. Авторы предполагают, что происходит затмение области циклотронного излучения аккреционной структурой. При этом у объекта RX J1313.32-3259 наблюдается изменение знака круговой поляризации в синем диапазоне и в белом свете (см. рис. 9 и 10 в [12]), что говорит о появлении второго аккреционного региона на видимой полусфере белого карлика. Как показывает позиционный угол

линейной поляризации, основной аккреционный регион все время находится на видимой полусфере белого карлика.

2.2.4 CRTS CSS081231 J071126+440405

Этот кандидат в поляры был обнаружен Маехара [79] в обзоре неба Catalina Sky Survey (CSS [70]², университет Аризоны, США). Ему было присвоено имя в каталоге CRTS CSS081231 J071126+440405 (далее CSS081231). Последующие фотометрические наблюдения [80–82] показали, что объект обладает сильной орбитальной и долговременной переменностью. Были обнаружены три состояния блеска: низкое – $R_c \sim 17.5^m$, промежуточное – $R_c \sim 16.0^m$ и высокое – $R_c \sim 15.0^m$. Система имеет глубокое затмение до 4^m и дип (от англ. dip) – понижение блеска системы, связанное с самозатмением аккреционной структуры [81]. Фаза, в которой появляется дип, и его глубина зависят от состояния блеска системы. Торн и др. [81] наблюдали дип в фазе $\varphi = 0.1$, когда объект находился в низком состоянии. Катышева и Шугаров [82] наблюдали дип только в высоком и промежуточном состояниях в фазах $\varphi = 0.84$ и $\varphi = 0.92$. Орбитальный период системы: $P_o = 0.^d081376(3)$ [81].

Полученные нами кривые блеска и круговой поляризации объекта показаны на рис.2.6. Амплитуда кривой блеска составляет $\sim 1.5^m$, глубина затмения $\sim 4.5^m$. Из сравнения формы кривой блеска с кривыми из работы [82], следует, что на момент наших наблюдений объект находился в промежуточном состоянии блеска. Кривая круговой поляризации повторяет форму кривой блеска. Излучение поляризовано на фазах максимума блеска ($\varphi = 0.85 - 1.25$) до 8%, в момент затмения знак поляризации меняется и она достигает -14% . Во время плато - $\varphi = 1.3 - 1.7$, поляризация в среднем имеет отрицательный знак, степень поляризации излучения близка к нулю. Дип на кривой блеска не наблюдается.

2.2.5 IPHAS J052832.69+283837.6

Объект IPHAS0528 взят из списка кандидатов в катаклизмические переменные, опубликованного в работе Витама и др. [72]. Авторами были отобраны 11 кандидатов с сильными линиями H_α . Для каждого из них получен спектр отождествления, а для 3 объектов проведены более детальные наблюдения. Полу-

²<http://www.lpl.arizona.edu/css/>

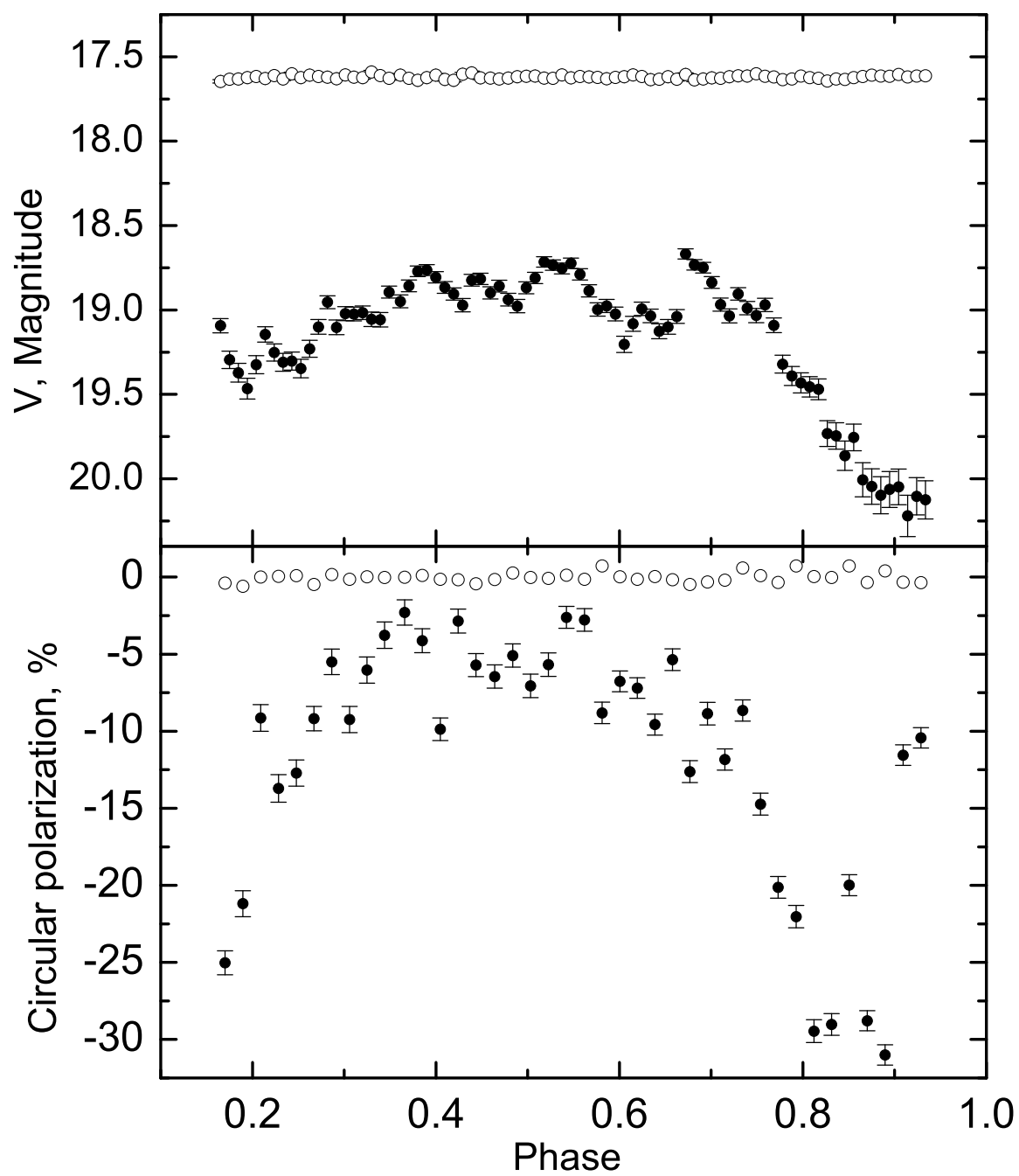


Рис. 2.5: То же, что на рисунке 2.3, для объекта USNO-A2.0 0825-8396733

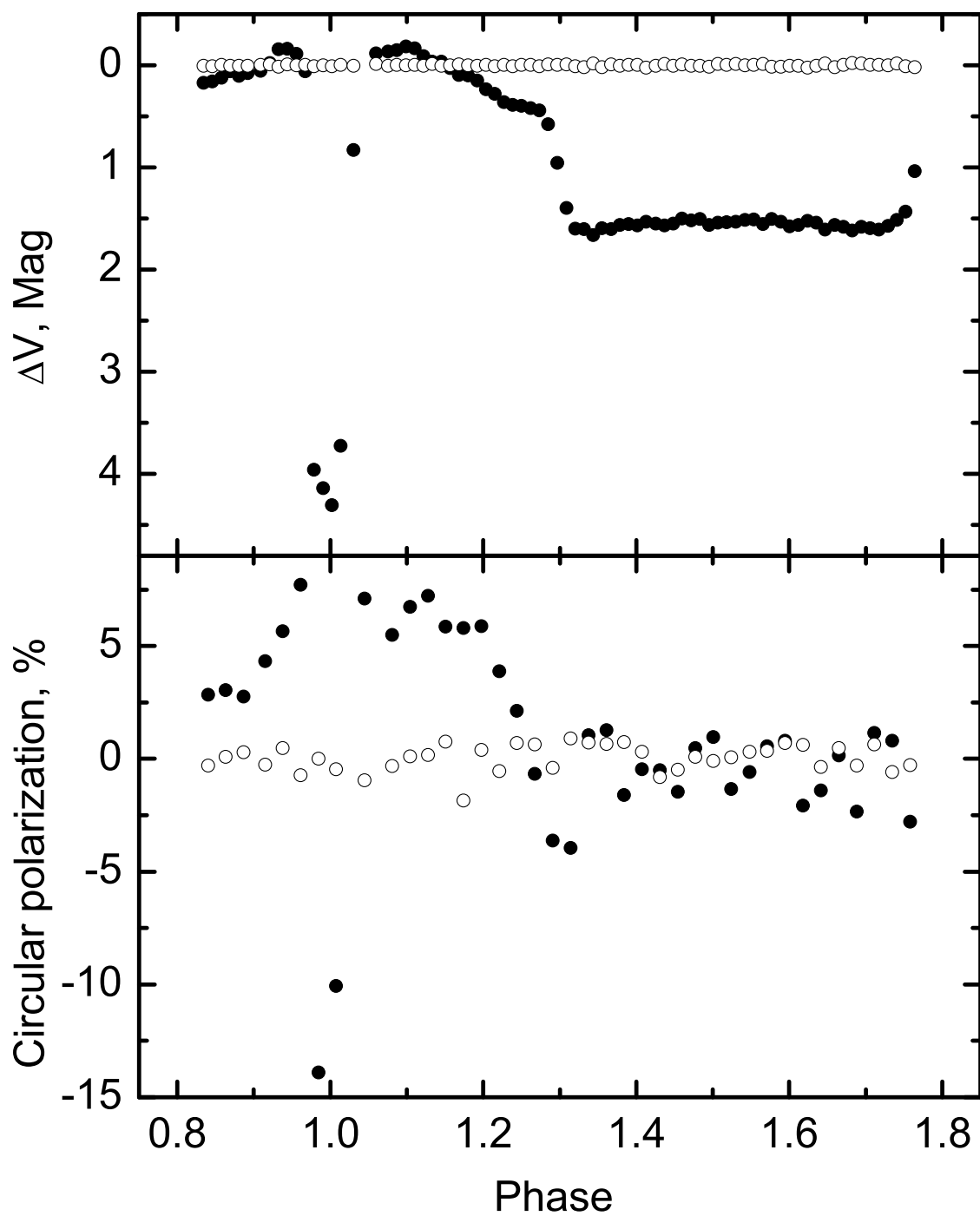


Рис. 2.6: То же, что на рисунке 2.3, для объекта CRTS CSS081231 J071126+440405

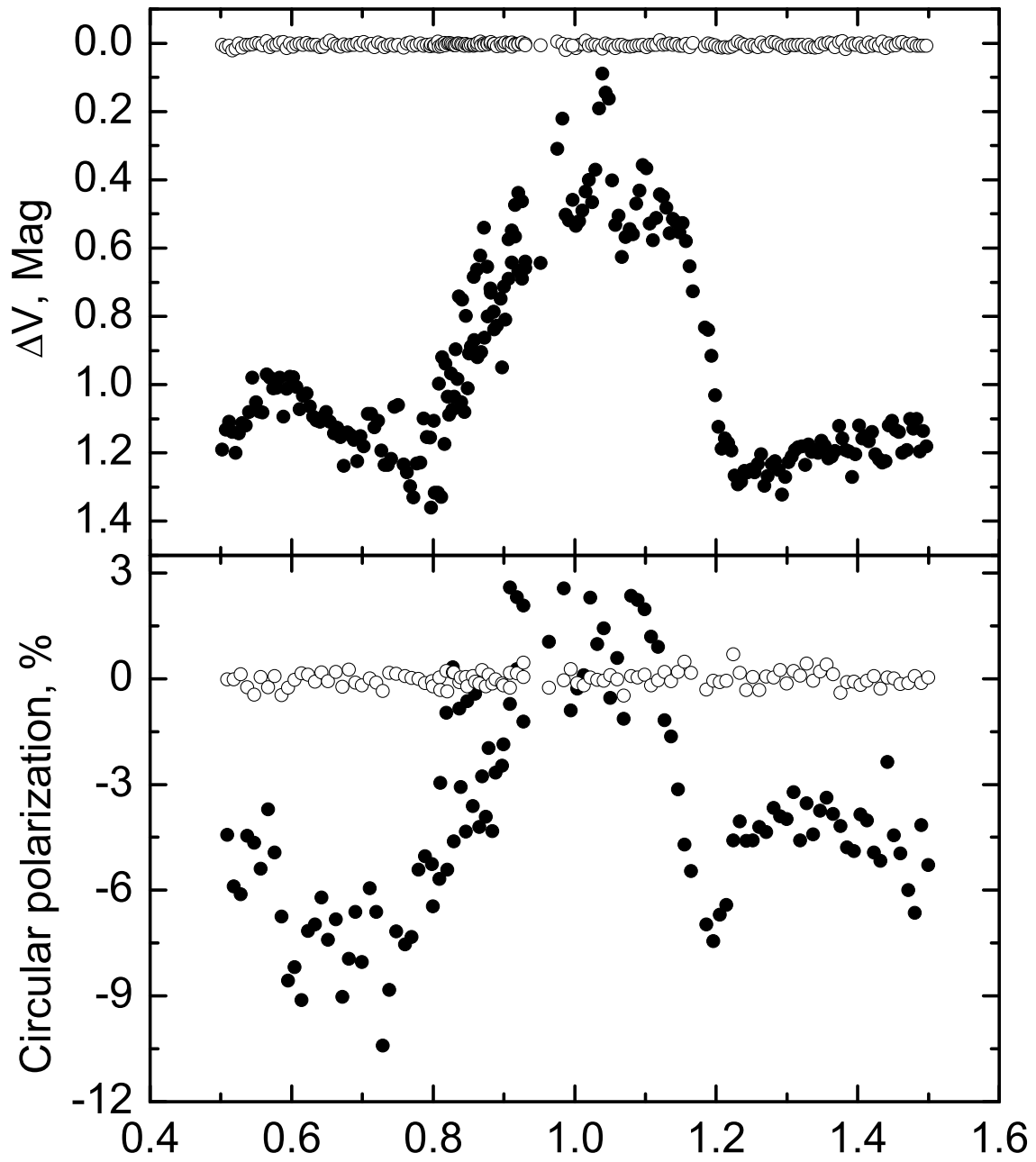


Рис. 2.7: То же, что на рисунке 2.3, для объекта IPHAS J052832.69+283837.6

ченный спектр IPHAS0528 показал высокое отношение интенсивности линии $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$ к линии $H\beta$.

Объект IPHAS0528 – яркий, поэтому удалось получить кривые блеска и круговой поляризации с высоким временным разрешением. Средняя звездная величина $V \sim 15.3^m$ указывает на то, что объект находится в высоком состоянии. Однако характеристики кривой блеска, представленной на рис.2.7, соответствуют описанию более низкого состояния системы (Раздел 3.2.2): амплитуда блеска составляет $\sim 1.2^m$, отчетливо видны главный и вторичный максимумы. По-видимому, в полосе V амплитуда и форма кривой блеска сохраняются независимо от состояния блеска системы. Круговая поляризация большую часть периода отрицательна, достигает величины -10% , и лишь в фазах максимума ($\varphi = 0.9 - 0.1$) меняет знак, степень поляризации при этом не превышает 3% . Интересные особенности в форме кривой круговой поляризации наблюдаются в фазе окончания максимума блеска $\varphi = 1.2$, степень поляризации прекращает расти раньше, чем останавливается падение блеска. После вторичного максимума в фазе $\varphi = 0.6$ средняя степень поляризации увеличивается на 2% . Сложно рассуждать, что происходит в системе и какова ее геометрия. Для детального анализа следует проводить сравнение наблюдательных данных с теоретическими моделями. Наилучшие результаты достигаются при использовании многополосной фотополяриметрии полярков с расчетом всех параметров Стокса [63].

2.2.6 CRTS CSS130604 J215427+155714

Фотометрическая переменность CRTS CSS130604 J215427+155714 (далее CSS130604), сильная линия $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$ и высокая амплитуда изменения лучевых скоростей свидетельствуют о магнитной природе объекта [71]. Для окончательной классификации системы мы провели фотополяриметрические наблюдения. Результаты представлены на рис.2.8. Амплитуда кривой блеска в полосе V равна $\sim 1.5^m$. Форма кривой блеска квазисинусоидальная, максимум блеска $\varphi = 1.2 - 1.6$ в два раза продолжительнее минимума $\varphi = 0.9 - 1.1$. Увеличение блеска до максимума проходит в два раза быстрее его падения. Круговая поляризация весь период имеет отрицательный знак. Наблюдаются два минимума, в фазах $\varphi = 0.65$ и $\varphi = 1.15$. Первый минимум достигается во время ослабления блеска, второй – во время его подъема. Максимальная степень поляризации,

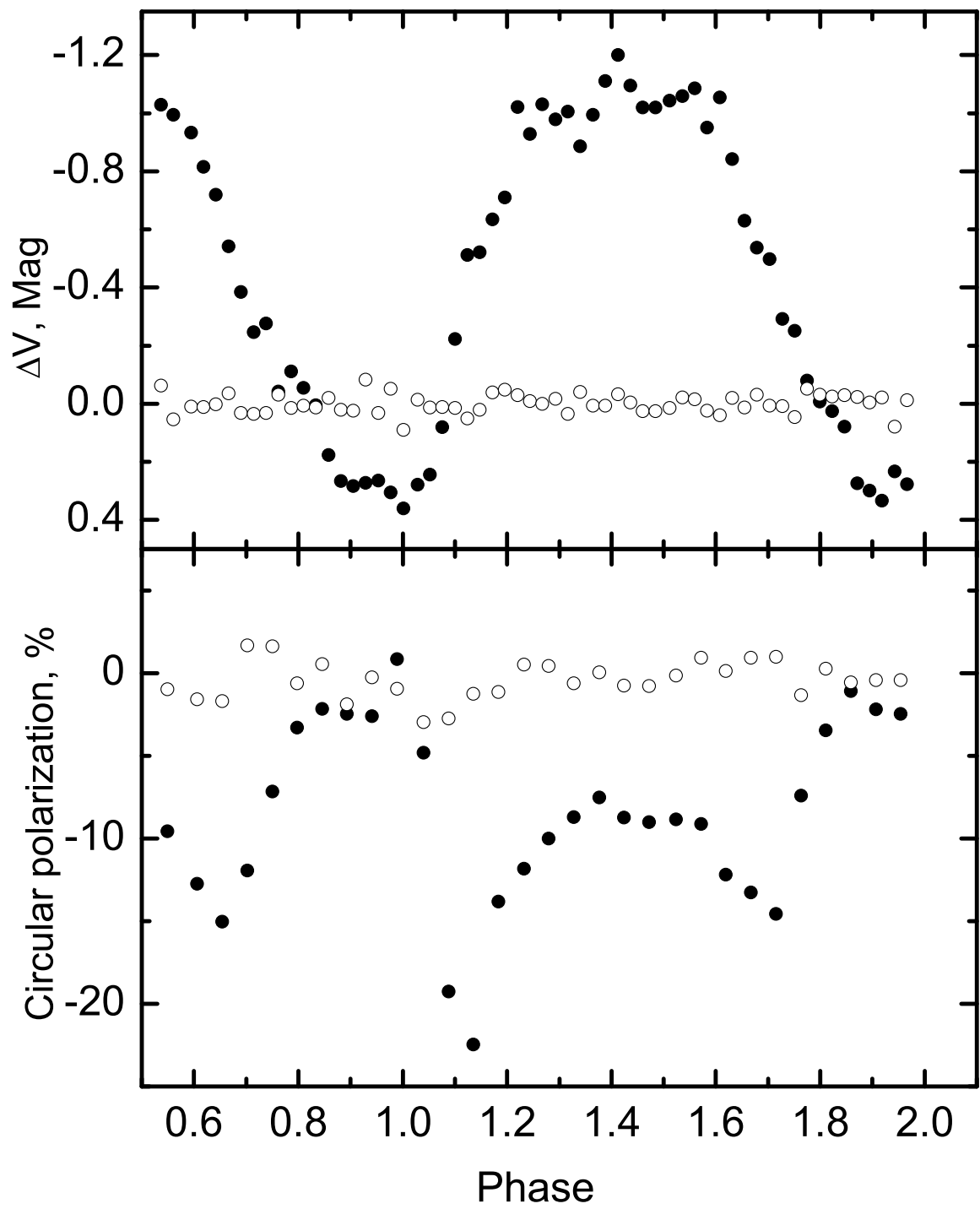


Рис. 2.8: То же, что на рисунке 2.3, для объекта CRTS CSS130604 J215427+155714

–22%, достигается во время второго минимума. В момент минимума блеска степень поляризации приближается к нулю, в максимуме – близка к –10%.

В заключение. Представлены первые поляриметрические наблюдения шести катаклизмических переменных: MT Dra, 1RXS J184542.4+483134, USNO-A2.0 0825-8396733, CRTS CSS081231 J071126+440405, IPHAS J052832.69+283837.6 и CSS 130604 215427+155714. Наблюдения в полосе V показали, что все объекты обладают значительной круговой поляризацией. У четырех объектов меняется знак поляризации в течение орбитального периода, что говорит об активности обоих магнитных полюсов белого карлика. Поляризация излучения CSS130604 не меняет знак в течении орбитального периода, оставаясь в отрицательных значениях. У USNO0825 тоже не зафиксирована смена знака, в связи с отсутствием данных на фазах, близких к 0. Объект RXS184542 наблюдался в двух состояниях блеска в 2011 и в 2012 гг. Ослабление блеска системы сопровождалось увеличением амплитуды изменения круговой поляризации, при этом увеличился вклад циклотронного излучения в общий блеск системы. В заключении главы делается вывод о магнитной природе исследованных систем и классификации их как полярных.

Глава 3

Фотометрические исследования полярнов

Для фотометрических исследований полярнов нет необходимости использования больших телескопов, как показала практика их можно эффективно выполнять на телескопах малого и среднего размера. Большой интерес представляют как фотометрическая переменность с фазой орбитального перида, так и долговременная, позволяющая отслеживать высокие и низкие состояния блеска. Кроме того наблюдения важны при анализе спектральных данных, так как позволяют выявить зависимость спектральных особенностей от состояния блеска системы, т.е. при различных темпах аккреции.

3.1 Наблюдения и обработка

Фотометрические наблюдения выполнялись на 1-м телескопе Цейсс-1000¹ САО РАН с 2010 по 2015 гг. Телескоп системы Ричи-Кретьена имеет главное фокусное расстояние 13.3 метра, где располагается подвесное оборудование. Для выполнения наблюдений использовался штатный фотометр с набором широкополосных фильтров системы Джонсона-Коузинса и ПЗС-приемника ЕЕV 42-40 (2048 x 2048 пикселей размером 13.5 x 13.5 мкм) с азотным охлаждением². Наблюдения проводились в полосах B, V, R_c . Журнал наблюдений представлен в

¹<http://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/descrip.html>

²<http://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/small/instrum.html>

таблице 3.1. На рис.3.1 показаны поля исследуемых объектов с отмеченными на них опорными звездами.

Таблица 3.1: Общий журнал фотометрических наблюдений

Дата набл., ггммдд	Время набл., HJD 2400000+	Объект	Полоса наблюдений	Промежуток фаз орб. пер.	Экспозиция, сек x шт	Качество изобр., угл. сек.
100813	55422.310-.481	USNO0825	B, V, R_c	0.64-2.66	200x20	2.0
101006	55476.293-.384	USNO0825	R_c	0.72-1.80	200x29	2.0
101101	55502.193-.282	USNO0825	R_c	0.35-1.41	100-150x32	2.3
101102	55503.174-.226	USNO0825	R_c	0.96-1.59	200x34	2.0
120122	55949.191-.250	IPHAS0528	R_c	0.01-1.07	80x48	4.0
120124	55951.151-.232	IPHAS0528	R_c	0.26-1.72	60x80	3.5
120913	56184.547-.580	IPHAS0528	R_c	0.65-1.26	60x27	2.8
120919	56195.471-.530	IPHAS0528	R_c	0.22-1.29	90x42	1.8
121015	56216.476-.580	IPHAS0528	R_c	0.94-2.82	100x71	2.0
121018	56219.530-.598	IPHAS0528	R_c	0.89-2.11	90x45	2.4
121120	56252.294-.355	IPHAS0528	B, V, R_c	0.25-1.35	100,70,50x16	2.6
121212	56274.403-.570	IPHAS0528	R_c	0.94-3.94	60x74	1.9
121216	56278.247-.463	IPHAS0528	R_c	0.09-1.98	100x28	3.9
130207	56331.213-.338	IPHAS0528	B, V	0.84-2.09	120,80x33	2.3
131101	56598.469-.618	RXS0733	R_c	0.15-1.22	200x58	1.8
131102	56599.466-.616	RXS0733	R_c	0.30-1.37	200x53	1.5
131103	56600.457-.613	RXS0733	R_c	0.40-1.52	300x41	1.8
131104	56601.465-.531	RXS0733	R_c	0.63-1.11	300x18	3.6
131108	56605.472-.569	RXS0733	R_c	0.36-1.05	300x25	3.8
131111	56608.468-.573	RXS0733	R_c	0.83-1.53	300x28	1.7
141124	56986.126-.243	CSS130604	R_c	0.30-2.03	100x78	2.1
141125	56987.166-.269	CSS130604	R_c	0.76-2.30	100x64	3.3
141125	56987.449-.568	RXS0733	R_c	0.43-1.29	120x70	1.6
141126	56988.249-.294	CSS130604	R_c	0.86-1.54	200x17	2.6
150115	57038.314-.486	RXS0733	R_c	0.05-1.28	150x75	2.1
150116	57039.453-.603	RXS0733	R_c	0.21-1.28	150x70	3.7
150117	57040.196-.345	IPHAS0528	B, V, R_c	0.09-2.76	100,100,60x33	4.1
150118	57041.231-.338	IPHAS0528	B, V, R_c	0.70-2.63	100,100,60x25	1.9
150811	57246.290-.405	CSS130604	R_c	0.10-1.81	100x58	2.5
150812	57247.289-.361	CSS130604	R_c	0.95-2.02	150x32	2.8
150813	57248.203-.415	CSS130604	R_c	0.55-2.70	150x118	3.5
150814	57249.371-.481	CSS130604	R_c	0.03-1.55	100x49	3.7

Для исследования объектов была построена система вторичных стандартов. Привязка близлежащих звезд наблюдаемого поля проводилась к звездам со стандартных площадок из каталога Ландольта [83]. Она выполнялась при отличных погодных условиях и близких значениях зенитного расстояния. После первичной обработки изображений, вычитания электронного смещения(bias) и деления на плоское поле(flat), звездные величины объектов определялись методом дифференциальной апертурной фотометрии с использованием пакета DaoPhot,

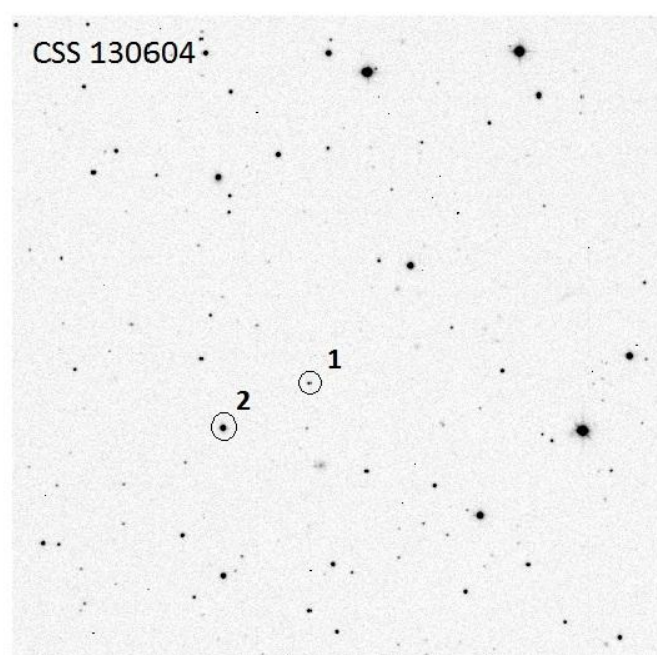
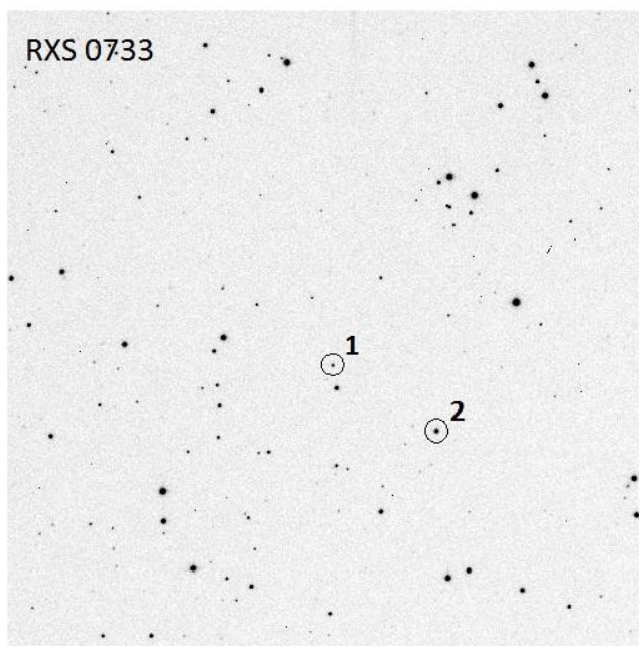
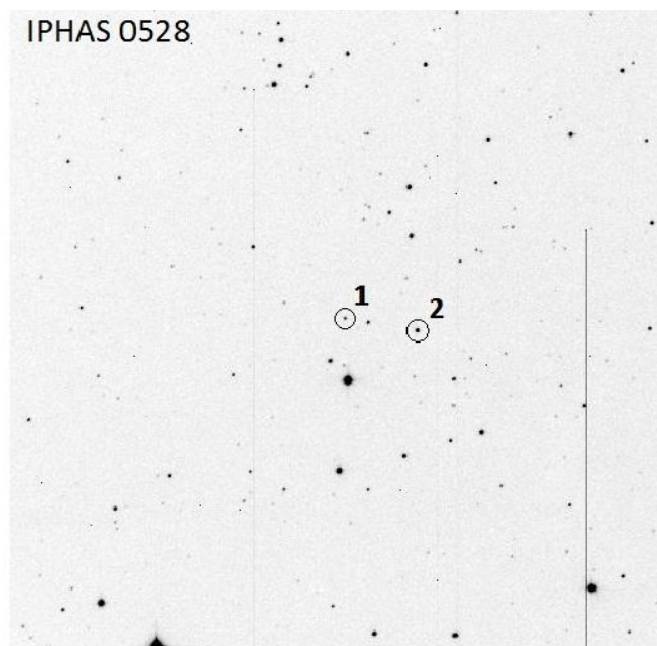
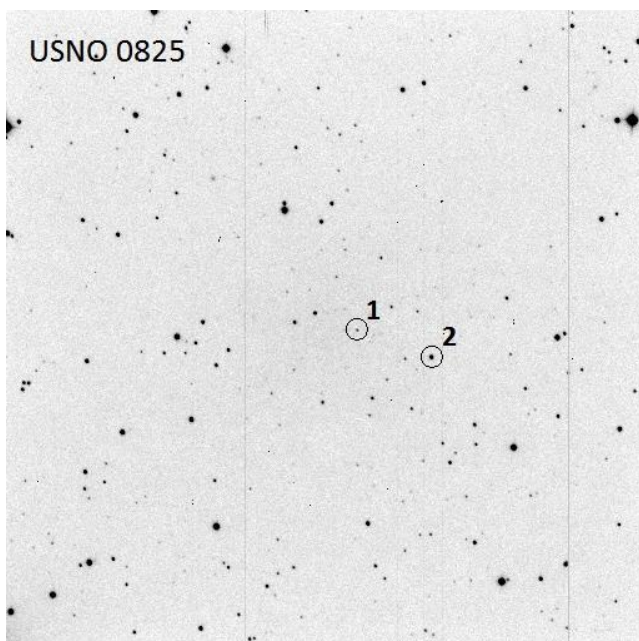


Рис. 3.1: Изображение площадок исследуемых объектов, полученные на телескопе Цейсс-1000 в полосе R_c . Цифрой 1 отмечен объект, 2 - опорная звезда. Масштаб изображений $6' \times 6'$, север-вверху, восток-влево.

реализованном в среде IDL³. Для объекта RXS0733 опорная звезда и ее блеск взят из работы [84]. Контроль ошибок проводился по всем доступным к измерениям звездам поля и строилась зависимость стандартного отклонения от звездной величины.

Обработка временных рядов выполнялась при помощи программы В.П. Горанского EFFECT. Для нахождения орбитального периода необходимо было подготовить массив значений юлианских дат и звездных величин. Юлианские даты рассчитывались на середину экспозиции с поправкой на барицентр солнечной системы. Использовался метод Лафлера-Кинмана, реализующий вычисление периодограммы минимизацией фазовой дисперсии [13]. Задаются максимальный и минимальный периоды интервала, в котором производится поиск, и максимальный сдвиг по фазе для определения шага по частоте (этот сдвиг по фазе обычно принимается равным или меньшим, чем 0.05 для пульсирующих переменных и равным или меньшим, чем 0.005 для затменных переменных звезд). В итоге работы программы строится график по оси ординат наносится параметр $1/\theta$, где θ - нормированная сумма квадратов отклонений каждой следующей точки от предыдущей на кривой блеска с пробным периодом и выдается таблица с максимальными значениями $1/\theta$, каждому из которых соответствует определенный период.

3.2 Исследованные объекты

3.2.1 USNO-A2.0 0825-8396733

Полученные фотометрические временные ряды были обработаны, был уточнен период системы:

$$HJD = 2455503.^d2584(\pm 0.001) + 0.^d08481(\pm 0.000002) \times E,$$

где нулевая фаза соответствует моменту минимума блеска.

³<http://www.ittvis.com/idl>

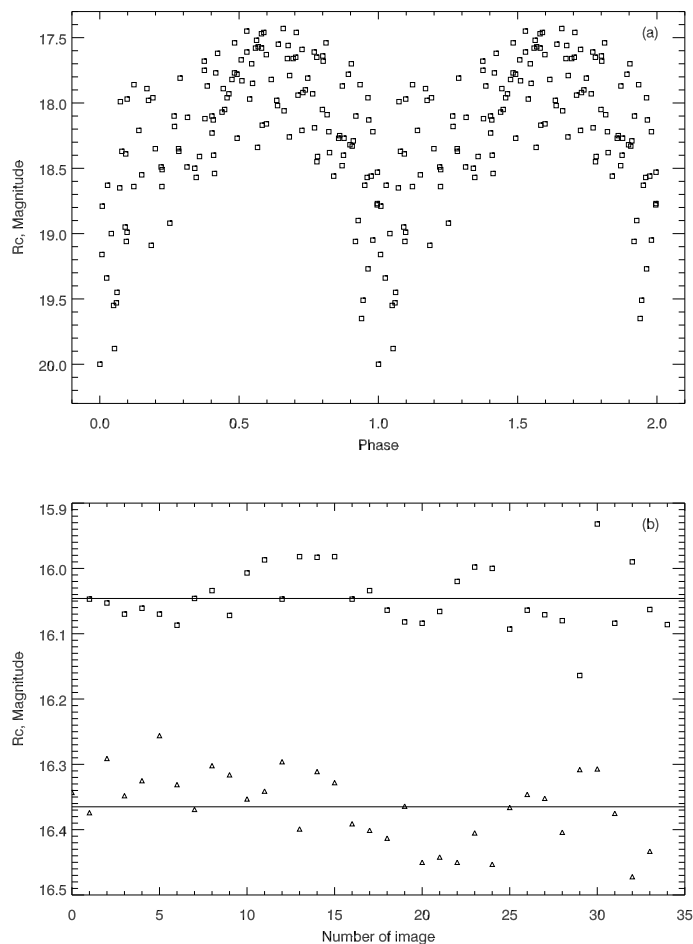


Рис. 3.2: Кривая блеска USNO0825 (a) и изменение блеска звезд сравнения относительно среднего значения(b) в фильтре R_c .

На рис.3.2(a) представлена кривая блеска объекта в фильтре R_c , свернутая с нашим периодом. Ошибки измерений варьировались от ночи к ночи, но не превышали 0.3^m . Они не показаны на рисунке. Для иллюстрации точности наблюдений на рис.3.2(b) приведены изменения блеска звезд сравнения, полученные 2011.11.02. Блеск системы достигает максимума в фазе $\varphi = 0.65$. Полная амплитуда блеска системы составляет 2.5^m . Отметим две особенности орбитального изменения блеска: сильное падение блеска в фазе ноль и большие колебания блеска до $\Delta m \sim 1^m$. Последнее указывает на большую нестационарность процесса аккреции. Из-за это тип затмения (полное или частное) определить не удастся.

Результаты многоцветных фотометрических наблюдений USNO0825 показаны на рис.3.3. Не показанные для улучшения наглядности рисунка ошибки измерений варьировались от $0.^m05$ в максимуме блеска до $0.^m1$ в минимуме блеска. Кроме того, с той же целью к значениям величин в фильтре

В прибавлена поправка $\Delta B = 0.^m75$. Измеренные амплитуды блеска системы: $\Delta R_c = 1.^m25$; $\Delta V = 1.^m40$; $\Delta B = 1.^m60$. Отметим, что амплитуда блеска в фильтре R_c оказывается меньше, чем в фильтрах V и B вследствие высокой скважности наблюдений. Трудно судить, какова будет полная амплитуда блеска в фильтрах V и B , так как для этого нужно проводить больше наблюдений. Средние звездные величины объекта в максимуме блеска составили $m = 17.^m60, 18.^m60, 18.^m80$ в фильтрах R_c, V, B соответственно. При совпадающей во всех полосах форме кривых блеска наблюдалось плавное увеличение блеска до фазы $\phi = 0.75$ с последующим его ослаблением на протяжении четверти периода. Аналогичная разность в продолжительности увеличения и уменьшения яркости обнаруживается на кривых блеска таких полярных звезд, как VV Рур и BL Hvi [85], EF Eri [86], V834 Cen [11] и объясняется протяженностью и сложной формой области излучения в одной из плоскостей. Избыток излучения систем в красном диапазоне не может быть обусловлен межзвездным поглощением, так как расстояние до них невелико [14]. Данный избыток можно объяснить вкладом циклотронных гармоник в видимый диапазон излучения, наличие которых косвенно подтверждается сильной круговой поляризацией излучения.

3.2.2 IPHAS J052832.69+283837.6

Фотометрические наблюдения IPHAS0528 показали, что система является короткопериодической. Результирующая эфемерида равнялась:

$$HJD = 2455951.^d192(\pm 0.001) + 0.^d055592(\pm 0.0000002) \times E,$$

где нулевая фаза соответствует моменту максимума блеска. Период системы составляет всего 80 минут, что находится на нижней границе периодов катаклизмических переменных.

Долговременная фотометрия показывает, что средний блеск системы меняется (рис.3.4). Блеск системы в полосе R_c за три года уменьшился на $\sim 0.6^m$. Сравнение кривых блеска 2012 и 2015 года в полосе R_c показано на рис.3.5. В 2012 г. при более высоком состоянии максимум блеска приходится на фазы $\varphi = 0.8 - 1.2$. Перед началом фазы максимума находится провал величиной $\sim 0.1^m$. На фазах $\varphi = 0.2 - 0.8$ блеск объекта не имеет сильных изменений.

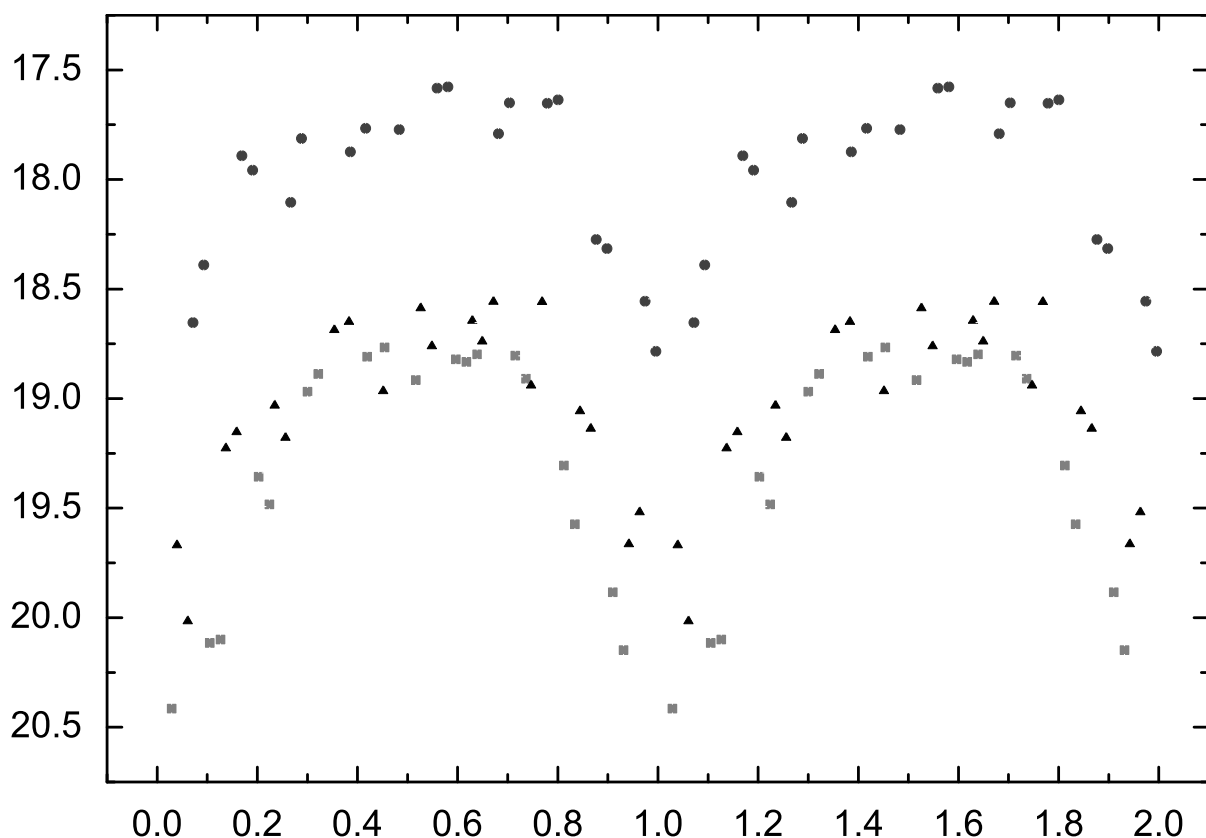


Рис. 3.3: Кривые блеска USNO0825 в фильтрах R_c - кружки, V - треугольники, B - квадраты. Ошибки не нарисованы, чтобы не загромождать рисунок, они изменялись в диапазоне от $0.^m05$ до $0.^m1$ в зависимости от звездной величины.

Орбитальная амплитуда переменности составляет $\sim 1^m$. В более низком состоянии кривая блеска имеет два максимума, главный в фазе $\varphi = 0$ и вторичный в фазе $\varphi = 0.6$. Увеличивается орбитальная амплитуда переменности блеска до $\sim 1.2^m$. Сравнение кривых блеска в полосах B, V, R показано на рис.3.4. Учитывая низкую скважность наблюдений, кривые блеска в трех полосах имеют схожую форму. Изменение среднего блеска системы, сопровождается изменением показателей цвета (таб.3.2). Наибольшее ослабление блеска происходит в красном диапазоне. При увеличении блеска системы с 17 на 18 января 2015 года, объект становится более голубым.

3.2.3 1RXS J073346.0+261933

Переменность объекта 1RXS J073346.0+261933 (далее RXS0733) была обнаружена Денисенко и др. [84] при выполнении отождествления в оптическом диапазоне объектов рентгеновского обзора, выполненного спутником ROSAT. Авторы

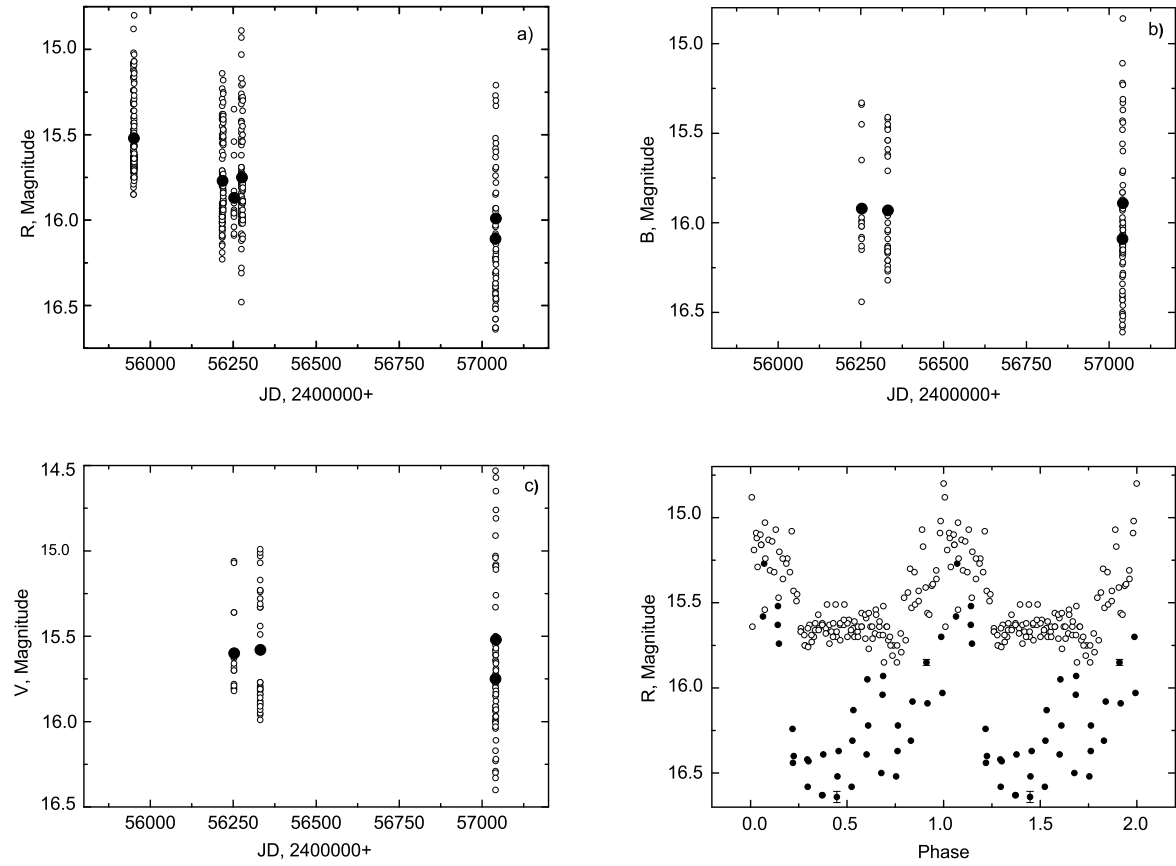


Рис. 3.4: Изменение блеска IPHAS0528 в зависимости от юлианской даты в фильтре B (a), V (b), R_c (c), заполненные кружки - среднее по периоду значение звездной величины. Кривые блеска в фильтре R_c , показаны два состояния - в 2012 и 2015 гг.(d)

Таблица 3.2: Средний блеск и показатели цвета IPHAS0528.

JD, 2400000+	V , magnitude	$V - R$	$B - V$
56252	15.59	-0.18	0.33
56331	15.57	-	0.36
57040	15.75	-0.35	0.33
57041	15.51	-0.47	0.37

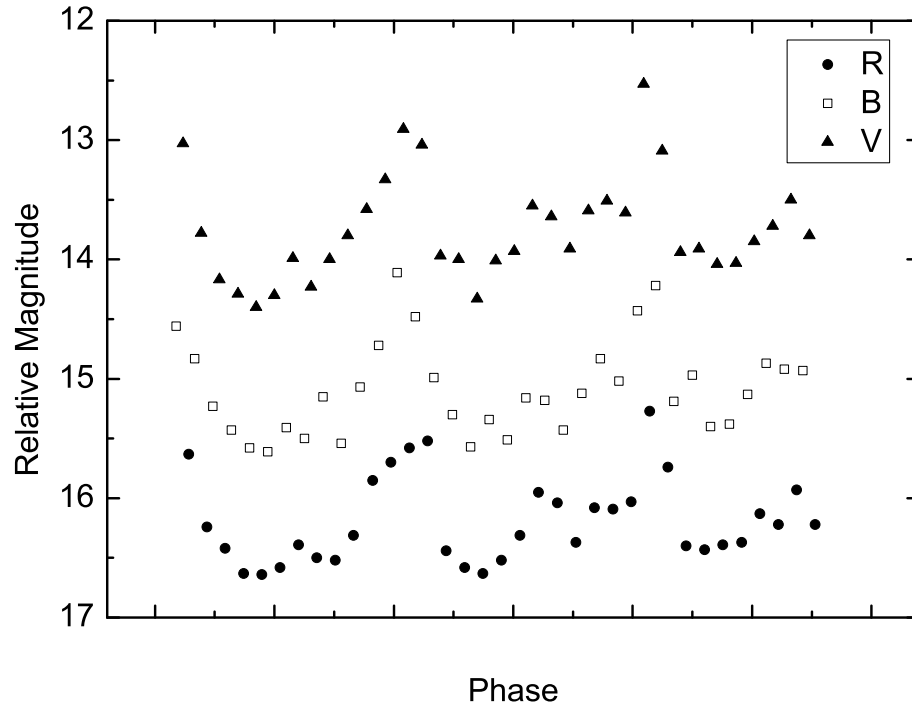


Рис. 3.5: Кривая блеска IPHAS0528 в трех фильтрах B , V , R_c в низком состоянии. К значениям в фильтре B прибавлены 1 звездная величина, в фильтре V - 2.

сообщают о значительной переменности объекта на большой шкале времени, необычных показателях цвета и высоком отношении интенсивности рентгеновского излучения к оптическому. Авторы определили два возможных орбитальных периода системы: $0.^d1334(1)$ и $0.^d1395(1)$. Полученный на телескопе РТТ-150 спектр RXS 0733 имел вид, характерный для катаклизмической переменной, а интенсивность линии $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$ была больше интенсивности линии $H\beta$. Авторы предположили, что данная система является поляр.

Представленные долговременные наблюдения позволили более точно определить период изменения блеска системы. Найденная эфемерида объекта:

$$HJD = 2457039.^d563(\pm 0.001) + 0.^d139095(\pm 0.0000002) \times E,$$

где нулевая фаза соответствует моменту максимума блеска.

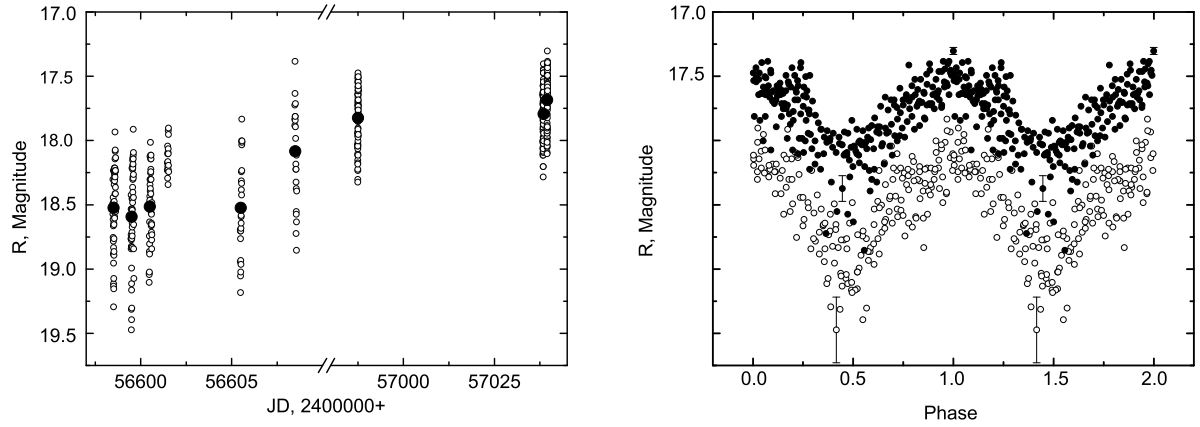


Рис. 3.6: Кривая блеска RXS0733 в фильтре R_c в зависимости от юлианской даты JD (слева), заполненными кружками показано среднее значение за период. Кривая блеска RXS0733 в фильтре R_c в зависимости от фазы (справа). Показаны два состояния - 2013 и 2015 гг.

Изменение среднего блеска RXS0733 в полосе R_c в зависимости от юлианской даты показано на рис.???. Блеск системы плавно увеличился на $\sim 0.75^m$ до средней звездной величины 17.7^m . Форма кривой блеска синусоидальная и сохраняет свою форму (рис.??). Амплитуда орбитальной переменности блеска составляет $\sim 1^m$. На кривой блеска имеется провал глубиной 0.2^m в фазе $\varphi = 0.1$. Отметим что на кривой блеска в работе [84] также наблюдается локальный разброс измерений вблизи максимума блеска. Разброс, видимо, связан с неточностью определения периода.

3.2.4 CSS 130604 215427+155714

Спектральные и фотометрические наблюдения этого объекта проведены Шкоди и др. [71]. Амплитуда переменности блеска объекта CSS130604 составила 1.5^m . Спектр объекта содержал сильную линию ионизованного гелия $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$, измеренная по ней полуамплитуда изменения лучевых скоростей достигала 300 км/сек. Орбитальный период равнялся $P_o = 96.9\text{мин}$.

Полученная по фотометрическим данным эфемерида равнялась:

$$HJD = 2456987.^d2578(\pm 0.0001) + 0.^d055592(\pm 0.000002), E,$$

где нулевая фаза соответствует моменту максимума блеска.

За период наблюдений не было зафиксировано изменений среднего блеска системы. Фазовая кривая блеска, свернутая с нашей эфемеридой, имеет синусоидальную форму. Амплитуда орбитальной переменности составляет $1.^m25$.

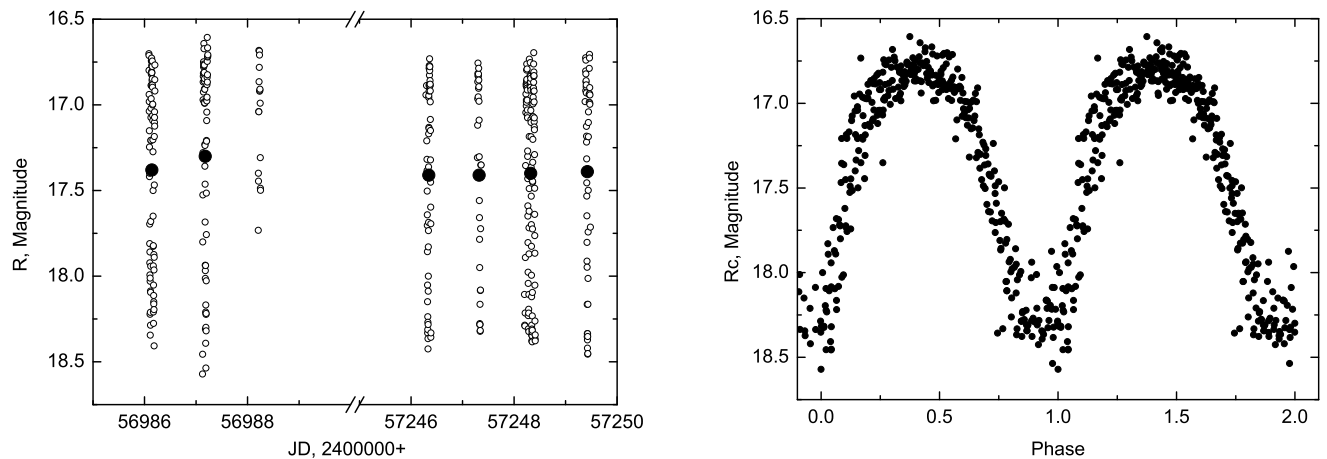


Рис. 3.7: Кривая блеска CSS130604 в фильтре R_c в зависимости от юлианской даты JD (слева), заполненными кружками показано среднее значение за период. Кривая блеска CSS130604 в фильтре R_c в зависимости от фазы (справа). Показаны два состояния - 2013 и 2015 гг.

Подводя итог данной главы отметим, что для выше перечисленных объектов были построены эфемериды. Все системы обладают сильной орбитальной переменностью блеска с амплитудой выше 1^m . Многоцветная фотометрия поляра USNO0825, показала, что кривые блеска в шкале орбитального периода имеют устойчивую и одинаковую форму в полосах B, V, R_c . Система имеет избыток в красном диапазоне $(V - R) = 1^m$, который не может быть обусловлен межзвездным поглощением, так как расстояние до известных катаклизмических переменных невелико [14]. Данный избыток можно объяснить вкладом циклотронных гармоник в видимый диапазон излучения, наличие которых косвенно подтверждается сильной круговой поляризацией излучения (см. Главу 1, Пункт 1.2.1). У RXS0733 и IPHAS0528 наблюдалась долговременная переменность блеска. Если первый объект не показал переменности форм и амплитуды кривых блеска с изменением среднего блеска системы. То у второго изменились не только формы кривых блеска, появился вторичный максимум и увеличилась амплитуда переменности, но и поменялся цвет системы. В 2015 г. с увеличением блеска объекта, показатель цвета $(B - R)$ уменьшился. Провалы, обнаруженные на кривых блеска RXS0733 и IPHAS0528, часто связаны с частичным самоза-

тмением аккреционной структуры и повсеместно встречаются в кривых блеска полярных звезд. Изменение блеска CSS130604 с орбитальным периодом происходит квазисинусоидально и не имеет выраженных особенностей. За полгода фотометрических наблюдений объект не наблюдался в другом состоянии блеска.

Глава 4

Спектральные исследования полярков

Спектральные наблюдения полярков дают наибольший объем информации о физических процессах происходящих в них. К настоящему времени методы анализа спектральных данных двойных систем с аккрецией хорошо развиты и, несмотря на слабость блеска исследуемых объектов, могут быть эффективно использованы для определения их базовых параметров и изучения областей формирования эмиссионных линий. Кроме того, эти методы хороши для изучения индивидуальных особенностей систем. В данной главе мы представляем результаты анализа спектральных данных полярков с использованием практически всех известных методик.

4.1 Наблюдения и обработка

Спектральные наблюдения проводились в первичном фокусе БТА с использованием редукторов SCORPIO [15] и SCORPIO-2 [16]. Оба прибора реализуют метод спектроскопии с длинной щелью умеренного разрешения. Во всех наблюдениях использовалась голографическая гризма Vh!G1200 (1200 штрихов/мм), центрированная на длину волны 540 нм и обеспечивающая спектральное разрешение $\Delta\lambda = 5.5\text{\AA}$. Так на приборах используются матрицы разного размера EEV42 – 40 (2048×2048) и EEV 42-90 (4600×2048), со спектральным диапазоном $\lambda = 3950\text{--}5700\text{\AA}$ и $\lambda = 3700\text{--}7300\text{\AA}$ на SCORPIO и SCORPIO-2, соответственно. Для калибровки изображений, в течение ночи снимаются изображения

электронного смещения (bias), кварцевой лампы (flat) для исправления неравномерной чувствительности матрицы, $He - Ne - Ar$ -лампы (neon) для перевода получаемых спектров в шкалу длин волн. В виде спектрофотометрического стандарта использовались звезды из каталога [87]. Обработка наблюдений происходила по стандартным методикам в среде IDL¹.

Более подробную информацию вы можете найти на сайтах, посвященных данным приборам². Детали наблюдений исследованных объектов будут приведены в разделах ниже.

4.2 USNO-A2.0 0825-8396733

Спектральные наблюдения USNO0825 выполнены на телескопе БТА САО РАН с применением редуктора светосилы первичного фокуса SCORPIO. Наблюдения проводились 3 августа 2010 года при хороших погодных условиях с размером звездных изображений $d = 1.2''$. Продолжительность наблюдений 2.5 часа позволила охватить 1.25 орбитального периода системы. Всего было получено 26 спектров с экспозициями по 300 секунд. Результирующее отношение сигнал/шум в континууме для полученных спектров в разные фазы периода варьируется в пределах $S/N = 11 - 30$. Для выполнения последующих калибровок длин волн и регистрируемых потоков USNO0825 одновременно с ним наблюдались спектрофотометрический стандарт $BD + 33^d 02642$ и спектр $Ar-Ne-He$ -лампы.

4.2.1 Результаты спектроскопических наблюдений

В спектрах USNO0825 наблюдался красный континуум с наложенными на него эмиссионными бальмеровскими линиями водорода ($H I$), нейтрального ($He I$) и ионизованного ($He II$) гелия, бленды $C III - N III$, однократно ионизованными магнием ($Mg II$), железом ($Fe II$) и углеродом ($C II$). Спектр объекта с отождествленными линиями показан на рис. 4.1. Линии водорода серии Бальмера H_β , H_γ , H_δ и линия $He II \lambda 4686 \text{\AA}$ наиболее интенсивны. Вариации относительных интенсивностей линий H_β и $He II \lambda 4686 \text{\AA}$ показаны на рис. 4.2, а изменение

¹<http://www.ittvis.com/idl>

²<http://www.sao.ru/hq/lon/SCORPIO/scorpio.html>, <http://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/index.html>

их эквивалентных ширин и отношение $W(\lambda)_{HeII}/W(\lambda)_{H\beta}$ на протяжении 1.25 периода - на рис. 4.3.

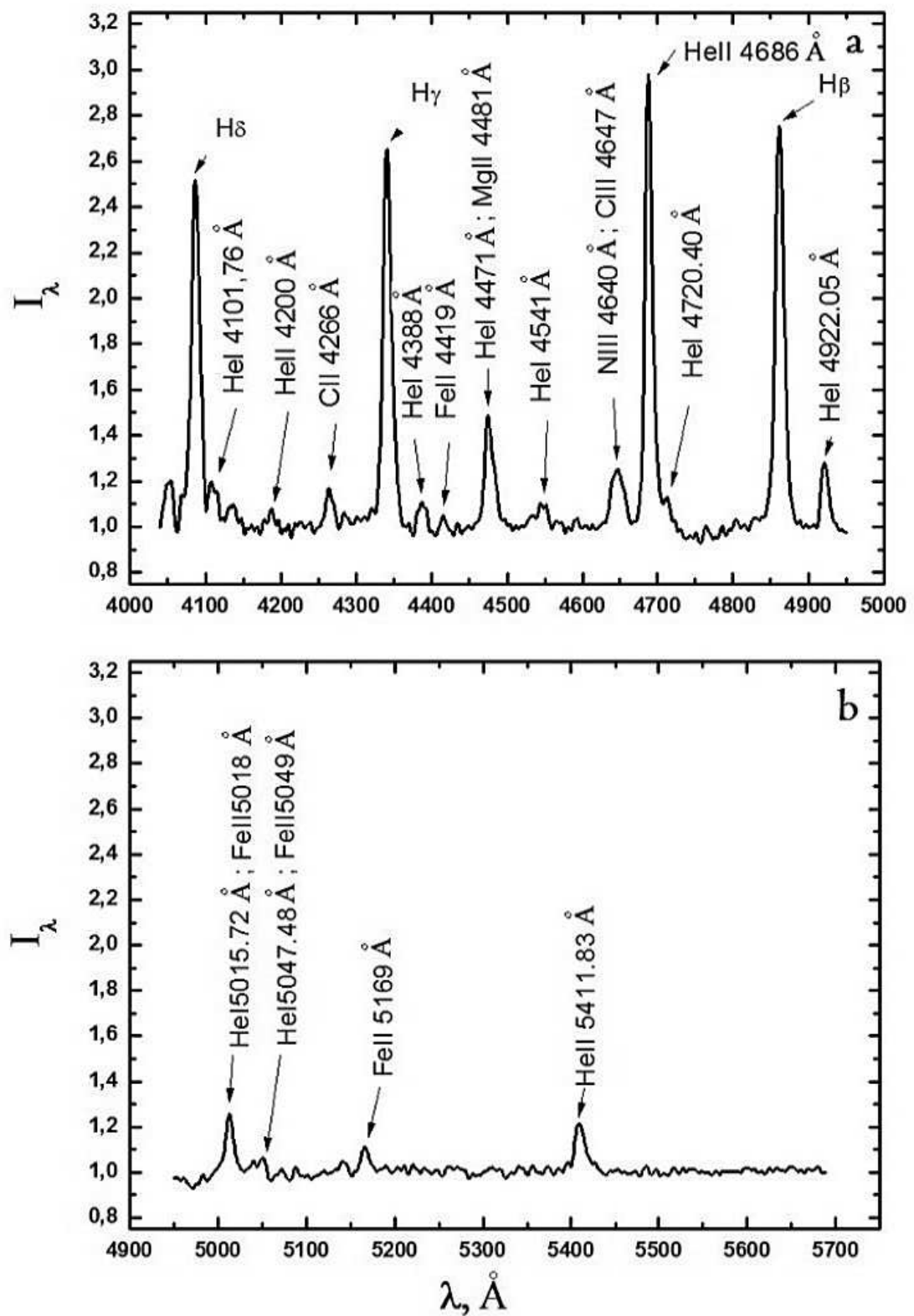


Рис. 4.1: Усредненный спектр USNO0825 с отождествленными линиями. Диапазон $\lambda = 4050-4950 \text{ \AA}$ (a), диапазон $\lambda = 4950-5700 \text{ \AA}$ (b)

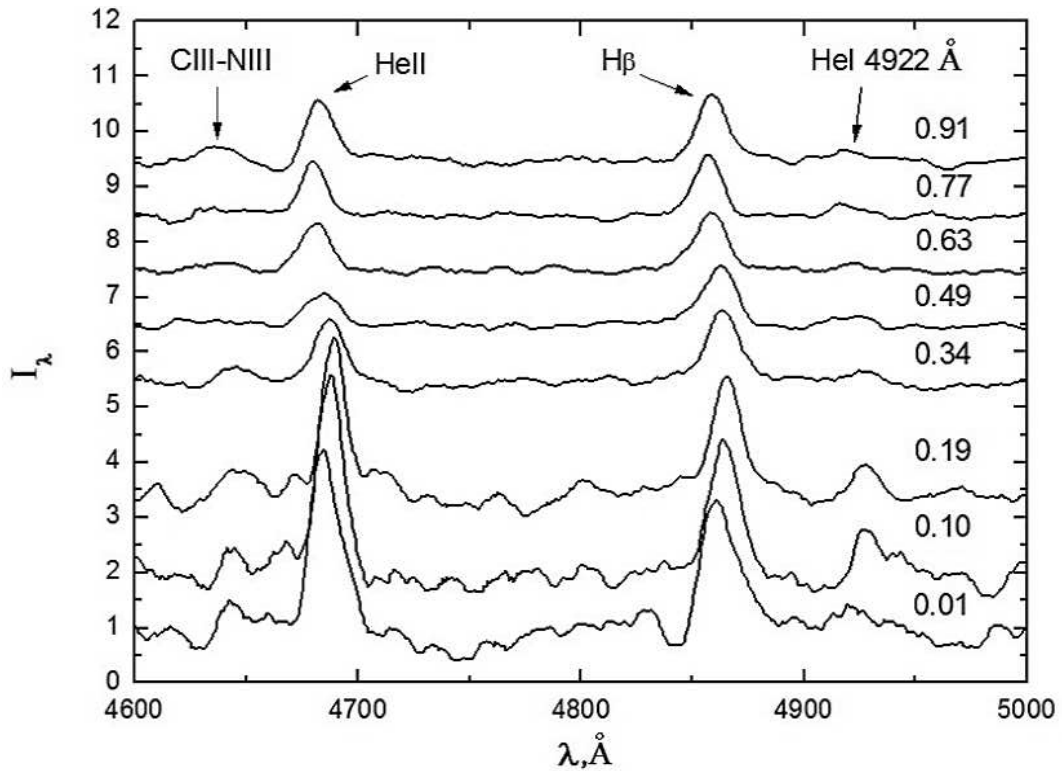


Рис. 4.2: Орбитальное изменение профилей эмиссионных линий. Указаны фазы орбитального периода.

Как видно на рис. 2.4, 2.6 и 2.7, профили и интенсивности линий сильно изменяются в зависимости от фазы. Изменения профилей линий HI , HeI , $HeII$ носят схожий характер, доказывающий близость областей их формирования. Они сводятся к попеременному усилению синего (на $\phi \sim 0.0$) или красного (на $\phi \sim 0.5$) крыла линии. В результате можно сделать вывод о том, что в структуре линии имеются 2 компоненты: стабильная, относительно широкая ($\Delta V_r = \pm 500 - 550$ км/сек), и подвижная узкая ($\Delta V_r = \pm 250 - 300$ км/сек). Полуширина обеих компонент оказывается заметно выше полуширины аппаратной функции спектрографа, т.е. она связана с реальными движениями газа. Отметим, что отношение интенсивностей сильного и слабого крыла любой линии в фазе $\phi \sim 0.0$ к фазе $\phi \sim 0.5$ составляет около 3, что говорит об отношении интенсивностей широкой и узкой компонент линии примерно как 1:2. В предположение, что широкая компонента линии формируется в аккреционной колонне вблизи поверхности белого карлика, а узкая компонента - на поверхности холодной звезды и в окрестности точки Лагранжа L1 под действием рентгеновского облучения со стороны аккретора. В этом случае наблюдаемые доплеровские

сдвиги узкой компоненты соответствуют (или близки) орбитальному движению холодной звезды и могут быть использованы для определения динамических характеристик USNO0825.

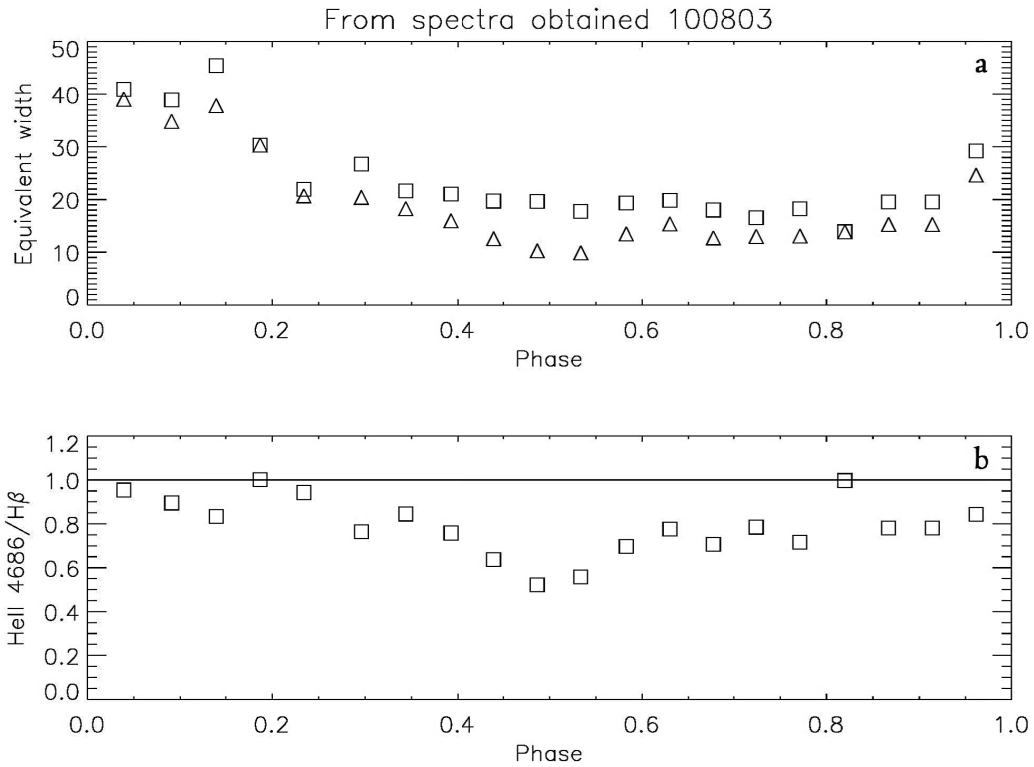


Рис. 4.3: Орбитальное изменение линий H_β - квадраты и $HIII \lambda 4686\text{\AA}$ - треугольники (a) и отношение эквивалентных ширин $W(\lambda)_{HeII}/W(\lambda)_{H\beta}$ (b).

Эквивалентные ширины всех линий изменяются в противофазе с вариациями блеска системы, т.е. при $\phi = 0.0$ (фаза затмения) эквивалентные ширины максимальны, а при $\phi = 0.75$ - минимальны. Этот факт говорит о значимом различии областей формирования эмиссионных линий и непрерывного спектра. Изменение эквивалентных ширин линий происходит синхронно и без выраженных скачков. Отношение $W(\lambda)_{HeII}/W(\lambda)_{H\beta}$ в фазах $\phi = 0.0 - 0.25$ близко к единице, а в фазах $\phi = 1.0 - 1.25$ - больше единицы, что является характерной особенностью полярных.

В спектрах USNO0825 на фазах $\phi \sim 0.0$, соответствующих затмению, с сильным падением блеска, появляются абсорбции в диапазоне длин волн $\lambda = 4900 - 5500\text{\AA}$. Так как в данных фазах белый карлик закрыт холодным

компонентом, абсорбции не могут возникнуть вследствие эффекта зеемановского расщепления линий. В связи с этим было проведено сравнение спектров USNO0825 с теоретическими спектрами М-карликов солнечной металличности с температурами $T_{eff} = 3500 - 4500\text{K}$ и $\log g = 4.5$. Корреляции абсорбционных деталей не было обнаружено, что указывает на незначительность вклада (менее 3%) вторичного компонента в полное излучение системы.

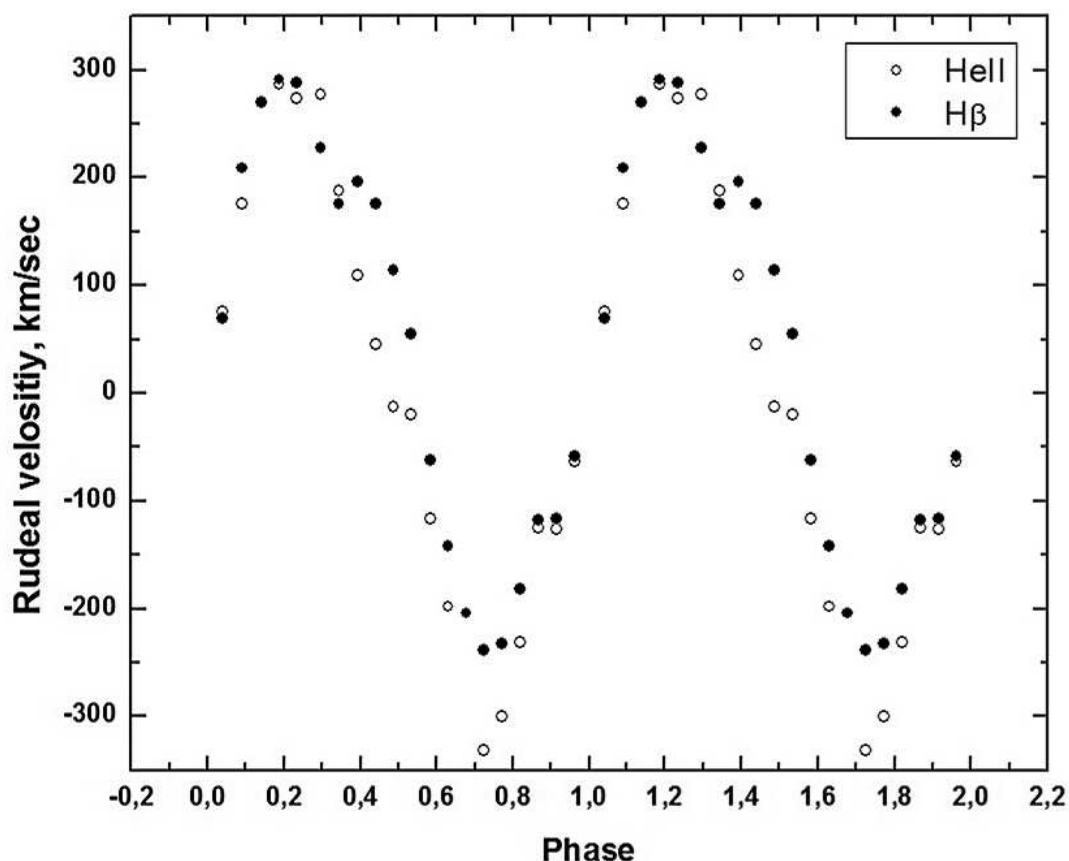


Рис. 4.4: Кривые лучевых скоростей USNO0825, построенные по линиям H_{β} - заполненные кружки и $HII\ 4686\text{\AA}$ - полые кружки.

Лучевые скорости, представленные на рис. 4.4 в шкале фаз орбитального периода, измерены методом однополосной кросс-корреляции спектров по линиям H_{β} и $HII\ 4686\text{\AA}$. Отметим, что метод кросс-корреляции определяет лучевые скорости путем совмещения пиков линий. Для исключения влияния широкой компоненты линии на расположение пика (т.е. на вычисление V_r), она была вычтена из всех наблюдаемых профилей. Форма широкой компоненты определена нами по наименьшим для всех фаз значениям интенсивностей на каждой

длине волны. Полученные в итоге кривые лучевых скоростей для обеих линий имеют схожую форму, близкую к синусоиде. Этот факт косвенно подтверждает сделанное выше предположение об области формирования эмиссионных линий рядом с поверхностью вторичного компонента и указывает на близость к нулю эксцентриситета орбиты USNO0825. Амплитуда лучевых скоростей составила $K_2 = 371 \pm 14$ км/сек для линии водорода H_β и $K_2 = 395 \pm 15$ км/сек для $HIII \lambda 4686\text{\AA}$.

4.2.2 Определение параметров системы

Предполагая, что область излучения эмиссионных линий связана со вторичным компонентом, мы определили функцию масс главного компонента на уровне $f(M_1)=0.46-0.54M_\odot$, в зависимости от выбранной амплитуды лучевых скоростей. Используя полуэмпирические зависимости, представленные в работах Хоувелла и др. [88] и Книгге [89], нами было наложено ограничение на массу красного карлика $M_2 = 0.18 - 0.20M_\odot$. Для определения массы белого карлика M_1 необходимо знать угол наклона орбиты i . Очевидно, что он не может быть меньше значения $i = 56^\circ$, при котором масса главной компоненты достигает предела Чандрасекара. Падение блеска системы в центре затмения составляет $\Delta m = 2.^m5$, т.е. затмевается большая часть области излучения. При этом ослабление блеска в коротковолновой части спектров в четыре раза превышает соответствующее ослабление в красном диапазоне длин волн. Поэтому сделано предположение о частичном затмении красным компонентом белого карлика и внутренних частей аккреционной колонны. Используя это предположение и радиус вторичного компонента, полученный из полуэмпирических зависимостей работы Книгге [89], а также соотношение радиуса полости Роша и большой полуоси двойной системы из работы Плавца [90], был получен угол наклона орбиты $i = 76^\circ$, при котором происходит пересечение лимбов компонент. На рис. 4.5 приведены зависимости массы белого карлика от угла наклона орбиты для трех значений масс красного карлика. Как будет показано ниже, для оценки массы белого карлика лучше использовать полуамплитуду лучевых скоростей линии H_β . В результате, для диапазона углов от $i = 76^\circ$ до $i = 85^\circ$, при массах красного карлика от $M_2 = 0.18M_\odot$ до $M_2 = 0.20M_\odot$, масса белого карлика лежит в диапазоне от $M_1 = 0.71 - 0.78M_\odot$.

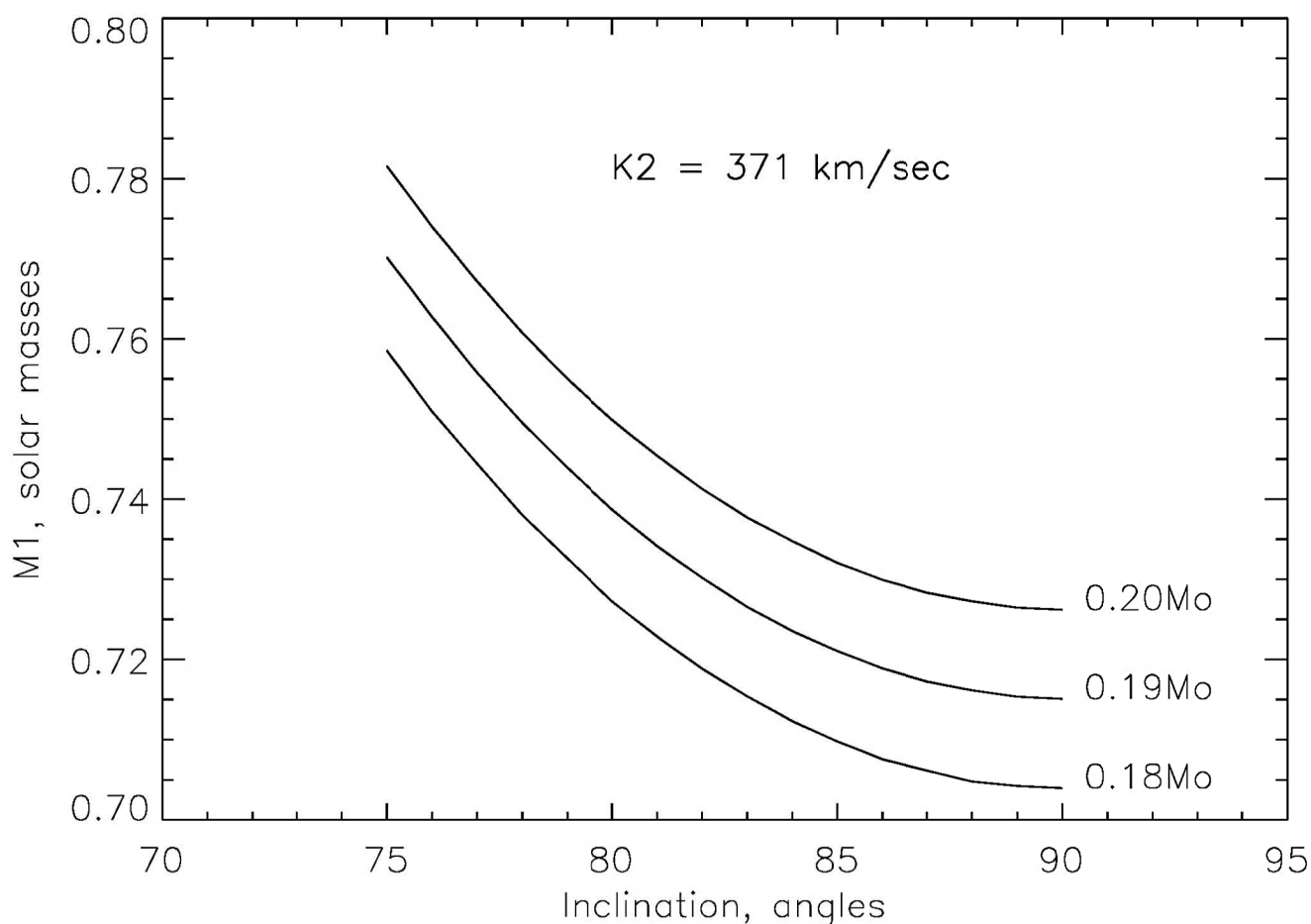


Рис. 4.5: Зависимость массы белого карлика от угла наклона орбиты.

4.2.3 Доплеровские карты

Доплеровское картирование системы по линиям H_{β} и $HII \lambda 4686\text{\AA}$ (см. рис. 4.6) было выполнено с помощью программы *Dopmap* [10]. На картах, помимо областей излучения, изображены положения полости Роша вторичной компоненты, центра масс, белого карлика, внутренней точки Лагранжа и аккрецирующей колонны в плоскости скоростей. Ось X направлена от белого карлика к красному, ось Y совпадает с направлением движения красного карлика.

На обеих картах четко видно, что в системе USNO0825 нет дисковой аккреции, что в очередной раз подтверждает магнитную природу данного объекта. На доплеровской карте, построенной по линии H_{β} , четко просматривается область излучения локализованная на поверхности вторичного компонента, которая формируется под действием эффектов отражения. Области излучения с бо-

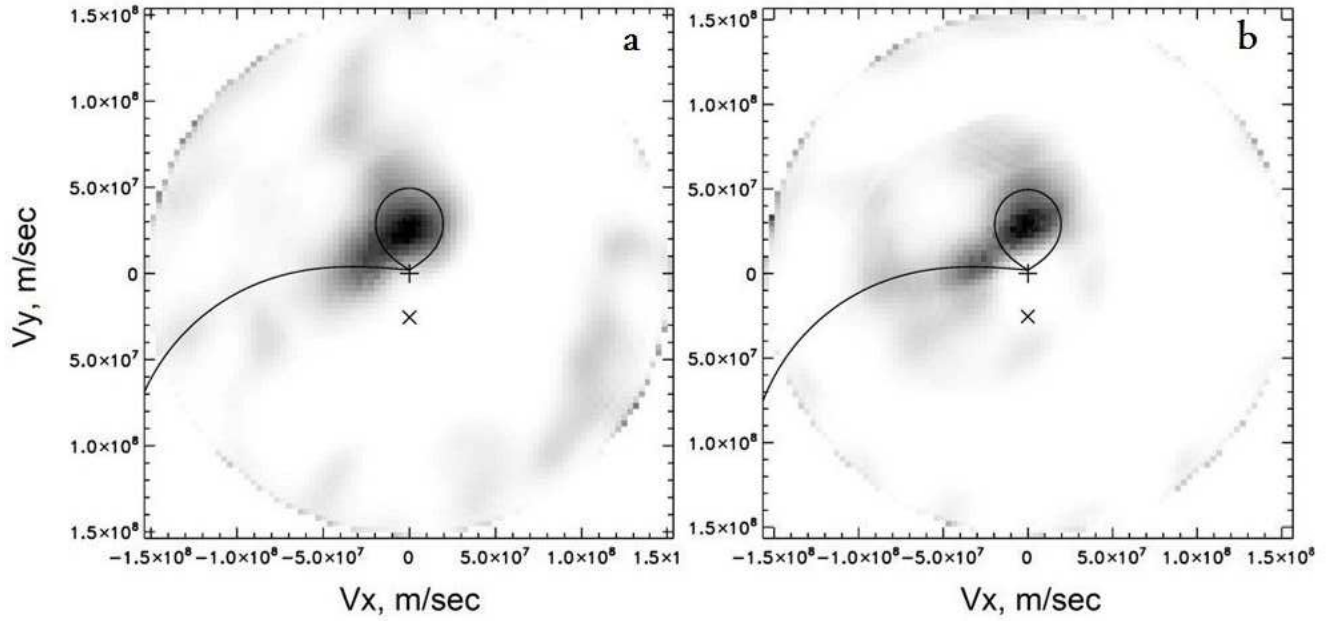


Рис. 4.6: Доплеровские карты **USNO-A2.0 0825-18396733**, построенные по линиям H_β (a) и линии $HIII\ 4686\text{\AA}$ (b).

лее высокими скоростями принадлежат остаткам стабильной части излучения, которую мы вычли, а так же аккрецирующей колонне. На доплеровской карте, построенной по линии $HIII\ 4686\text{\AA}$, мы также видим область излучения на вторичном компоненте и менее интенсивную, но с большими скоростями, область излучения в аккрецирующей колонне, которая находится ближе к белому карлику. Характерно, что линии H_β под действием эффекта отражения формируются в основном на вторичном компоненте, а линии $HIII\ 4686\text{\AA}$, как более горячие, и на холодной звезде, и в аккрецирующей колонне. Таким образом, для оценки скорости вторичного компонента лучше брать данные по линиям H_β .

4.3 BS Tri

Яркий рентгеновский источник RX J0209.4+2832 (BS Tri) был обнаружен Швопе и др. [91] и в последствие добавлен в каталог катаклизмических перемен-

ных [92]. Первые оптические наблюдения BS Tri выполнены на 2.16-м телескопе Пекинской астрономической обсерватории [93]. В полученном с экспозицией 3000 сек. единичном спектре были обнаружены сильные эмиссионные линии водорода серии Бальмера и нейтрального гелия, а так же линия ионизованного гелия $HeII\ \lambda 4686\ \text{\AA}$. Несмотря на наличие данной линии, объект не был отождествлен как магнитная катаклизмическая переменная. Последующие фотометрические наблюдения [94–96] показали, что система является короткопериодической переменной с орбитальным периодом $P_{orb} = 0.^d06685$ (96.26 мин.) и имеет глубокие затмения порядка 4.5^m звездных величин и продолжительностью около 6 мин. В работе [94] вид кривой блеска объяснен изменениями геометрии аккреционного диска, и только в работе [95] впервые сказано о магнитной природе объекта.

Осенью 2011 года объект BS Tri наблюдали на телескопе БТА с прибором SCORPIO-2 в режиме спектральных наблюдений с длинной щелью шириной $w_{slit}=1''$. Было получено 18 спектров с равными экспозициями в 300 секунд, покрывающих 1.2 периода системы. Обнаружив раздвоение пиков эмиссионных линий, были запланированы следующие наблюдения, которые состоялись в августе 2012 года. В этот раз использовалась щель $w_{slit}=0.5$ что позволило получить спектры с итоговым разрешением $\Delta\lambda = 2.6\ \text{\AA}$. При хороших погодных условиях с размером звездных изображений $d=1.2''$ было накоплено 31 спектральное изображение с одинаковой длиной экспозиций в 300 секунд. Наблюдения продолжались в течение 3 часов, которые покрыли неполных два орбитальных периода системы.

Представленные фотометрические наблюдения выполнены на Южной станции МГУ 26.09.2011. Использовался телескоп Цейсс-600 с ПЗС-камерой AP-47p; чип охлаждался до температуры $-26\ C^o$. Наблюдения проводились в полосе V с экспозициями 120 сек. Для последующей обработки были получены снимки плоского поля, темнового тока и электронного минимума. Оценка блеска системы в ночи наблюдений проводилась по кадрам отождествления в полосе V , полученными на БТА с использованием прибора SCORPIO-2. Привязка осуществлялась к опорным звездам из работы [96].

4.3.1 Результаты спектроскопических наблюдений

Наблюдаемые спектры BS Tri содержат плоский континуум с наложенными на него сильными эмиссионными линиями Бальмеровской серии водорода $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$, нейтрального HeI $\lambda 4026, 4388, 4471, 4921, 5015, 5876, 6678, 7065$ Å и ионизованного $HeII$ $\lambda 4541, 4686, 5411$ Å гелия, ионизованного железа $FeII$ $\lambda 5169$ Å и боуэновской блендой $CIII - NIII$ $\lambda 4640 - 4650$ Å (рис.4.7а). Сравнивая с водородными, высокая интенсивность линии $HeII$ $\lambda 4686$ Å обычно характерна для систем с канализированной аккрецией, что косвенно указывает на принадлежность BS Tri к классу полярных. Интенсивности и профили всех линий существенно меняются в зависимости от фазы орбитального периода.

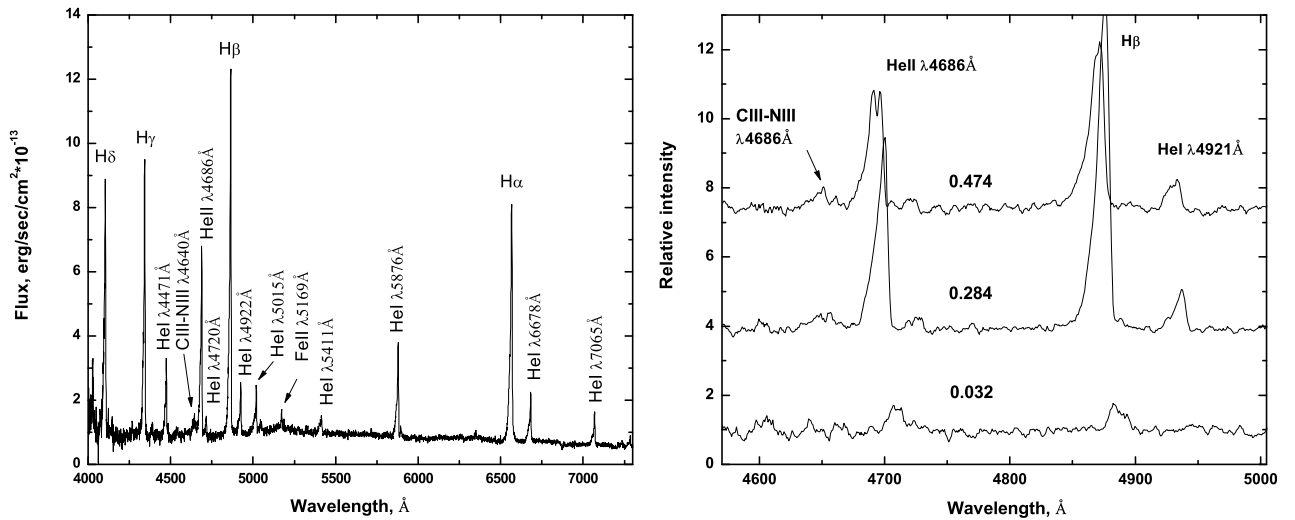


Рис. 4.7: Спектр BS Tri в фазе максимума блеска с отождествленными линиями (слева). Три состояния профилей линий снизу вверх: профиль со смещением в красную сторону, с однопиковым профилем и двухпиковым профилем (справа).

Орбитальный период системы был переопределен по фотометрическим наблюдениям 2005-2012 гг. московскими коллегами.

$$HJD = 2453666.^d542(\pm 0.002) + 0.^d0668810424(\pm 0.0000000002) \times E,$$

где нулевая фаза соответствует моменту центра затмения.

На рисунках 4.8 и 4.9 показаны изменения профилей линий H_α , H_β , $HeII\ 4686\ \text{\AA}$, $HeI\ 5876\ \text{\AA}$ с фазой орбитального периода ϕ для спектров 2011 и 2012 гг. соответственно. Очевидно, что каждая линия проходит через три основных состояния: с однопиковым профилем, двухпиковым профилем и профилем со смещением в красную сторону (рис.4.7b)). Последний наблюдается в фазе близкой к нулю и сопровождается заметным ослаблением интенсивности линий. В диапазоне фаз $\phi = 0.6 - 1.2$ все линии имеют однопиковые профили с широкой подложкой до $\Delta V_r = 700$ км/сек, а их доплеровские смещения изменяются наиболее быстро. В фазах $\phi = 0.2 - 0.6$ линии разделяются на две компоненты с достаточно медленным изменением доплеровских смещений.

Сравнение интенсивностей линий в спектрах 2011 и 2012 гг. показало, что произошло изменение их характеристик. Линия $HeII\ 4686\ \text{\AA}$ стала более интенсивной (рис.4.10a), а интенсивность линии H_β практически не изменилась (рис.4.11). Данный эффект может объясняться переменностью блеска при увеличении темпа аккреции, что привело к повышению температуры горячего пятна на поверхности белого карлика и более эффективной ионизации гелия. Однако, оценка, сделанная по кадрам отождествления объекта, полученным в те же ночи, показала что блеск системы не изменился (рис.4.12). Все точки фотометрических наблюдений лежат на плато в диапазоне фаз $\phi = 0.35 - 0.48$ и не отличаются от среднего значения блеска. Дальнейший анализ выявил различие интенсивностей других эмиссионных линий в спектрах 2011 и 2012 гг. В частности изменился бальмеровский декремент, линия H_α стала значительно слабее (рис.4.11), а H_γ осталась на прежнем уровне. Линии нейтрального гелия в длинноволновой части спектра также ослабли, на некоторых фазах полностью пропадая (рис.4.10b,c,d).

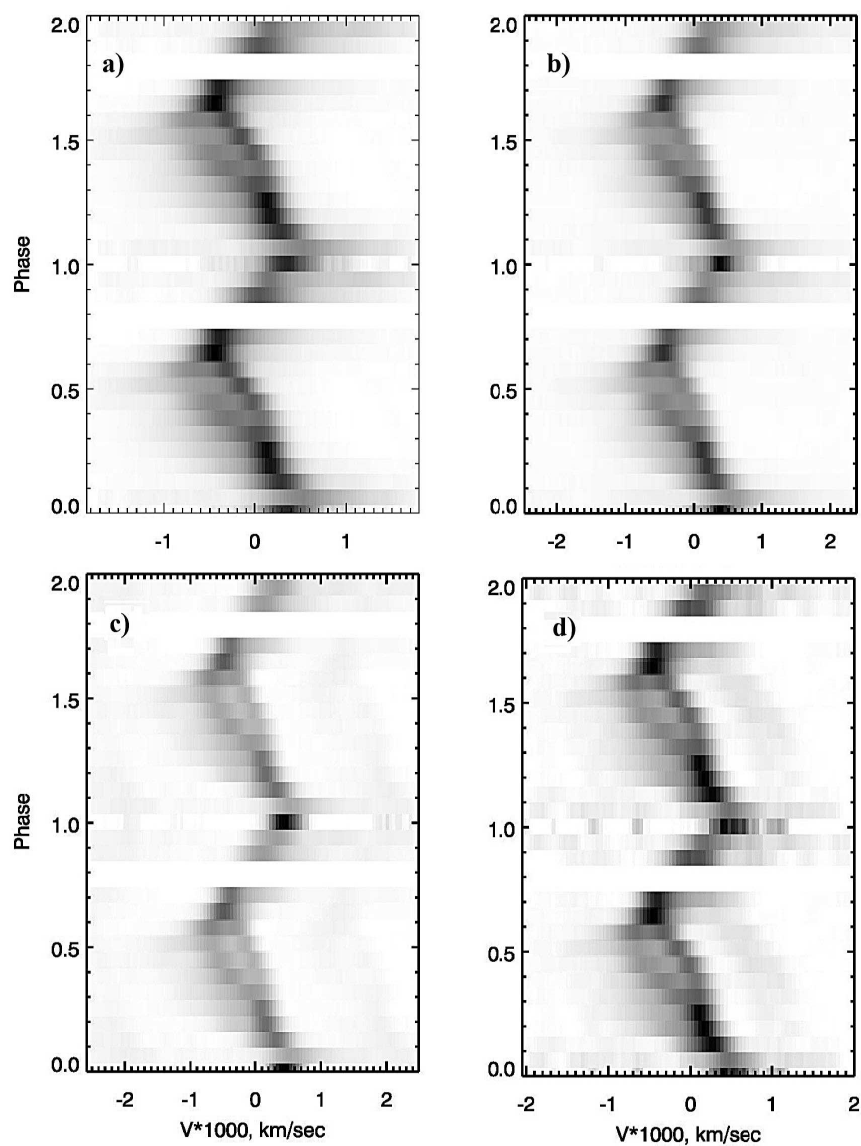


Рис. 4.8: Изменение профилей линий H_{α} (a), H_{β} (b), $HeII$ $\lambda 4686$ Å (c), HeI $\lambda 5876$ Å (d) на протяжении периода в спектрах 2011 года.

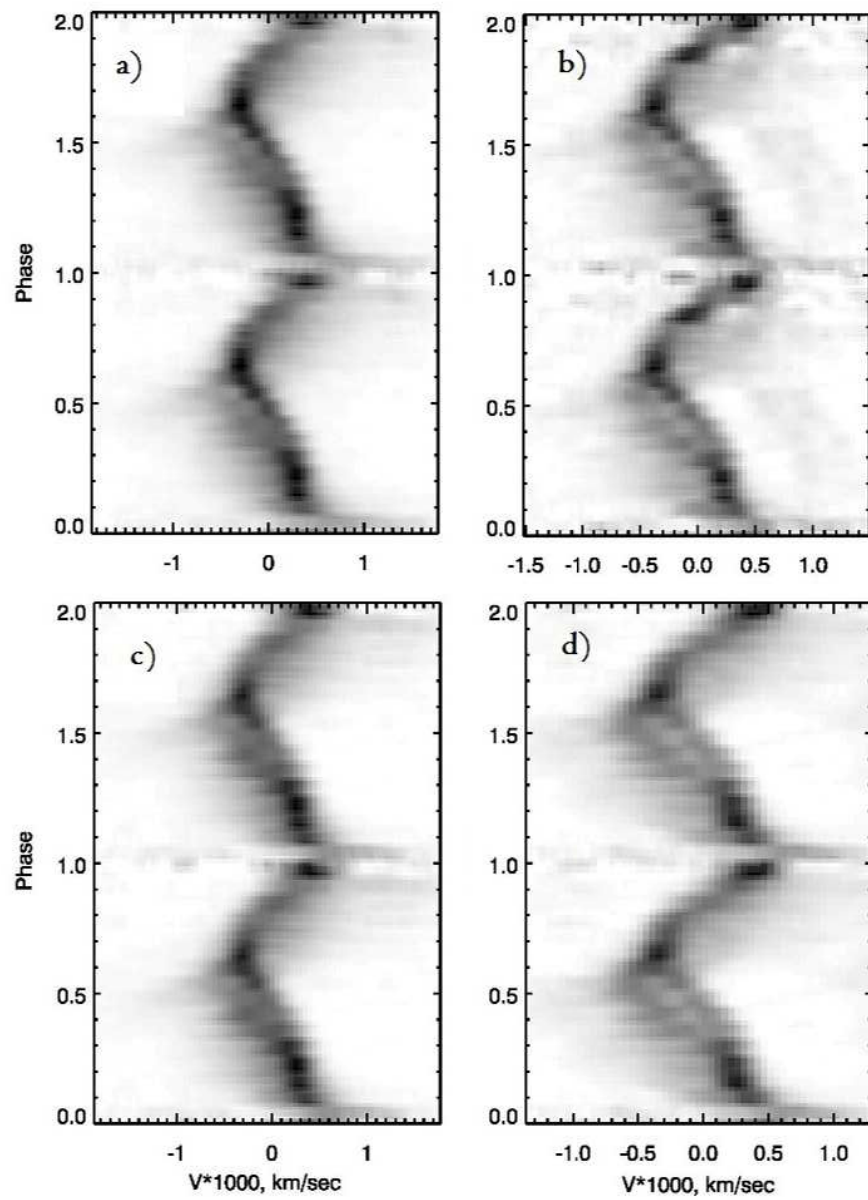


Рис. 4.9: Изменение профилей линий H_{α} (a), H_{β} (b), $HeII$ $\lambda 4686$ Å (c), HeI $\lambda 5876$ Å (d) на протяжении периода в спектрах 2012 года.

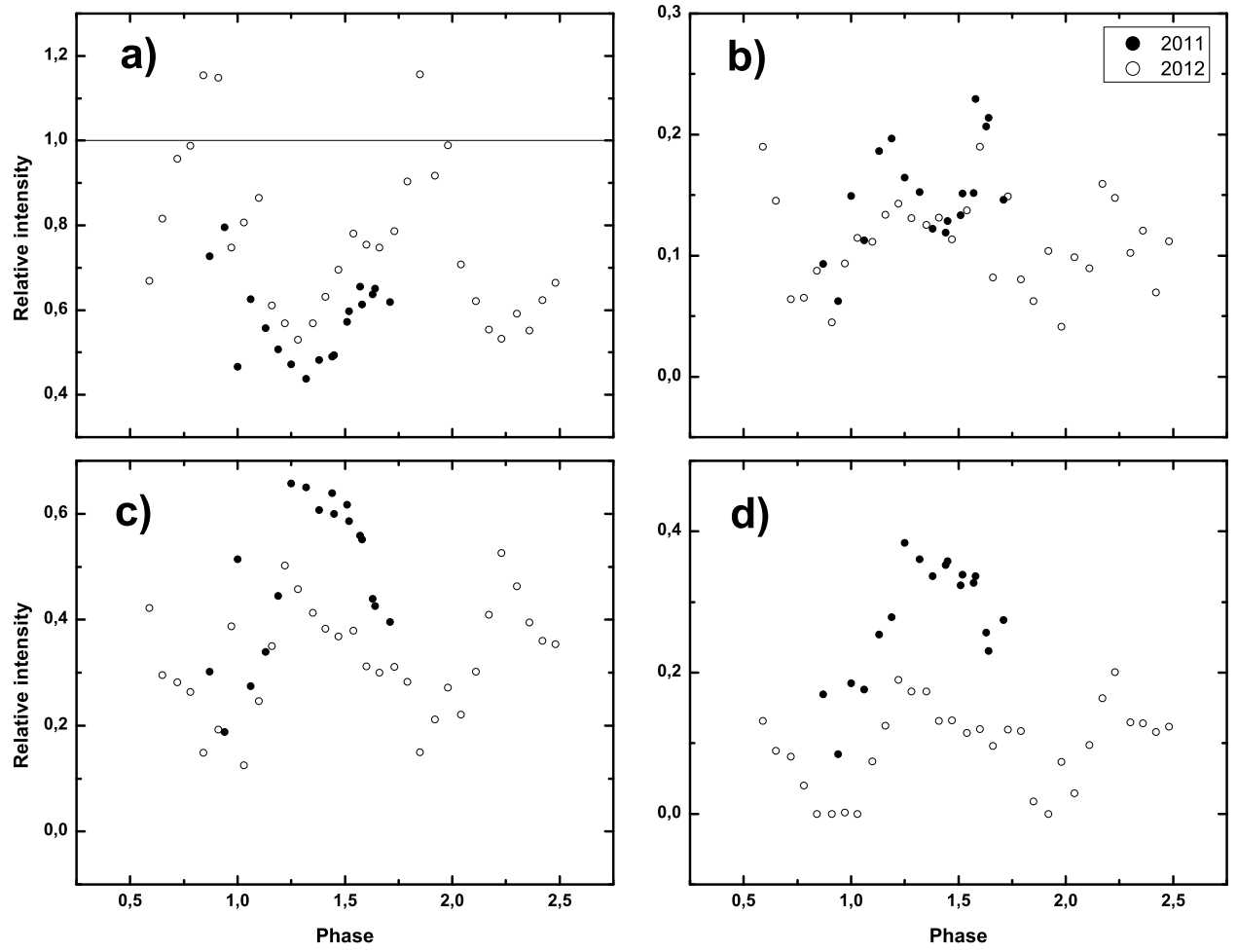


Рис. 4.10: Отношение эквивалентных ширин линий $HeII \lambda 4686 \text{ \AA} / H_{\beta}$ (a), $HeI \lambda 4921 \text{ \AA} / HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$ (b), $HeI \lambda 5876 \text{ \AA} / HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$ (c), $HeI \lambda 6678 \text{ \AA} / HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$ (d) в зависимости от фазы.

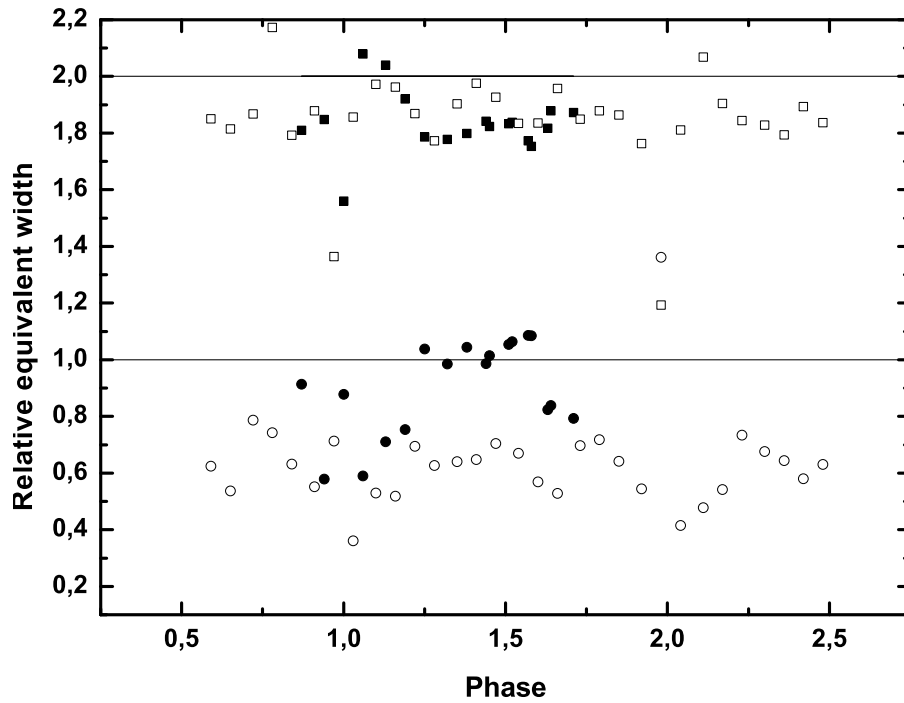
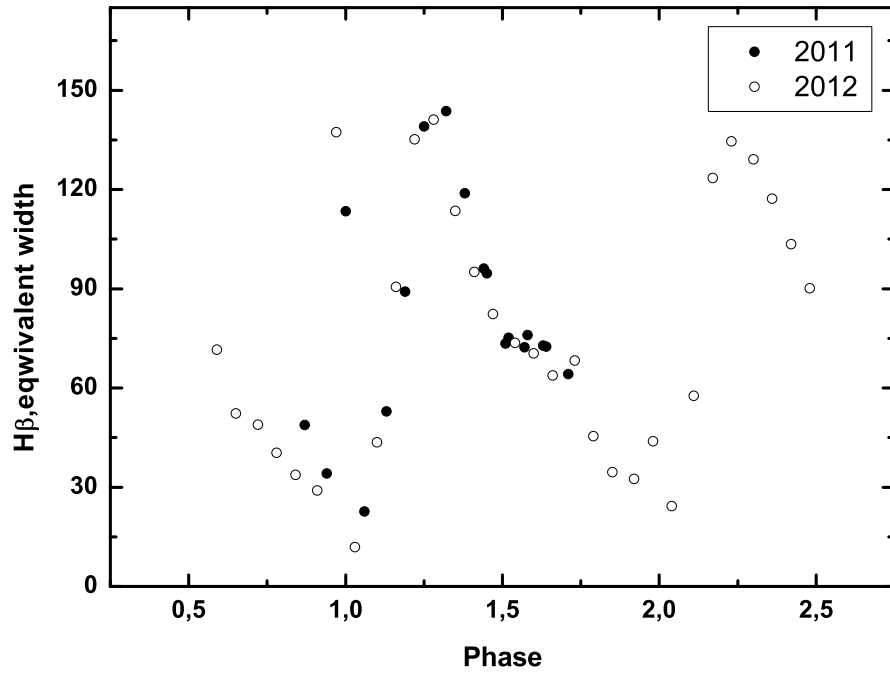


Рис. 4.11: Изменение эквивалентной ширины линии H_{β} в зависимости от фазы (вверху). Бальмеровский декремент в зависимости от фазы. H_{α} - кружки, H_{γ} - квадраты. К значениям для линии H_{γ} прибавлена 1. Заполненные значки данные 2011 года, полые - 2012 года.(внизу)

На рис. 4.13 показаны кривые лучевых скоростей четырех эмиссионных линий H_α , H_β , $HeII\ \lambda 4686\ \text{\AA}$, $HeI\ \lambda 5876\ \text{\AA}$ измеренных методом кросс-корреляции по однопиковому профилю в спектрах 2011 года. Кривые имеют схожие синусоидальные формы, амплитуда для всех линий различается не существенно и равняется ~ 450 км/сек. Кривые лучевых скоростей 2012 года по тем же линиям имеют схожие формы, но меньшую амплитуду. Более подробный разбор особенностей кривой лучевых скоростей на примере линии $HeII\ \lambda 4686\ \text{\AA}$ по данным за 2012 год, мы приводим ниже.

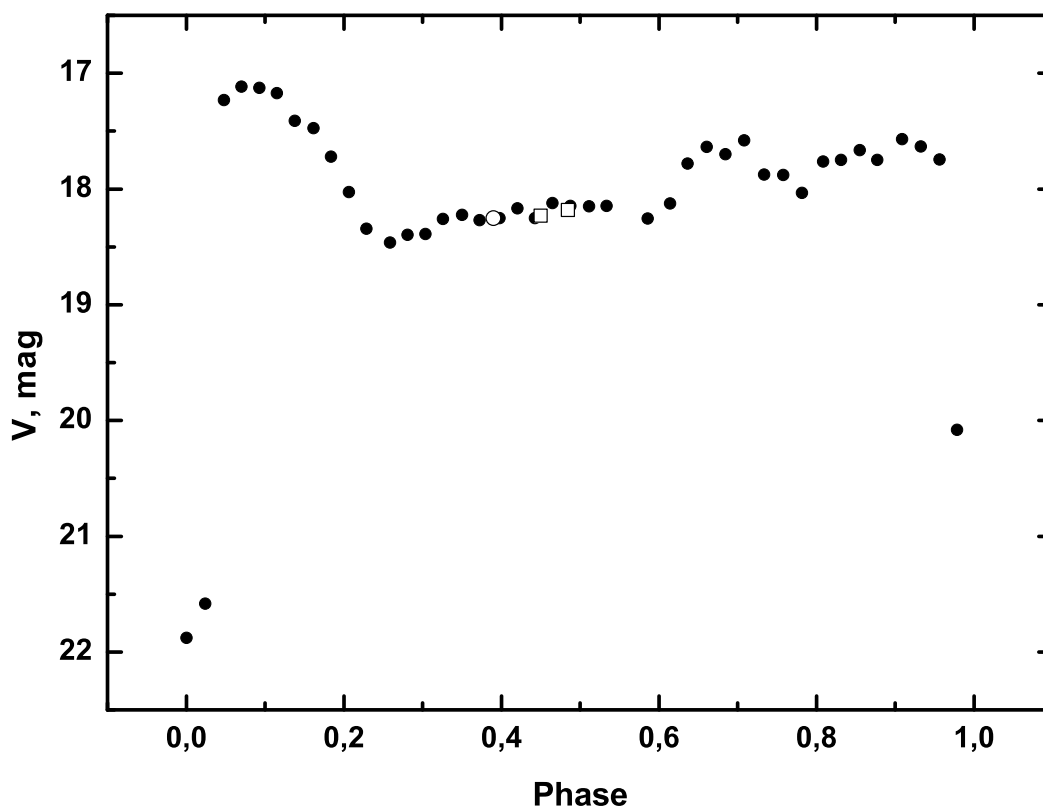


Рис. 4.12: Кривая блеска в полосе V , полученная 26.09.2011 (заполненные кружки). Полые кружки - оценка блеска в момент спектральных наблюдений 21.09.2011, полые квадраты - 26.08.2012.

На рис. 4.14 показаны значения лучевых скоростей, измеренных методом кросс-корреляции по однопиковому профилю линии $HeII\ \lambda 4686\ \text{\AA}$ (кружки), красной (треугольники) и синей (квадраты) компонентам двухпикового профиля в фазах раздвоения линий и аппроксимация синусоидой значений, полученных

для фаз $\phi = 0.6 - 1.2$ и $\phi = 1.6 - 2.2$ (сплошная линия). Выбор линии $HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$ обусловлен наиболее четким и продолжительным разделением ее профиля на две компоненты, а также возможным присутствием в линиях водорода блендирующих линий $HeII$.

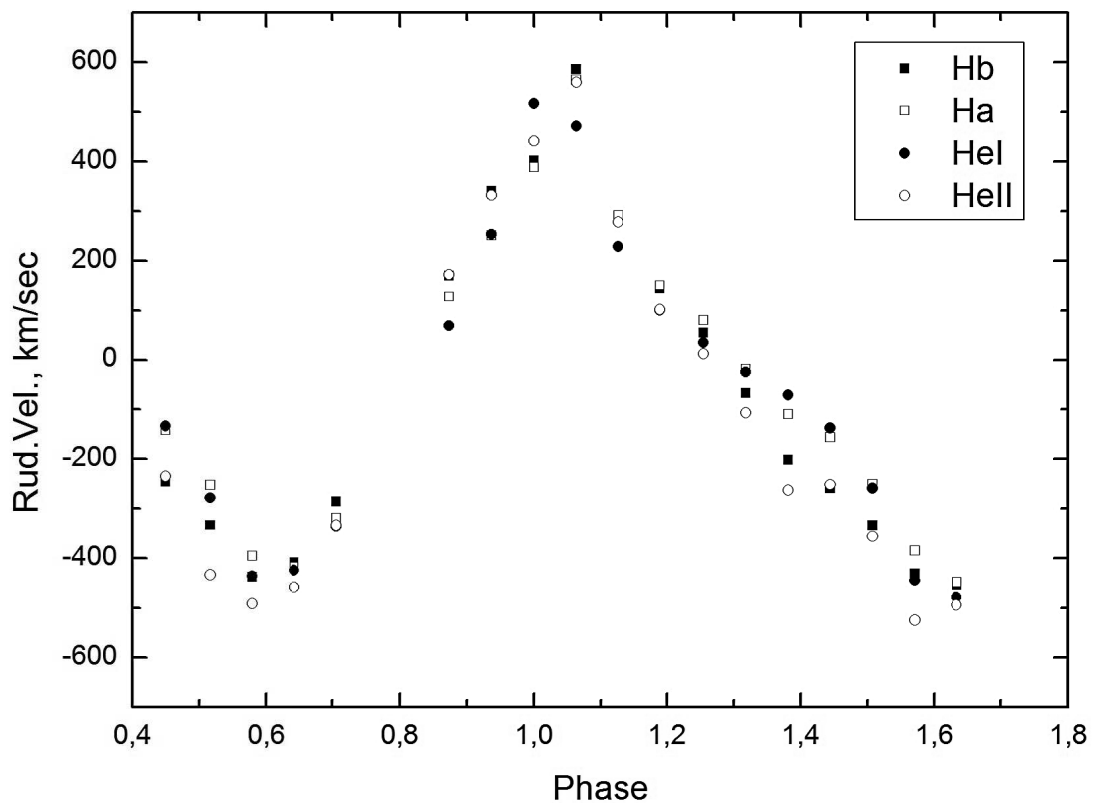


Рис. 4.13: Кривые лучевых скоростей эмиссионных линий H_α , H_β , $HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$, $HeI \lambda 5876 \text{ \AA}$ по спектрам 2011 года.

Основной областью излучения в полярах является аккреционная структура, в которой формируется непрерывный спектр и однопиковая компонента линий с широкой подложкой, наблюдаемая на фазах $\phi = 0.6 - 1.2$. Лучевые скорости в газе, движущемся в струе, определяются мгновенной проекцией оси магнитного поля белого карлика на луч зрения. Синхронизация вращения белого карлика в поляре с его орбитальным движением приводит к синусоидальным изменениям лучевых скоростей, что хорошо демонстрирует рис. 4.13 и 4.14. Отметим, что достижение кривой лучевых скоростей максимальных значений

вблизи фазы $\phi = 0$ указывает на ориентацию струи аккрецируемого вещества от вторичного компонента к белому карлику, т.е. направление оси его магнитного поля в значительной степени совпадает с направлением большой полуоси системы. Геометрия BS Tri такова, что при затмении струи аккрецируемого вещества на фазах близких к $\phi = 0$, остается видимой ее небольшая часть вблизи поверхности белого карлика. Вещество, падающее в этой области на белый карлик обладает наибольшей скоростью, что проявляется в виде скачка на кривой лучевых скоростей (см. рис. 4.9 и рис. 4.14).

Начиная с фазы $\phi = 1.2$ заметный вклад в оптический спектр системы начинает вносить часть поверхности вторичного компонента, разогреваемая рентгеновским излучением горячего пятна. Формирующееся в атмосфере красного карлика инверсное распределение температуры приводит к появлению в его спектре эмиссионных линий, которые складываются с линиями струи аккрецируемого вещества. В результате кривая лучевых скоростей, определенных по суперпозиции излучений двух областей, начинает отклоняться от синусоиды в сторону больших значений. В диапазоне фаз $\phi = 0.3 - 0.6$ разделение компонент линий становится наиболее существенным и допускает раздельное измерение лучевых скоростей излучающих областей, представленных нами на рис. 4.14 (треугольники и квадраты). На рисунке видно, что лучевые скорости, полученные по синей компоненте, хорошо ложатся на аппроксимацию синусоидой лучевых скоростей линий сформированных в струе аккрецируемого вещества, за исключением значения на фазе $\phi = 0.5$. Отклонение данной точки также объясняется частичным затмением струи аккрецируемого вещества, но только белым карликом. Величина отклонения не настолько большая как на фазе $\phi = 0$, так как область наибольшей скорости движения газа остается за лимбом белого карлика. Оптимальные условия наблюдений красной компоненты линий достигаются в фазах $\phi = 0.3 - 0.5$, когда облучаемая поверхность холодной звезды повернута к наблюдателю, а ее лучевая скорость максимально отлична от скорости струи аккрецируемого вещества. Таким образом лучевые скорости, измеренные по красной компоненте, соответствуют движению холодной звезды и могут быть использованы для определения параметров системы (см. ниже).

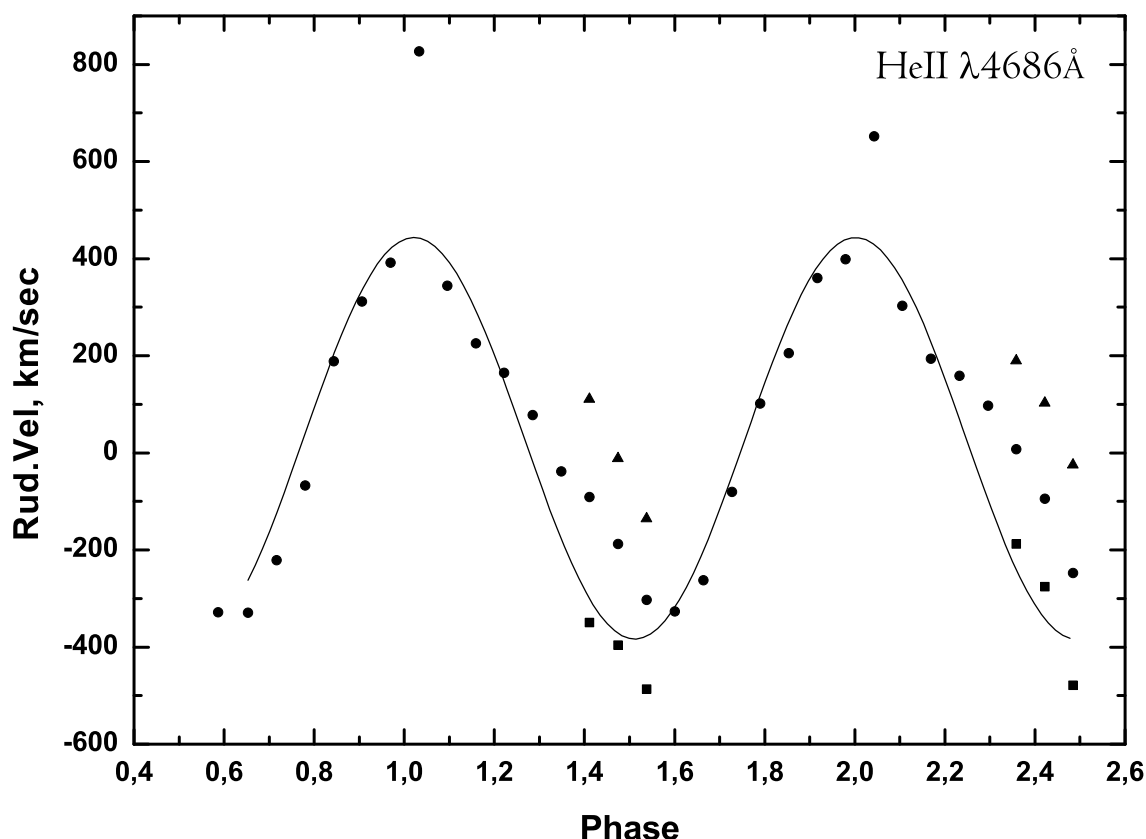


Рис. 4.14: Кривая лучевых скоростей линии $HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$ (кружки), лучевые скорости красной компоненты (треугольники), лучевые скорости синей компоненты (квадраты), аппроксимация синусоидой (сплошная линия). Пояснение см. в тексте.

4.3.2 Оценка параметров системы

Как отмечено выше, линия $HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$ допускает наиболее аккуратное измерение лучевых скоростей красной и синей компонент. Поэтому мы использовали ее для определения лучевых скоростей горячего пятна на поверхности красного карлика (красная компонента линии), формируемого под действием эффектов отражения. Поскольку они охватывают небольшую часть орбитального периода системы, их аппроксимация даже в рамках модели круговой орбиты допускает большие неопределенности. Поэтому мы провели данную аппроксимацию со значениями гамма-скорости и момента нулевой фазы, предварительно установленных из анализа кривой лучевых скоростей синей компоненты линии для полного орбитального периода. Найденная в результате полуамплитуда лучевой скорости горячего пятна составила $K_h = 364 \pm 10 \text{ км/сек}$.

Абубекеров и др. [97] показали, что в системах с эффектами отражения лучевые скорости горячего пятна на поверхности звезды K_h и ее центра масс K_2 отличаются вследствие ее вращения. Оценку поправки скорости ΔK_2 , обусловленной вращением, мы определили из теоретических спектров BS Tri, рассчитанных программным комплексом SPECTR [98] для итогового набора ее параметров (см. ниже) с учетом эффектов отражения и несферичности компонент. При расчете теоретических спектров использовались отклонения от ЛТР для HI , HeI , $HeII$, предварительно вычисленные комплексом NONLTE [99] для набора моделей атмосфер на поверхности красного карлика. Учитывая синхронное вращение красного компонента по модельным спектрам методом кросс-корреляции рассчитывались лучевые скорости эмиссионных линий. В результате поправка лучевой скорости оказалась равна $\Delta K_2 = 54$ км/сек, а скорость центра масс вторичной компоненты - $K_2 = 418 \pm 10$ км/сек. Соответствующая ей функция масс главного компонента с учетом известного орбитального периода составила $f(M_1) = 0.51 \pm 0.03 M_\odot$.

Наличие глубокого затмения указывает близость угла наклона i орбиты BS Tri к 90° , что позволяет без потери точности считать $\sin(i) = 1$. Тогда, задавая массу главного компонента M_1 , по известной функции масс можно вычислить отношение масс $q = M_1/M_2$, массу вторичной компоненты M_2 и большую полуось орбиты A . Зная отношение масс и большую полуось, с применением формулы, предложенной Игглтоном [100], можно определить радиус полости Роша вторичного компонента R_{L2}

$$R_L = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})}, \quad 0 < q < \infty.$$

Найденный радиус мы сравнивали с физическим радиусом красного карлика R_2 , получаемым по эволюционным трекам маломассивных звезд Главной Последовательности [101] для вычисленной массы M_2 . Результаты расчетов для набора значений M_1 представлены в таб. 4.1. Предполагая, что радиус полости Роша заключен в диапазоне значений $1.05R_2 < R_{L2} < 1.09R_2$, можно получить оценку массы белого карлика $M_1 = 0.75 \pm 0.02 M_\odot$. Соответствующая ей масса вторичного компонента равна $M_2 = 0.16 \pm 0.02 M_\odot$, а ее радиус $R_2 = 0.18 \pm 0.02 R_\odot$. Для сравнения мы приводим массу красного карлика найденного по полуэмперическим зависимостям $M_2 = 0.10 - 0.11 M_\odot$ [89]. Что значительно меньше значения найденного напрямую из наблюдений.

Таблица 4.1: Параметры компонент системы BS Trі для заданного значения масс M_1 при функции масс $f(M_1) = 0.51$

$M_1/M_\odot$	q	$M_2/M_\odot$	$R_{L2}/R_\odot$	$R_2/R_\odot$	R_{L2}/R_2
0.73	0.200	0.146	0.185	0.193	1.125
0.74	0.208	0.154	0.188	0.172	1.090
0.75	0.216	0.162	0.190	0.180	1.057
0.76	0.224	0.171	0.193	0.188	1.025

4.3.3 Доплеровские карты

Для анализа структуры аккреционных потоков и излучающих областей в BS Trі мы построили набор ее доплеровских карт с использованием четырех линий: H_α , H_β , $HeII$ $\lambda 4686$ Å, HeI $\lambda 5876$ Å (см. рис. 4.15 и 4.16). Очевидно, что у BS Trі выделяются две области излучения всех эмиссионных линий: первая расположена на поверхности вторичного компонента и имеет скорость $V_x \sim 300$ км/сек, а вторая связана со струей аккрецируемого вещества, переносящей его с красного на белый карлик. Четкая ориентация этой области вдоль теоретического направления струи аккрецируемого вещества, вероятно, указывает на сильное магнитное поле белого карлика и параллельность его с большой полуосью системы. Аналогичный вывод можно сделать из факта полного отсутствия во всех картах BS Trі даже слабой структуры аккреционного диска или газовой оболочки. Таким образом, доплеровские карты подтверждают сделанный выше вывод о принадлежности данной системы к классу поляров.

Область излучения линий водорода H_α , H_β , имеющих наибольшую оптическую толщину и более низкую температуру формирования, наблюдается почти единой и простирается вдоль струи аккрецируемого вещества. В 2012 году происходит заметное смещение области формирования эмиссионных линий в сторону поверхности вторичного компонента. Излучение линии HeI $\lambda 5876$ Å с много меньшей оптической толщиной происходит, главным образом, вблизи поверхности красного карлика. По данным 2011 года наиболее горячая линия $HeII$ $\lambda 4686$ Å простирается вдоль струи до значений скоростей более 500 км/сек. В 2012 году выделяется область излучения на поверхности вторичного компонента, что может быть обусловлено его большим прогревом мягким рентгеновским излучением.

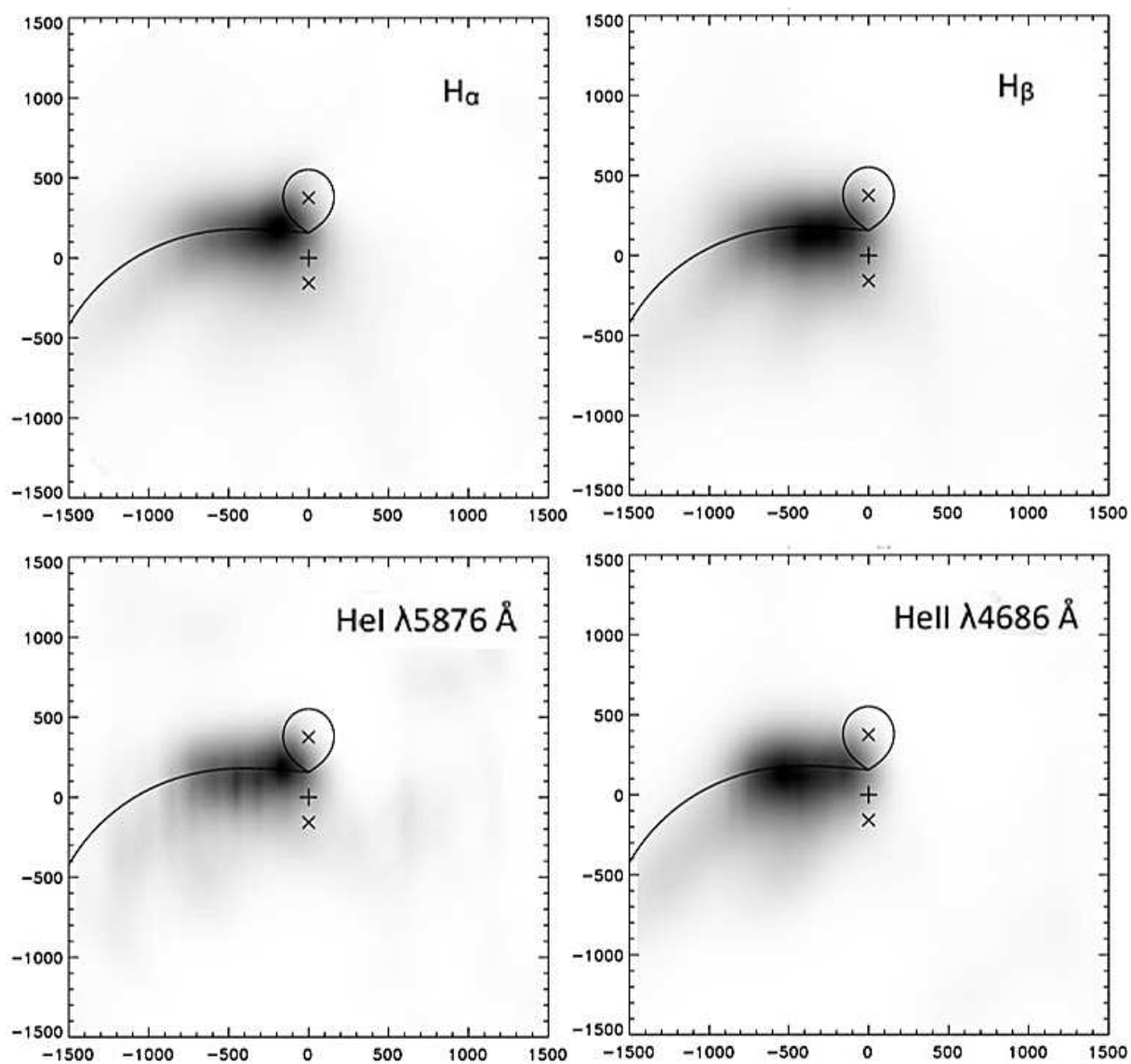


Рис. 4.15: Доплеровские карты, построенные по линиям $H\alpha$, $H\beta$, $HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$, $HeI \lambda 5876 \text{ \AA}$ по спектрам 2011 года.

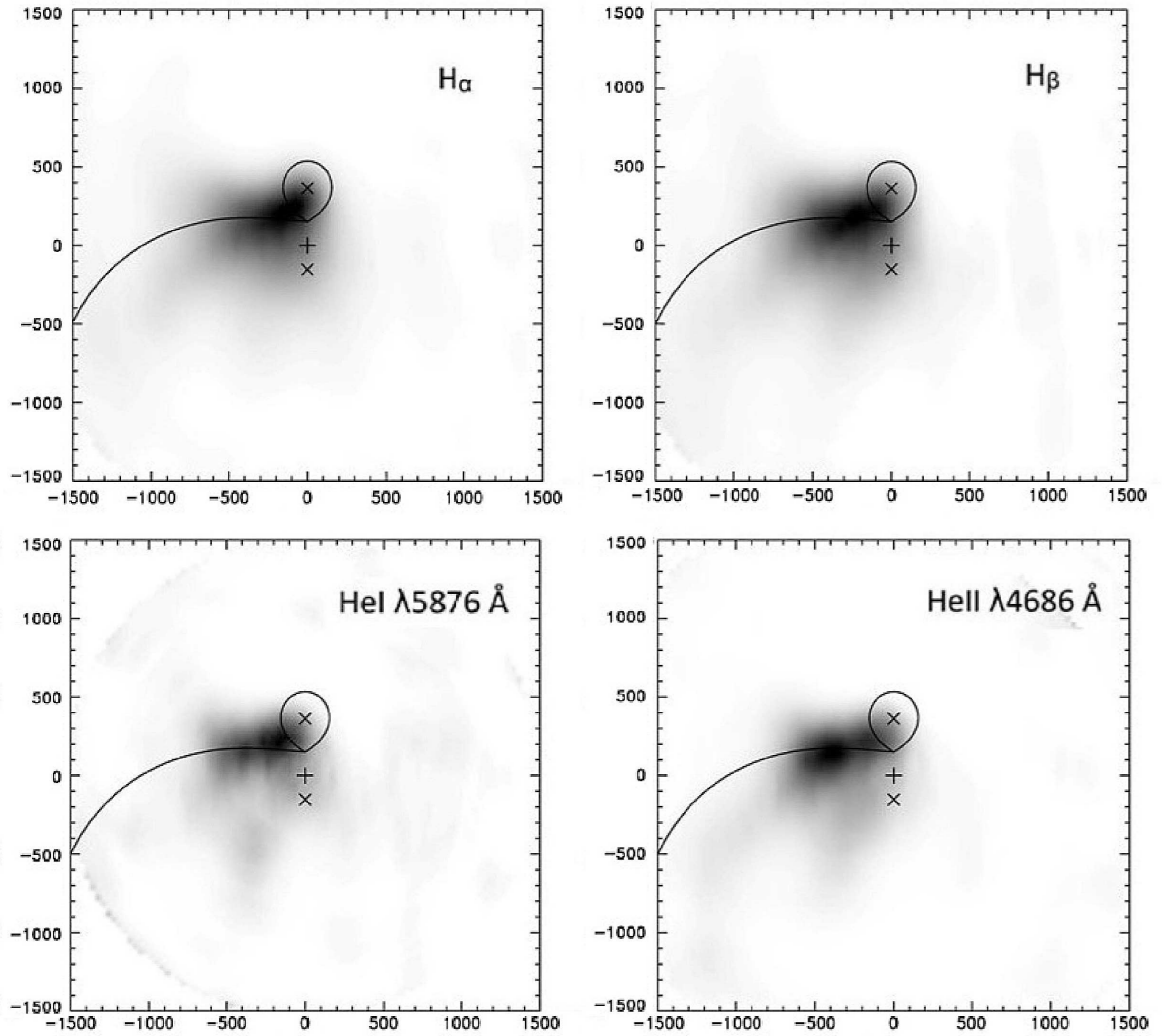


Рис. 4.16: Доплеровские карты, построенные по линиям H_{α} , H_{β} , $HeII$ $\lambda 4686$ Å, HeI $\lambda 5876$ Å по спектрам 2012 года.

В целом, анализ доплеровских карт позволяет сделать вывод об излучении достаточно мягкого рентгеновского потока со значительной ультрафиолетовой компонентой, обеспечивающей переизлучение не только в линиях $HeII$, но и линиях HI и HeI .

4.4 CSRT CSS081231 J071126+440405

Спектральные наблюдения CSS081231 на 6-м телескопе БТА CAO РАН проводились 20 и 21 сентября 2011 г на приборе SCORPIO-2, при отличных погодных условиях и размере изображений $\sim 1''$. В каждую ночь было получено по 14 спектров в диапазоне $\lambda\lambda = 3800 - 7300 \text{ \AA}$ с разрешением $5.5 \text{ \AA}$ и экспозицией 300 сек, которые покрыли фазы орбитального периода $\varphi = 0.13 - 0.81$ (20.09.11) и $\varphi = 0.60 - 1.29$ (21.09.11).

Фотометрические наблюдения затмения на 6-м телескопе БТА CAO РАН проводились в хороших погодных условиях с размером изображений $\sim 2''$. Объект наблюдался с редуктором светосилы SCORPIO. На участке матрицы размером 270×250 пикселей в режиме прямых изображений в полосе V было получено 40 кадров с временным разрешением 16 секунд. Кривая блеска в полосе V (рис.4.18) получена по данным телескопа Цейсс-1000.

4.4.1 Результаты спектроскопических наблюдений

Спектры объекта, полученные 20 и 21 сентября 2011 г., имеют типичный для катаклизмических переменных вид. На континуум наложены эмиссионные линии водорода серии Бальмера, нейтрального и ионизованного гелия (рис. 4.17). Видно, что наклон континуума в фазах максимума блеска $\varphi = 0.1 - 0.3$ меняется от «красного» (20.09.11) к «синему» (21.09.11). Оценка блеска по изображениям, снятым во время спектроскопических наблюдений и на телескопе Цейсс-1000, показала, что в полосе V он не менялся с 20 по 22 сентября 2011 г. (рис.4.18). Сравнивая профили линии H_α на перекрывающихся фазах $\varphi = 0.1 - 0.3$ (рис.4.19), можно заметить, что в спектрах на 20.09.11 линии смещены в красную сторону, и смещение пиков линий происходит быстрее. Анализ трейлер-спектров, отражающих изменение интенсивности, профиля и доплеровского смещения линии в зависимости от фазы орбитального периода, показывает, что в наблюдениях 20.09.11 на фазах $\varphi = 0.34 - 0.49$ линии начинают раздваиваться, появляется отдельный пик, чего мы не видим в профилях линий в спектрах от 21.09.11 (рис.4.20), т.е. в две последовательные ночи изменилась область формирования эмиссионных линий. Этот вывод подтвердило и доплеровское картирование (см. ниже). Особенностью профилей всех эмиссионных линий в данных 21.09.11 становится появление абсорбционных деталей на фа-

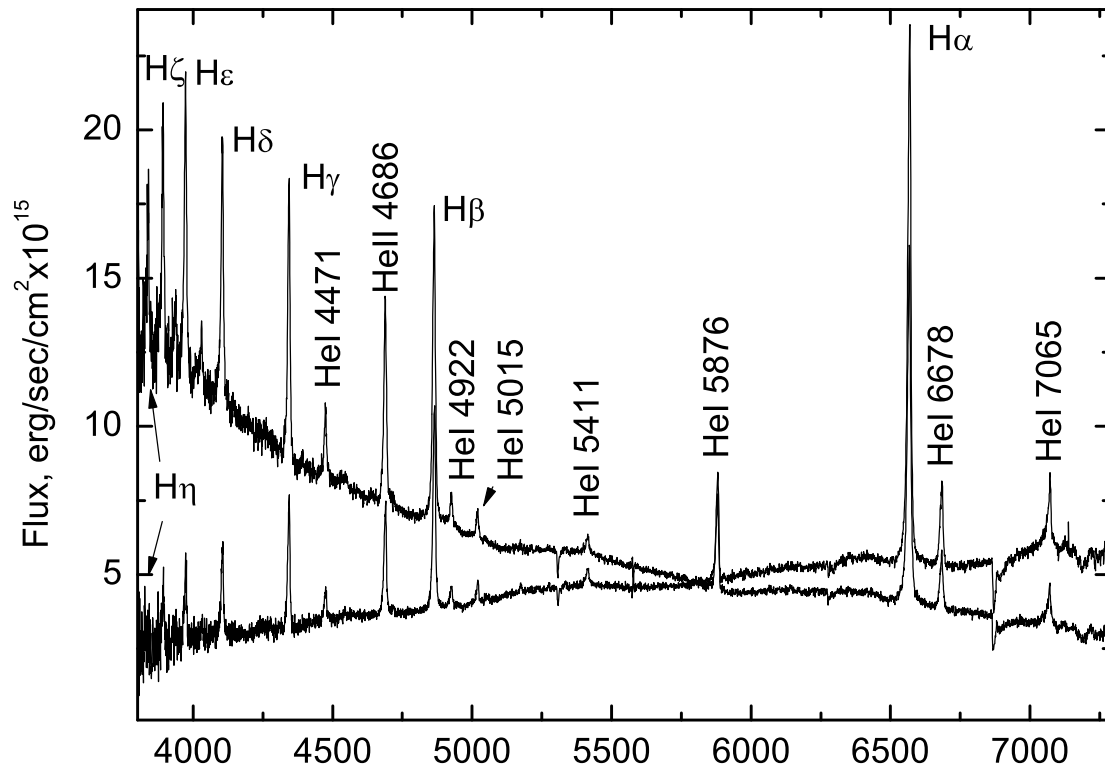


Рис. 4.17: Усредненные по фазам $\varphi = 0.1 - 0.3$ спектры объекта за 20 сентября («красный») и 21 сентября 2011 г. («синий» континуум), полученные на телескопе БТА САО РАН.

зах, близких к затмению $\varphi = 0.84 - 0.95$ (рис.4.21). Они появляются в красном крыле линий и смещаются в синюю часть, при этом линии нейтрального гелия становятся абсорбционными. Исключением является линия He II $\lambda 4686\text{\AA}$, где поглощается только красная часть линии. Такое происходит при особой геометрии системы, когда струя аккрецирующего вещества движется впереди красного карлика по ходу его движения по орбите (как показано на рис. 12 в [102]), а угол наклона орбиты к лучу зрения наблюдателя приближается к 90° . Подобная наблюдательная особенность обнаружена ещё в трех полярах EF Eri [103], MN Нуа [104] и FL Cet [102], проявляясь в разной степени и в разных линиях. Изучение подобных систем важно для исследования структуры струи аккрецирующего вещества.

Измерение лучевых скоростей основных эмиссионных линий H_α , H_β , HeI $\lambda 5876\text{\AA}$, HeII $\lambda 4686\text{\AA}$ проводилось методом их кросс-корреляции с линией в спектре с максимальной интенсивностью. Результаты с поправкой на лабораторную длину волны показаны на рис.4.22. Происходит квазисинусоидальное из-

менение лучевых скоростей, с плавным падением и более крутым нарастанием. Выделяются лучевые скорости линии HeII $\lambda 4686\text{\AA}$, для которых детектируется отклонение от среднего значения остальных линий. Заметно, что амплитуда скоростей линий HeII $\lambda 4686\text{\AA}$ выше. Сравнивая имеющиеся данные двух ночей, мы делаем вывод, что амплитуда изменения лучевых скоростей линий H_α , H_β , HeI $\lambda 5876\text{\AA}$ уменьшилась 21.09.11. Амплитуда изменения скоростей HeII $\lambda 4686\text{\AA}$ остается неизменной, аппроксимация синусоидой двух наборов данных по указанной линии за 20 и 21 сентября 2011 г. показывает, что изменилась только гамма-скорость с 230 до 80 км/сек при неизменных в пределах ошибок амплитуде и нулевой фазе. Значение периода приравнялось 1.

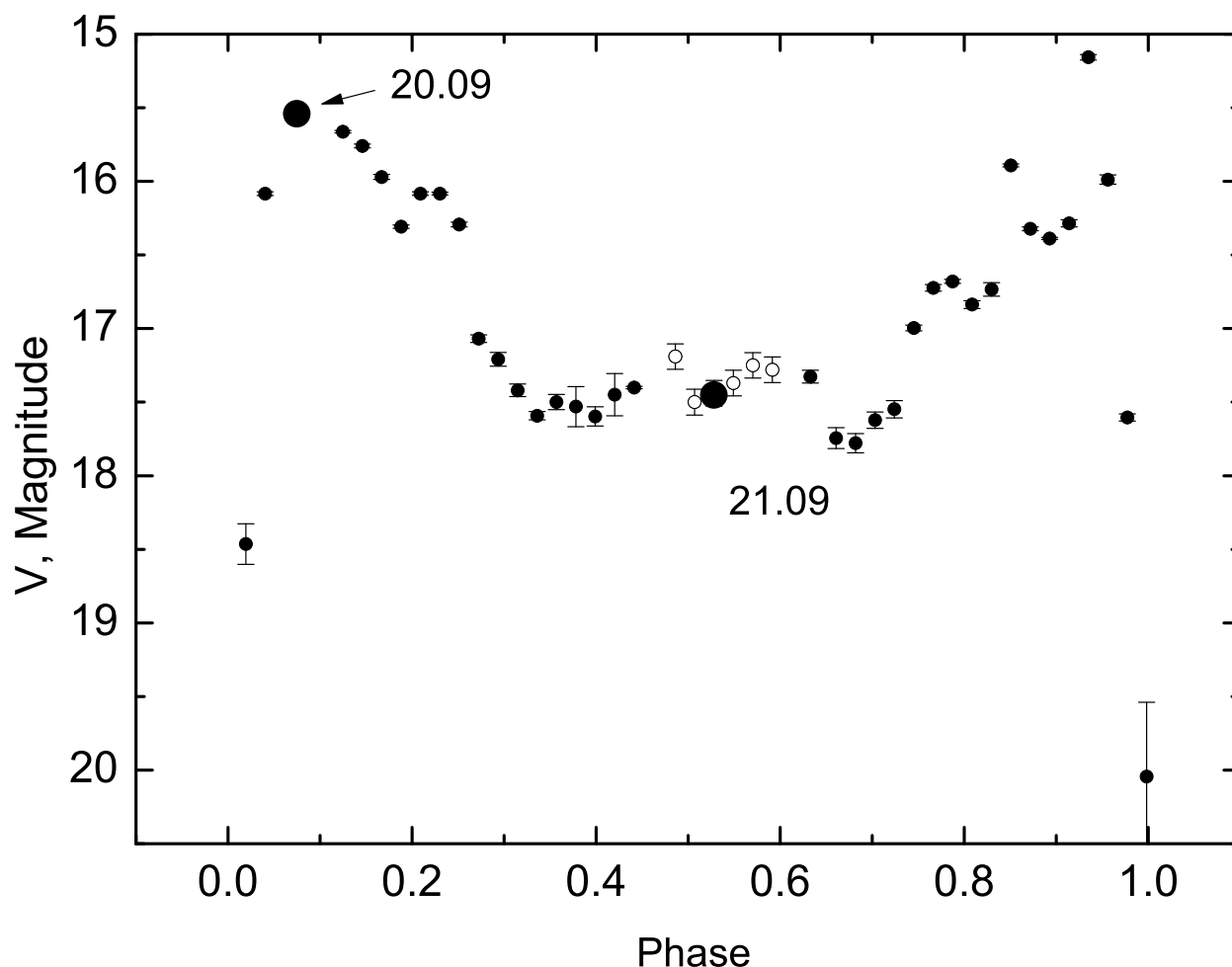


Рис. 4.18: Кривая блеска объекта в полосе V, полученная на телескопе Цейсс-1000 22.09.11 (маленькие кружки). Оценка блеска 21.09.11 на телескопе Цейсс-1000 – незаполненные кружки. Большие кружки – оценка блеска по изображениям, снятым на телескопе БТА непосредственно перед спектральными наблюдениями.

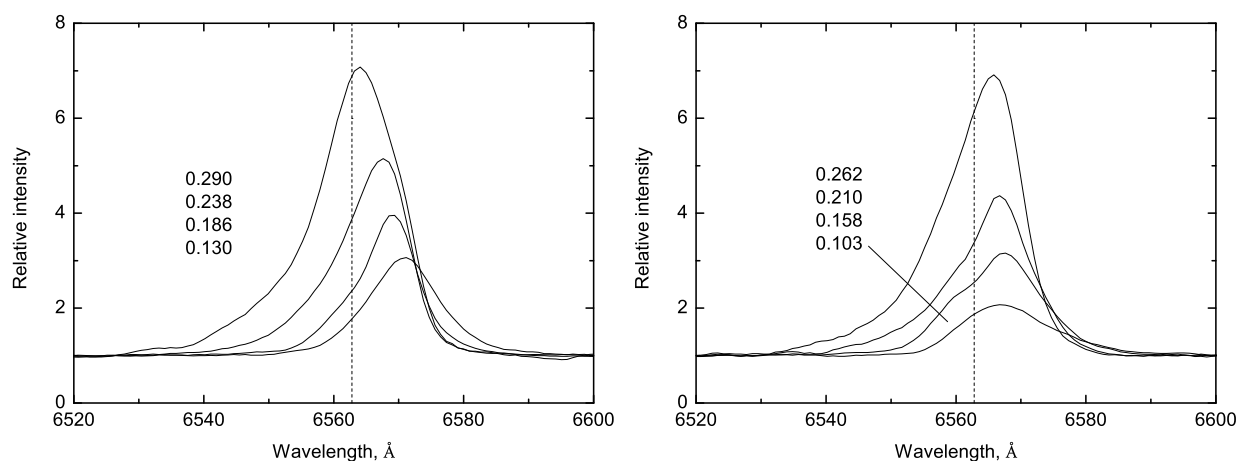


Рис. 4.19: Изменение профилей линии H_α на фазах $\varphi = 0.1 - 0.3$ 20.09.11 (слева) и 21.09.11 (справа). Вертикальной линией отмечена лабораторная длина волны линии H_α . Числа обозначают фазу орбитального периода, в которой был получен спектр.

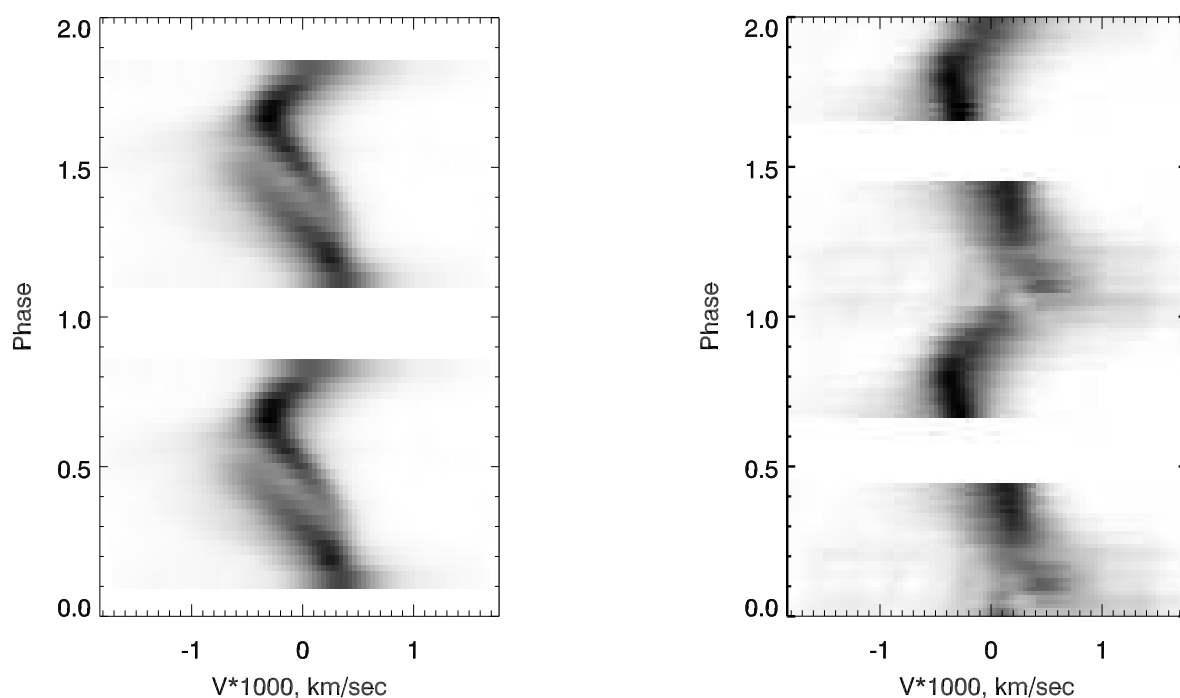


Рис. 4.20: Трейлер-спектры – изменение интенсивности, профиля и доплеровского смещения линии в зависимости от фазы орбитального периода, линии H_α 20.09.11 (слева) и 21.09.11 (справа).

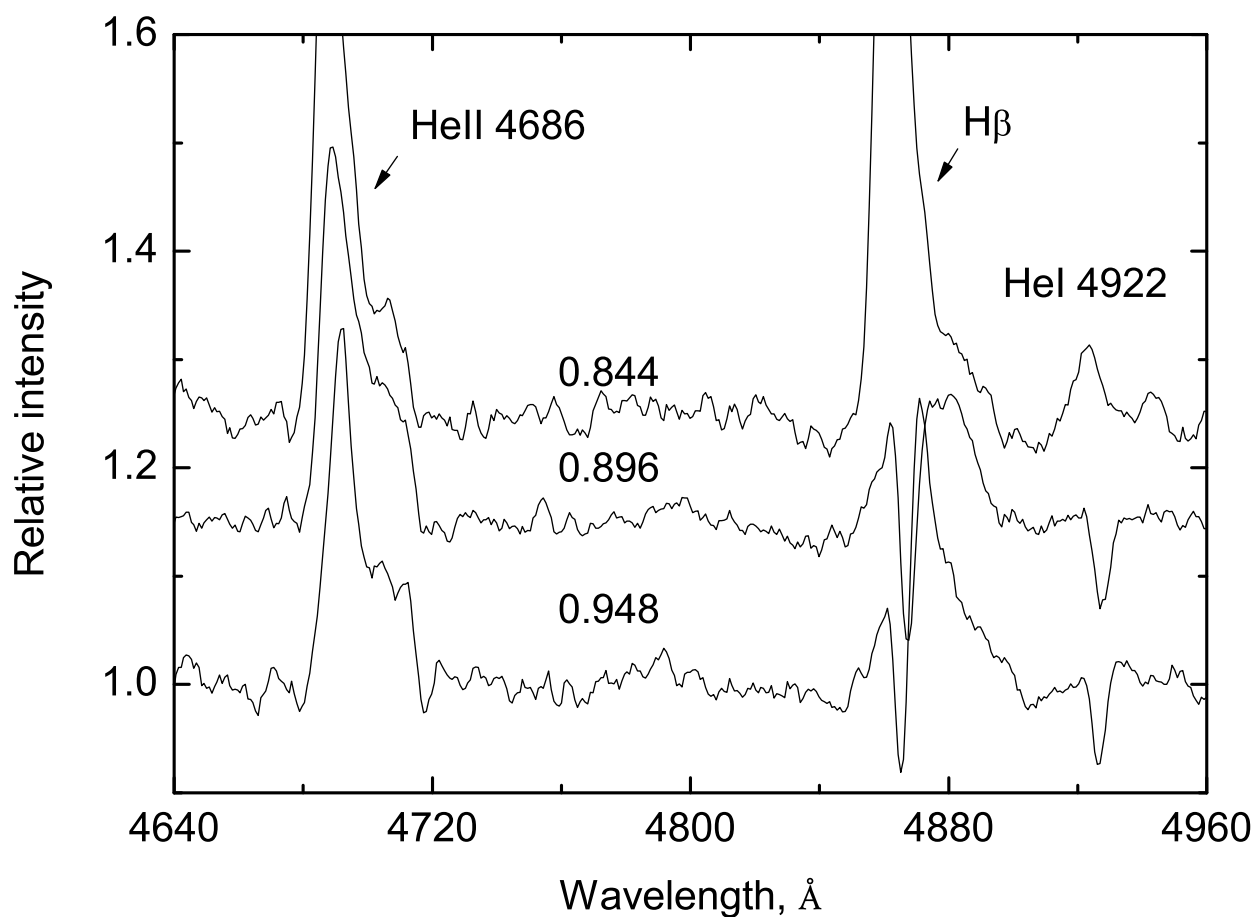


Рис. 4.21: Изменение профилей линий на фазах $\varphi = 0.84 - 0.95$ в спектрах 21.09.11

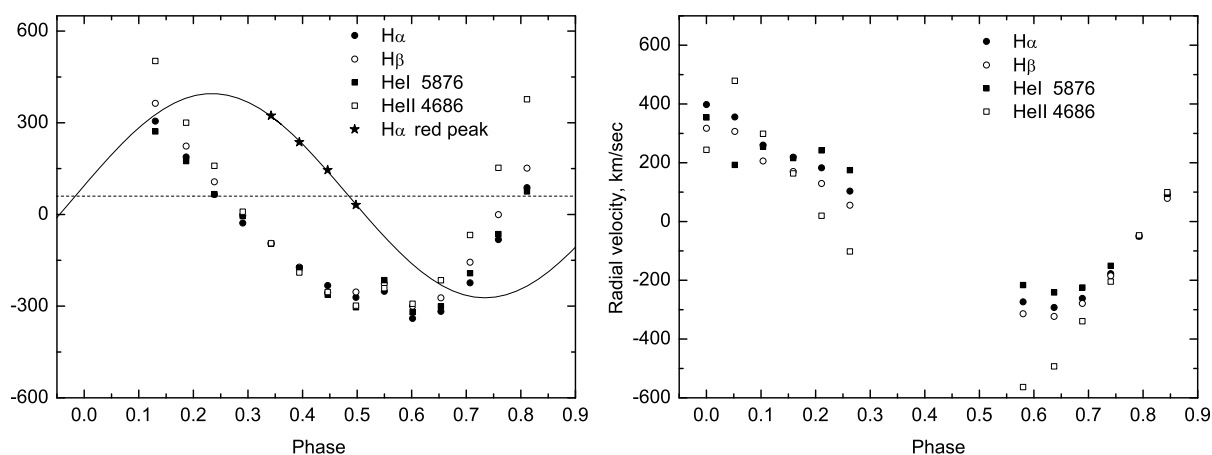


Рис. 4.22: Лучевые скорости, измеренные по основным эмиссионным линиям 20.09.11 (слева) и 21.09.11 (справа). Звездами показаны значения лучевых скоростей красной компоненты линии H_{α} , их аппроксимация синусоидой – сплошная линия, значение гамма-скорости – штриховая линия.

Измерение лучевой скорости красной компоненты линии H_{α} на фазах $\varphi = 0.34 - 0.49$ в спектрах 20.09 производилось с помощью Гаусс-анализа. В

полученные профили линий вписывались две гауссианы, длина волны красного пика использовалась для определения скорости излучающего вещества по известной формуле:

$$V = c \times \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0},$$

где c – скорость света, λ_0 – лабораторная длина волны, λ – измеренная длина волны. Далее проводилась аппроксимация значений лучевых скоростей красного пика моделью кругового движения с фиксированным значением периода, равным единице, остальные параметры были свободными. В результате были получены ее параметры: $K_h = 334 \pm 11$ км/сек, $\varphi = -0.04 \pm 0.01$, $\gamma = 61 \pm 26$ км/сек. Красная компонента линии формируется на поверхности вторичного компонента под действием эффектов переизлучения, поэтому мы использовали значение амплитуды лучевых скоростей для определения параметров системы (см. ниже).

4.4.2 Определение параметров системы

Имеющийся набор наблюдательных данных недостаточен для однозначного определения параметров CSS081231. Поэтому мы использовали дополнительное предположение о принадлежности вторичного компонента к звездам Главной Последовательности (ГП) с химическим составом, близким к солнечному. Это предположение является вполне обоснованным, поскольку, как показано ниже, белый карлик в системе имеет массу $M_1 > 0.75M_\odot$, т.е. является конечной стадией эволюции звезды с начальной массой не менее $4.00M_\odot$ за время $t < 2 \times 10^9$ лет. Таким образом, система CSS081231 принадлежит к молодому населению Галактики с солнечным химическим составом, а ее вторичный компонент находится на стадии ГП. При определении его параметров можно использовать эволюционные треки звезд ГП разных масс для $z=0.019$ [101], позволяющие для фиксированной массы получать радиус R_2 . Определенный таким образом радиус красного карлика сравнивался с эффективным радиусом его полости Роша R_{L2} , определяемым для заданного отношения масс звезд $q = M_2/M_1$ и большой полуоси A по формуле (1) [100]:

Отметим, что вследствие гравитационного возмущения, создаваемого белым карликом, истинный радиус вторичного компонента немного превышает

значение R_2 для одиночных звезд ГП. Поэтому считалось, что должно выполняться условие $R_{L2} = k \times R_{L2}$, где k может изменяться в пределах от 1.03 до 1.09, т.е. радиус полости Роша превышал эволюционный радиус красного карлика на 3 – 9%.

Для нахождения функции масс белого карлика использовалась установленная ранее амплитуда лучевых скоростей горячего пятна на поверхности вторичного компонента $K_h = 334 \pm 11$ км/сек. Данная величина должна быть исправлена за разность лучевых скоростей центра масс звезды и горячего пятна ΔK_2 . Определение поправок лучевых скоростей мы выполнили на основе анализа возможных смещений линий в модельных спектрах CSS081231. Теоретические спектры вычислялись с учетом эффектов отражения и несферичности компонент ТДС по методике, разработанной в [98] с применением моделей атмосфер звезд с внешним облучением. Для проведения расчетов задавались фундаментальные параметры вторичного компонента (температура, масса, радиус), отношение масс компонентов и мощность излучения рентгеновского источника. Поверхность холодной звезды разбивалась на малые площадки, для каждой из которых находились локальные параметры звездной атмосферы (T_{eff} , $\log g$) и внешнего потока (угол наклона θ , отношение интенсивностей падающего и собственного излучения K_x). Модели облучаемых атмосфер для данных параметров рассчитывались методом баланса функций нагрева и охлаждения плазмы, разработанным в [105, 106]. Начальные модели необлучаемых атмосфер получены интерполяцией сеток по методике³, описанной в [107]. На основе моделей атмосфер вычислялись синтетические спектры каждой площадки, попадающей на луч зрения наблюдателя в 72 фазах орбитального периода. Они складывались с учетом влияния вращения звезды на их лучевые скорости и условия видимости. Интегральный спектр звезды сдвигался в соответствии с лучевой скоростью ее центра масс и сворачивался с аппаратной функцией спектрографа. Добавим, что при моделировании спектров учитывались все источники непрозрачности в континууме, табулированные в комплексе SPECTR [98], около 2000000 линий атомов, ионов и 16 основных молекул, а также отклонения от ЛТР для атомов HI, HeI и HeII, рассчитанные с применением программного комплекса NONLTE3 [99]. Химический состав атмосферы холодной звезды считался равным солнечному в соответствии с данными [108].

³R. L. Kurucz, SAO CD-Roms, (Cambridge, MA02138, 1994).

Смещение линий в теоретических спектрах, обусловленное действием вращения и орбитального движения звезды, измерялось методом их кросс-корреляции аналогично анализу наблюдательных данных. Скорость вращения на экваторе предполагалась синхронной орбитальному движению и вычислялась по формуле:

$$V = \frac{R \times (1 + q)}{A} \times (K_h + \Delta K_2),$$

где R и V – радиус звезды и скорость движения для заданной локальной площадки. Обратная зависимость величины V от поправки лучевой скорости ΔK_2 делала процесс их нахождения итерационным при фиксированных значениях остальных параметров. В итоге было показано, что для широкого диапазона параметров CSS081231 полученная величина $K_h = 334 \pm 11$ км/сек определяет среднюю экваториальную скорость вращения на уровне $V = 127 \pm 3$ км/сек, а поправку амплитуды лучевой скорости холодной звезды в диапазоне $\Delta K_2 = 70\text{--}71$ км/сек. Тестовые расчеты показали, что данная оценка имеет высокую устойчивость к изменению остальных параметров (q , K_h , A) и мы зафиксировали ее как $\Delta K_2 = 70$ км/сек. Итоговая амплитуда лучевых скоростей вторичного компонента составила $K_2 = 404 \pm 11$ км/сек, а функция масс главного компонента $f(M_1) = 0.56 \pm 0.04 M_\odot$.

Фотометрические наблюдения затмения системы позволили определить длительность полного затмения системы ~ 350 сек(4.23). Угол наклона системы находился из фазовой наблюдаемой длительности полного затмения $\Delta\varphi = 0.050$ и результатов его теоретических расчетов [109]. Дальнейшее определение масс компонентов включало вариацию величины q до достижения равенства $R_{L2} = k \times R_{L2}$. Оказалось, что для допустимых в CSS081231 значениях $q = 0.20\text{--}0.22$ угол меняется в диапазоне $i = 78.7\text{--}79.3$ и его возможные ошибки не оказывают никакого влияния на результат. В итоге с применением полученной оценки функции масс и эволюционных треков звезд ГП [101] нами определены массы обоих компонентов: $M_1 = 0.86 \pm 0.08 M_\odot$, $M_2 = 0.18 \pm 0.02 M_\odot$ и величина большой полуоси $A = 0.80 \pm 0.03 R_\odot$. Соответствующий эволюционный радиус холодной звезды $R_2 = 0.19 \pm 0.02 R_\odot$, а ее полости Роша $R_{L2} = 0.20 \pm 0.03 R_\odot$. Отметим, что основным источником ошибок в представленных значениях параметров являются неточности измерения амплитуды лучевых скоростей K_h .

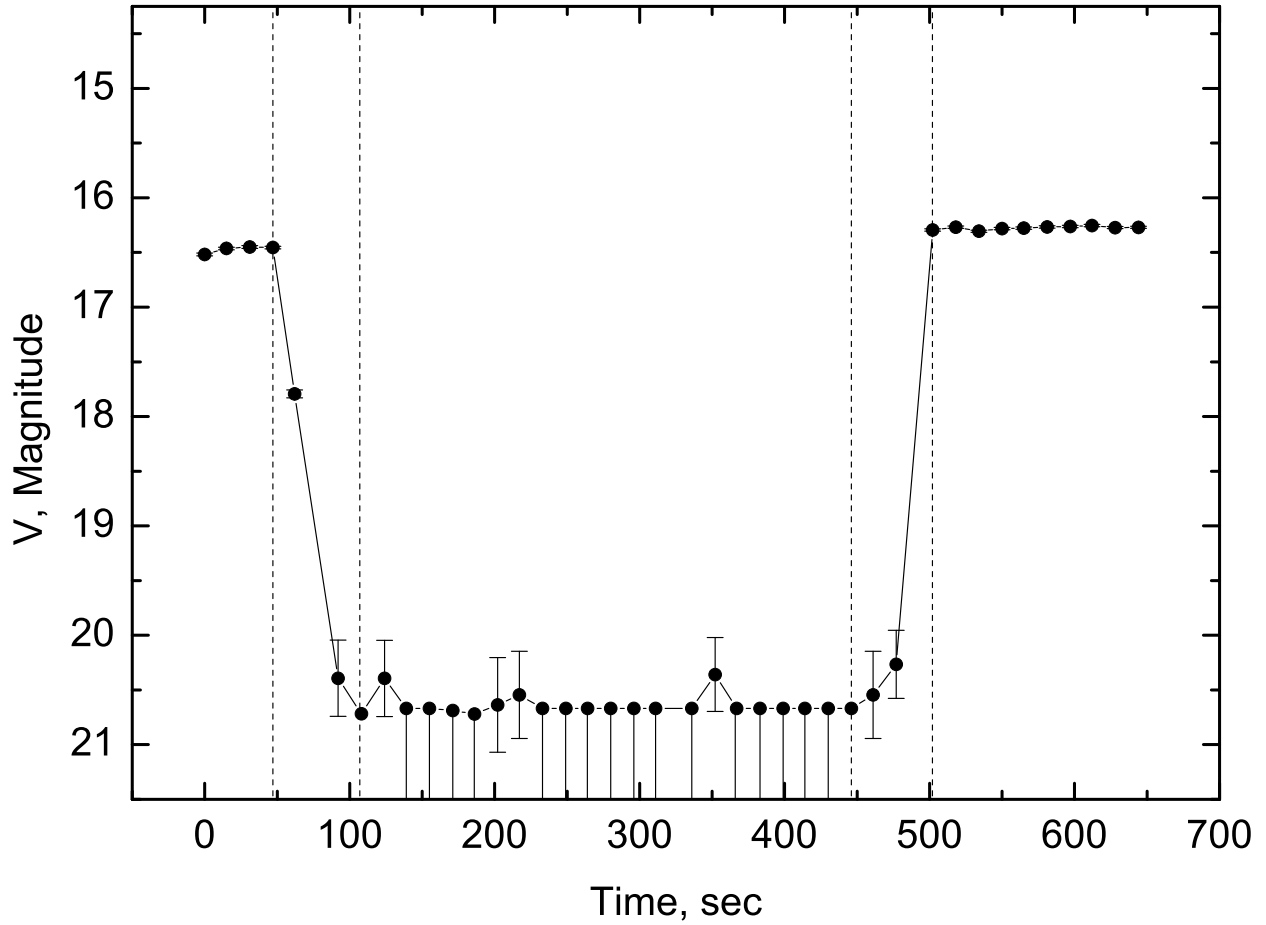


Рис. 4.23: Затмение объекта CSS081231 в полосе V по данным с телескопа БТА CAO РАН. Вертикальными линиями отмечены слева направо: начало затмения, начало фазы полного затмения, конец фазы полного затмения, конец затмения. Для измерений с отношением $S/N \simeq 3$ показан верхний предел звездной величины.

Полученные характеристики CSS081231 в целом соответствуют наиболее вероятным значениям для объектов данного типа. В частности, по данным каталога ТДС [8] в изученных 17 полярах с орбитальными периодами $P_o \leq 0.^d15$ средняя масса главных компонентов $M_1 = 0.75 \pm 0.22 M_\odot$, а масса вторичных компонентов $M_2 = 0.21 \pm 0.07 M_\odot$ при среднем значении отношения масс $q = 0.22$. В результате можно сделать вывод, что с точки зрения фундаментальных параметров CSS081231 является нормальным полярором.

Для проверки найденного набора параметров мы рассчитали интегральный спектр CSS081231 в фазе полного затмения и сравнили его с наблюдаемым. При моделировании варьировались эффективная температура красного карлика в диапазоне $T_{eff} = 3330\text{--}3470\text{K}$ (соответствующем для звезд ГП интервалу масс $M = 0.16\text{--}0.20 M_\odot$) и содержание ряда тяжелых элементов в его атмосфере. Сила тяжести на поверхности звезды фиксировалась на уровне $\log g = 5.00$.

Критерием наилучшего соответствия теоретического и наблюдаемого спектров являлось равенство в них интенсивностей бленды линий резонансного дублета NaI и молекулярных полос TiO , MgH в области с $\lambda > 5370\text{\AA}$.

На рис. 4.24 представлено итоговое согласование спектров и их остаточная разность, полученные при $T_{eff} = 3460 \pm 20\text{K}$, $[Ti/H] = 0.2$, $[O/H] = [Mg/H] = [Na/H] = 0.0$. Вторичный компонент доминирует в спектре затмения на длинах волн $\lambda > 5200\text{\AA}$, а его параметры соответствуют звезде ГП солнечной металличности с $M = 0.20M_{\odot}$, что полностью подтверждает корректность полученных нами параметров CSS081231. Излучение горячей плазмы наблюдается в спектрах затмения в виде эмиссионных линий водорода и гелия, а также «синего» континуума в диапазоне $\lambda < 5700\text{\AA}$. Анализ остаточного спектра показал, что он не может быть описан планковским распределением при любой температуре плазмы, т.к. имеет слишком высокий градиент $\frac{dF_{\lambda}}{d\lambda}$. Наблюдаемое отношение продолжительности затмения к орбитальному периоду говорит о формировании континуума в остаточном спектре на расстоянии $l > 0.05R_{\odot}$ от поверхности белого карлика, т.е. вне внутренней области аккреционной колонны. Заметим, что в момент затмения не наблюдается точка L_1 со струей плазмы, истекающей к аккретору. Поэтому можно сделать вывод о формировании «синего» континуума в спектре затмения главным образом во внешних слоях аккреционной колонны, излучающих вследствие действия эффектов флуоресценции. Эти слои доминируют также в излучении эмиссионных линий, что подтверждается их большой полушириной ($\Delta\lambda > 10\text{\AA}$) и значительным доплеровским смещением ($\delta\lambda > 4\text{\AA}$).

Отдельный интерес представляет оценка протяженности области формирования оптического континуума в аккреционной структуре объекта. Малая скважность и высокое качество фотометрических данных для фаз затмения позволяют оценить продолжительность его частных фаз на уровне $t = 51\text{--}55$ секунд (см. рис. 4.23) или $t = 0.0075P_{orb}$. Соответствующий размер области излучения континуума $l \approx 0.037R_{\odot}$. Согласно моделям белых карликов с углеродными и кислородными ядрами [110] радиус звезды с массой $M = 0.86M_{\odot}$ составляет $R = 0.010\text{--}0.012R_{\odot}$, показывая некоторую зависимость от температуры. Для наименьшего из возможных значения $M = 0.78M_{\odot}$ максимальная величина радиуса достигнет $R = 0.014R_{\odot}$ при $T_{eff} = 100000\text{K}$. Таким образом наблюдаемая область формирования оптического излучения превышает диаметр белого кар-

лика в 1.4–2.0 раза, т.е. аккреционная структура оказывается оптически толстой в континууме на расстояниях 8000-10000 км от его физической поверхности.

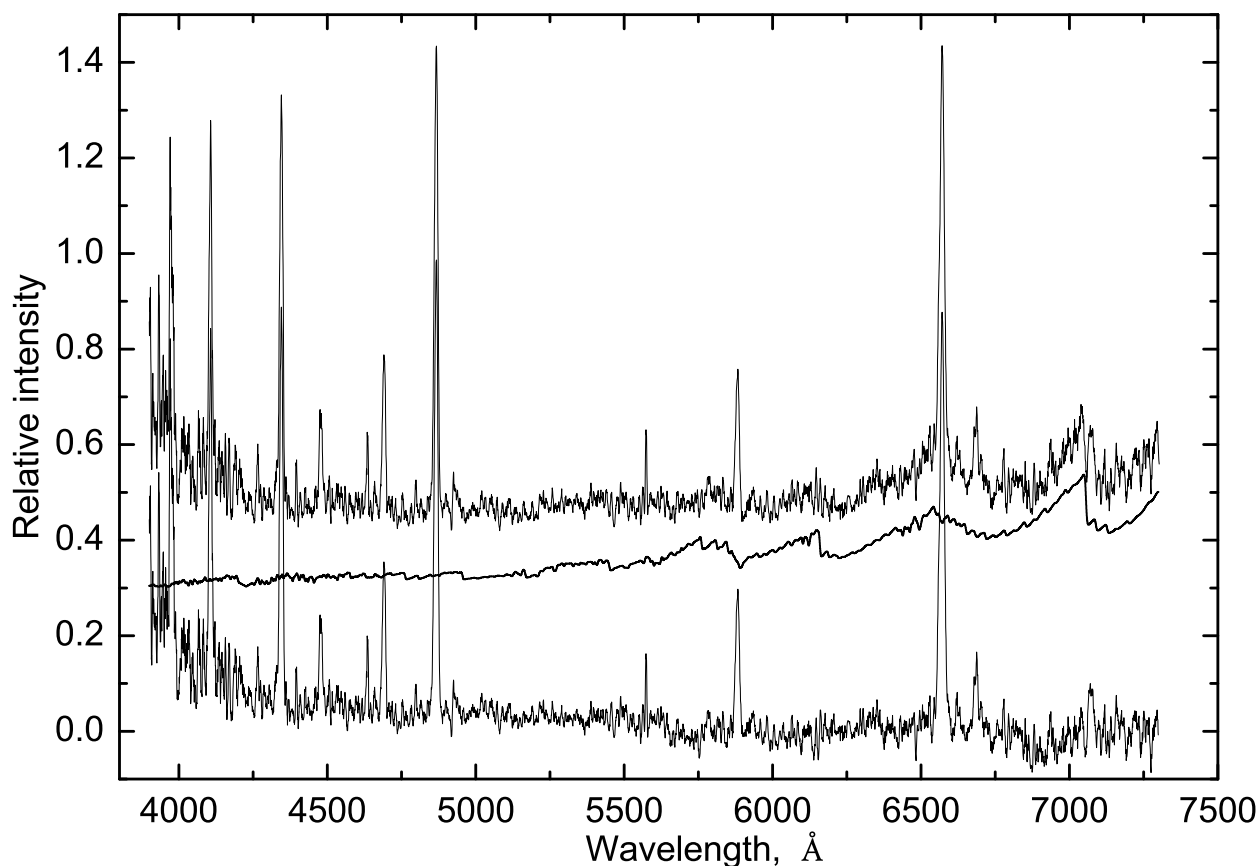


Рис. 4.24: Наблюдаемый спектр в момент затмения (1), теоретическая модель излучения красного карлика, полученная при $T_{eff} = 3460 \pm 20\text{K}$, $[Ti/H] = 0.2$, $[O/H] = [Mg/H][Na/H] = 0.0$ (2), остаточная разность (3). Теоретический и наблюдаемый спектр разнесены по оси Y для большей наглядности.

4.4.3 Доплеровские карты

Для выявления причин наблюдаемых различий в спектрах CSS081231, полученных 20 и 21 сентября 2011 г., мы использовали расчеты карт областей излучения в линиях H α , HeI и HeII методом доплеровской томографии [111]. Доплеровское картирование выполнено для данных обеих ночей с использованием программного комплекса Шпруита, реализующего метод минимизации энтропии, с анализом наблюдаемых эмиссионных линий. Карты строятся в плоскости скоростей, где ось x направлена от белого карлика к красному, а ось y вдоль движения красного карлика по орбите. Результаты доплеровской томографии показаны на рисунках 4.25, 4.26, 4.27 и 4.28. Помимо областей излучения на картах отмечены: точка нулевых скоростей, центры масс обоих компонентов, полость Роша

красного карлика и траектория струи при движении вещества по кеплеровской орбите.

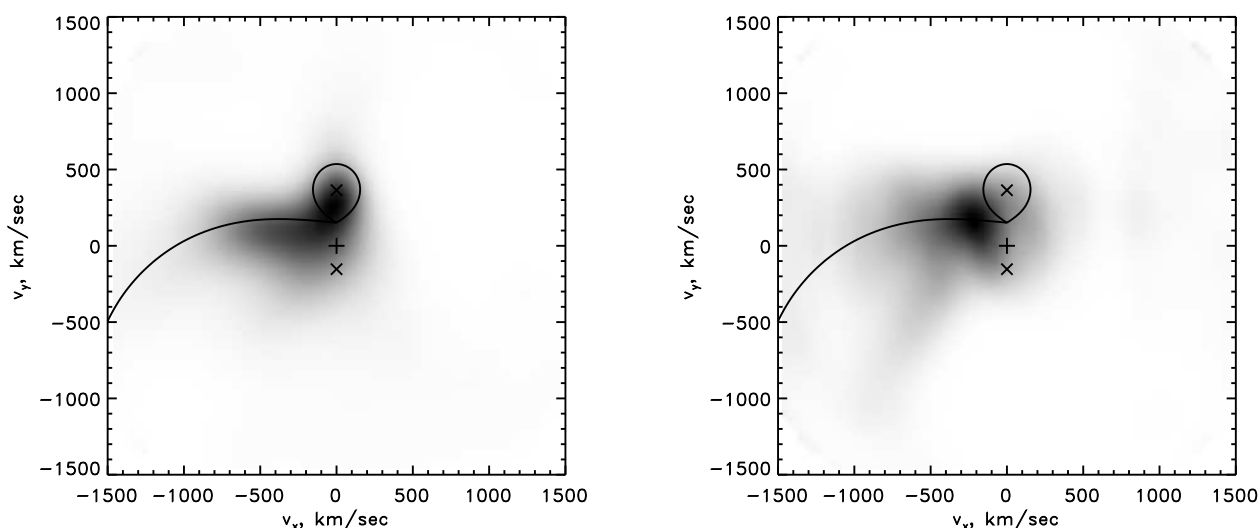


Рис. 4.25: Доплеровские карты, построенные по линии H_α за 20.09.11 (слева) и 21.09.11 (справа). Элементы, присутствующие на картах, описаны в тексте.

В спектрах 20.09.11 излучение в линиях водорода формируется в области переизлучения на поверхности вторичного компонента двойной системы и струе перетекающего вещества, простирающейся до области, соответствующей скорости $V_x = -900$ км/сек, внешние границы которой размыты. Данная структура областей излучения проявляется как в линии H_α , так и в H_β , и является характерной для многих полярных, находящихся в относительно спокойном состоянии блеска (см. напр. [112]). Такая же структура излучающих областей наблюдается и в линии HeI. Совсем другая структура у областей излучения на доплеровской карте, полученной по линии HeII $\lambda 4686\text{\AA}$. Здесь максимальная интенсивность излучения приходится на струю перетекающего вещества и, практически отсутствует область, связанная с переизлучением на поверхности красного карлика. Пик максимальной интенсивности локализован в области, соответствующей скорости $V_x = -350$ км/сек, а структура не столь сложна по сравнению с линией HeI.

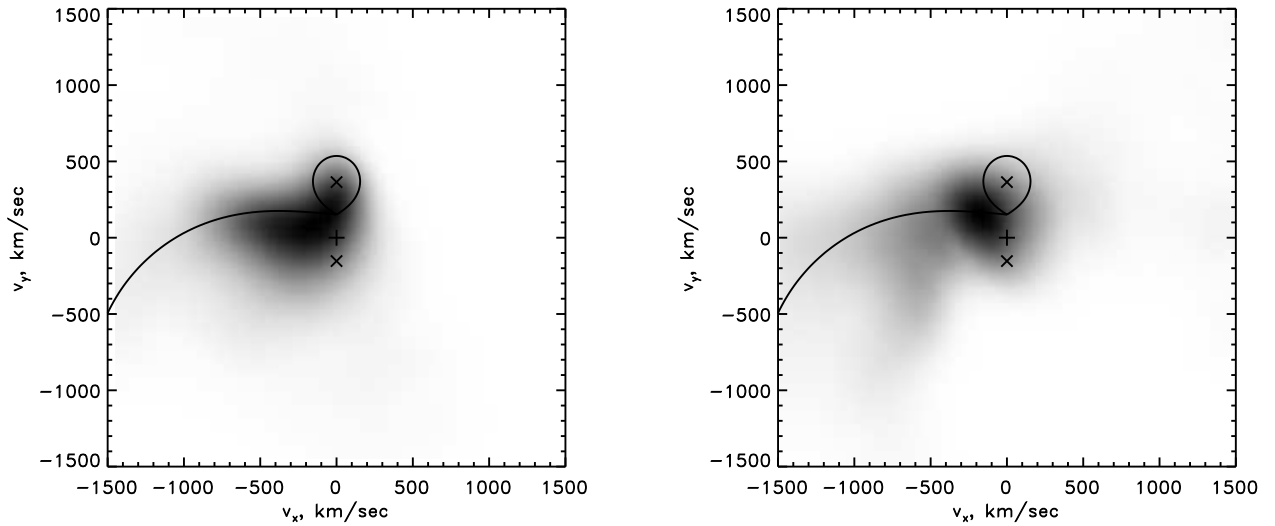


Рис. 4.26: Тоже, что на рис.4.25, только для линии H_β

Доплеровские карты, полученные по спектрам 21.09.11, существенно отличаются от результатов предыдущей ночи. Пик максимальной интенсивности излучающих областей в линиях H α и HeI смещен в область больших скоростей, и переизлучение на поверхности вторичного компонента практически отсутствует. В области, соответствующей $V_x = -500$ км/сек, сформировалась структура низкой контрастности, которая наилучшим образом проявляется в линии HeI. Область максимальной интенсивности излучения в линии HeII $\lambda 4686\text{\AA}$ увеличила линейные размеры вдоль струи перетекающего вещества в два раза, при этом положение ее центра в поле скоростей сохранилась и соответствует $V_x = 350$ км/сек.

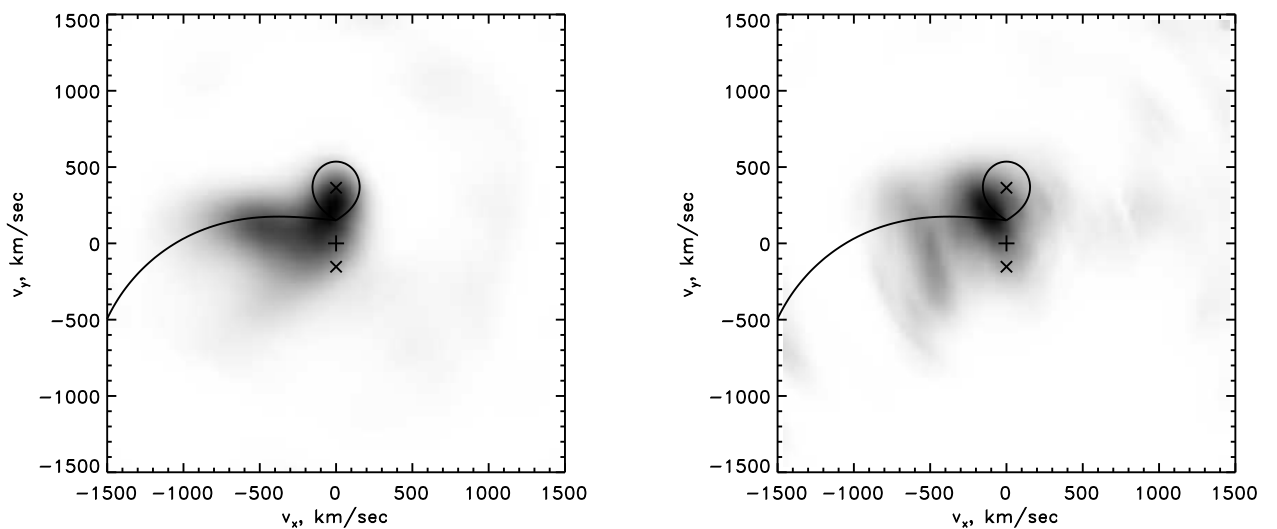


Рис. 4.27: Тоже, что на рис.4.25, только для линии HeI $\lambda 5876\text{\AA}$

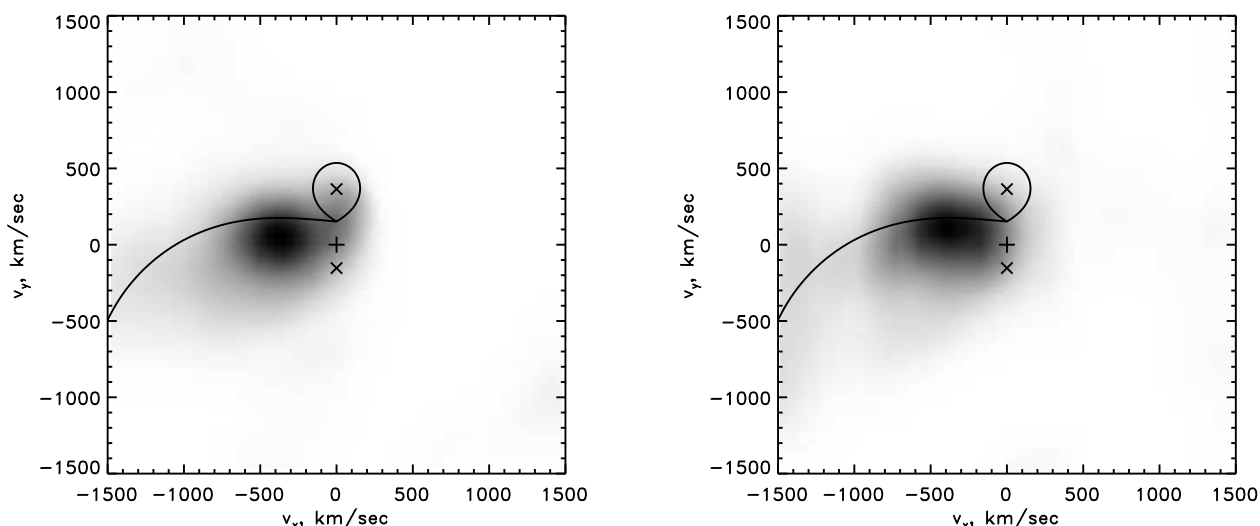


Рис. 4.28: Тоже, что на рис.4.25, только для линии HeII $\lambda 4686\text{\AA}$

Резюмируя результаты доплеровской томографии, можно сделать вывод о наличии в системе CSS081231 на даты наблюдения следующих особенностей:

1. Области формирования эмиссионных линий HII и HeI существенно отличаются 20.09.11 и 21.09.11. Если в первую из ночей основной вклад в излучение данных линий определяется переизлучением на поверхности красного карлика, плавно переходящим в область более высоких скоростей вдоль перетекающей струи, то 21.09.11 переизлучение перестает доминировать, а в области, соответствующей $V_x = -500$ км/сек, формируется структура низкой контрастности.
2. Основное яркое пятно, видимое по данным 20.09.11 в линиях HII и HeI, связано с переизлучением на поверхности вторичного компонента, что подтверждает и появление узкого пика в красном крыле профилей эмиссионных линий на фазах орбитального периода $\varphi = 0.34 - 0.49$. Это обосновывает выбор значений лучевых скоростей, определенных по красному пику, для нахождения скорости движения красного карлика по орбите.
3. В томограммах по данным 21.09.11 на $V_x = -500$ км/сек видна умеренно холодная, оттекающая область, которая лучше всего проявляется в линиях HeI. Очень вероятно, что появление этой дополнительной области разреженного газа ответственно за абсорбции в профилях эмиссионных линий HII, HeI и HeII в фазах орбитального периода $\varphi = 0.84 - 0.95$. Отметим, что именно линии нейтрального гелия переходят в поглощение полностью.

4.4.4 Моделирование циклотронного излучения

Моделирование циклотронного излучения для определения параметров аккреционной колонки, проводилось в предположении термодинамического равновесия излучающей среды с использованием программного кода HARMONY [113], при помощи которого вычислялись коэффициенты циклотронной непрозрачности обыкновенных и необыкновенных волн $\alpha_{\pm}$. Коэффициенты непрозрачности являются функциями частоты ω/ω_c ($\omega_c = eB/m_e c$ — циклотронная частота), температуры плазмы T_e и угла между вектором магнитного поля и лучем зрения θ . Вычисление интенсивности излучения проводилось в предположении небольшого размера зоны циклотронной эмиссии, и в том, что изменение направления и напряженности магнитного поля в ее пределах мало, а также в предположении ее температурной однородности. В таком случае решение уравнение переноса для двух мод поляризации представляется в виде

$$I_{\pm} = I_{RJ}(1 - \exp(-\alpha_{\pm}\Lambda)), \quad (4.1)$$

где $I_{\pm}$ — интенсивность обыкновенных и необыкновенных волн, I_{RJ} — интенсивность Рэлея-Джинса, а Λ — безразмерный параметр, определяемый как

$$\Lambda = \frac{\omega_p^2 s}{\omega_c c}. \quad (4.2)$$

В последнее выражение входят: геометрическая толщина излучающей области вдоль луча зрения s ; плазменная частота ω_p . Коэффициент поглощения в формуле (4.1) дан в единицах $\omega_p^2/\omega_c c$. Полная интенсивность излучения определяется суммой двух мод поляризации:

$$I = I_+ + I_-. \quad (4.3)$$

Анализ спектрального материала поляров свидетельствует о растянутости зон циклотронного излучения, что проявляется в отличии наблюдаемых спектров и теоретических спектров простых моделей [114, 115]. Указание на растянутость излучающих областей также проявляется при анализе фотополяриметрического материала [116, 117]. Несмотря на существующие проблемы моделирования циклотронных спектров, используемое в данной работе предположение малости зоны циклотронного излучения может быть использовано для оценки усред-

ненных параметров излучающей области и часто применяется в анализе современных спектроскопических данных [64, 65].

Определение физических характеристик зоны циклотронных эмиссий проводилось путем сравнения теоретического и наблюдаемого спектров при варьировании параметров B , T_e , θ и Λ . Сложное влияние данных параметров на вид циклотронного спектра проявляется в эффектах разного рода. Так, положение циклотронных гармоник чувствительно к напряженности магнитного поля B . Температура среды T_e сказывается на ширине гармоник, она же влияет на наклон спектра. Похожий эффект дает параметр Λ . Ориентация вектора магнитного поля по отношению к лучу зрения θ отражается на остроте циклотронных пиков и вносит небольшой вклад в изменение положения гармоник.

В итоге, наилучшее совпадение пиков и интенсивностей линий получилось при усреднении нескольких модельных спектров в диапазоне параметров $B = 31 - 34$ МГц, $T_e = 10 - 12$ кэВ, $\theta = 80 - 90$ градусов и $\Lambda = 10^5$.

Глава посвящена спектральным исследованиям систем: USNO-A2.0 0825-8396733, BS Tri и CRTS CSS081231 J071126+440405. Представлены результаты анализа спектральных данных поляра USNO-A2.0 0825-8396733. В спектрах объекта наблюдаются однопиковые эмиссионные линии водорода, гелия и высокоионизованных тяжелых элементов, характерные для излучения полярных рентгеновским облучением вторичной компоненты. Профили эмиссионных линий состоят из нескольких компонент. Для построения кривой лучевых скоростей была выделена узкая компонента с высокой амплитудой смещения пика в шкале длин волн. На основе анализа лучевых скоростей и предшествовавших фотометрических данных были получены оценки массы белого карлика $M_1 \sim 0.75M_\odot$, красного карлика $M_2 \sim 0.19M_\odot$ и угла наклона системы $i \sim 80^\circ$. Построенные карты доплеровской томографии и кривые лучевых скоростей указывают на расположение основной области излучения линий H_β и $HIII \lambda 4686\text{\AA}$ на поверхности вторичной компоненты.

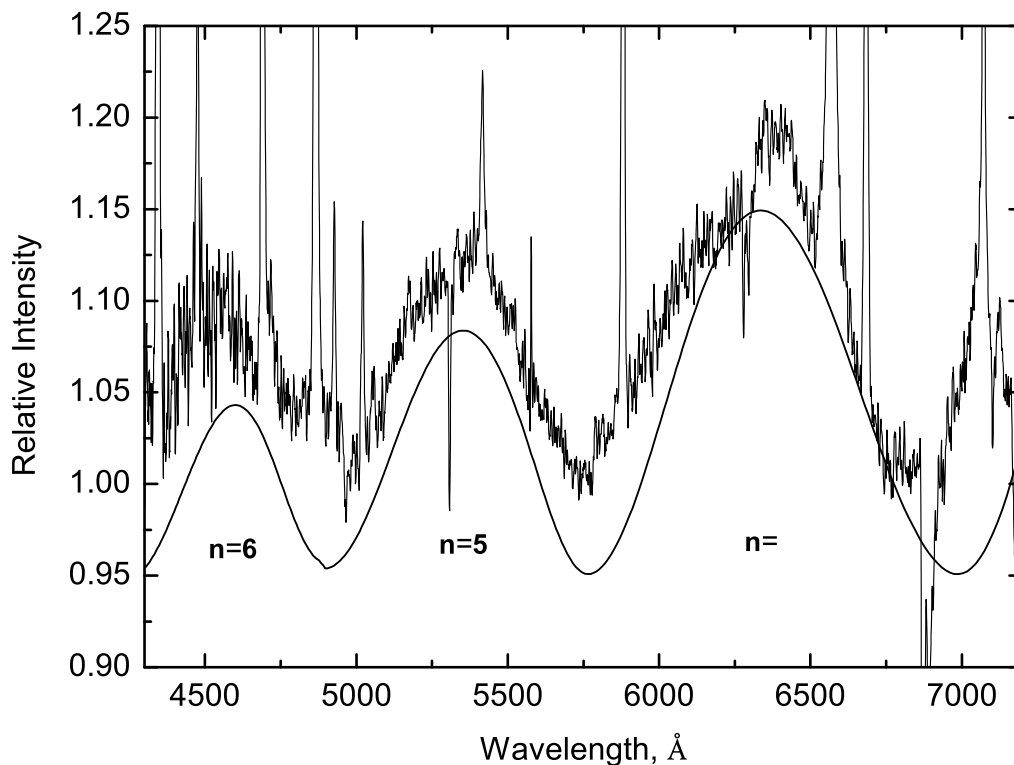


Рис. 4.29: Сравнение наблюдаемых и теоретических спектров циклотронных гармоник, отмечены номера гармоник.

Представлены спектральные наблюдения катаклизмической переменной BS Tri. Их исследование показало, что спектры имеют плоский континуум с наложенными на него сильными эмиссионными линиями водорода и нейтрального гелия, боуэновской бленды и сравнимой по интенсивности с водородными линией $HeII\ 4686\text{\AA}$. Профили линий имеют сложную структуру и испытывают переменность в шкале фаз орбитального периода системы. Анализ этой структуры выявил наличие в ней двух компонент, имеющих различные значения лучевых скоростей и связанных с облучаемой поверхностью вторичной компоненты и потоком вещества, перетекающего с нее на белый карлик. Сравнение блеска системы, интенсивностей эмиссионных линий и их лучевых скоростей в 2011 и 2012 гг., показало что при неизменном блеске системы формирование всех линий сместилось в области с меньшей скоростью. При этом изменился балмеровский декремент, со значительным ослаблением линии H_{α} , а линии $HeII\ 4686\text{\AA}$ усилились с одновременным ослаблением линий HeI . Таким образом баланс $HeI/HeII$ сместился в сторону более высокой стадии ионизации. Использование спектров достаточно высокого разрешения и значительное

разделение компонент линии $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$ в интервале фаз $\varphi = 0.2 - 0.6$ позволило нам получить набор лучевых скоростей вторичной компоненты. На их основе с применением эволюционных треков звезд Главной Последовательности был найден набор динамических параметров BS Tri: $M_1 = 0.75 \pm 0.02 M_\odot$, $M_2 = 0.16 \pm 0.02 M_\odot$, $R_2 = 0.18 \pm 0.02 R_\odot$, $A = 0.74 \pm 0.05 R_\odot$. Доплеровские карты, построенные по линиям H_α , H_β , $HeII\ \lambda 4686\text{\AA}$, $HeI\ \lambda 5876\text{\AA}$, не показывают наличия даже слабой дисковой аккреционной структуры, подтверждая принадлежность BS Tri к классу полярнов. Окончательное подтверждение такой классификации должно быть сделано на основе поляриметрических наблюдений объекта. Из результатов его доплеровского картирования следует, что основные области образования эмиссионных линий в его спектрах связаны с действием эффектов переизлучения на поверхности вторичной компоненты и излучения плазмы в оптически тонких частях струи аккрецируемого вещества. В обоих случаях степень поляризации излучения в линиях может быть достаточной большой, что делает перспективными спектрополяриметрические наблюдения объекта.

Анализ спектральных данных полярна CSS081231 показал, что в спектрах объекта, типичных для катаклизмических переменных, присутствуют эмиссионные линии H I, He I, He II. Наблюдаемые изменения вида спектров и профилей эмиссионных линий говорят о том, что с 20 на 21 сентября 2011 г. произошли изменения геометрии областей формирования эмиссионных линий и распределения энергии в оптическом спектре объекта. Анализ доплеровских карт показал, что во время наблюдений 20.09.11 эмиссионные линии формировались в основном на поверхности вторичного компонента, красного карлика, что подтверждается появлением на фазах $\varphi = 0.34 - 0.49$ красных пиков в профилях линий. Сутками позже (21.09.11), эта область перестала доминировать, появилась другая область, расположенная на доплеровских картах вблизи $V_x = -500$ км/сек. Вероятно, что возникновение этой дополнительной области разреженного газа ответственно за появление компонент поглощения в профилях эмиссионных линий H I, He I и He II в фазах орбитального периода $\varphi = 0.84 - 0.95$ в ночь 21.09.11. В расчетах параметров системы использовались полуамплитуда лучевых скоростей, измеренная по линии H_α и её поправка на центр массы красного карлика, рассчитанная по модельным спектрам эффектов переизлучения, а также продолжительность затмения. В итоге получены следующие параметры: $M_1 = 0.86 \pm 0.08 M_\odot$, $M_2 = 0.18 \pm 0.02 M_\odot$, $q = 0.21 \pm 0.01$, $R_{L2} = 0.20 \pm 0.03 R_\odot$, $A = 0.8 \pm 0.03 R_\odot$. Сравне-

ние теоретического спектра красного карлика со спектром, полученным в затмении, подтвердило надежность определения параметров и использованного метода. Сравнение наблюдаемых линий циклотронного излучения с теоретическими позволило оценить параметры аккрецирующей структуры вблизи поверхности белого карлика: $B = 31 - 34$ МГц, $T_e = 10 - 12$ кэВ, $\theta = 80^\circ - 90^\circ$ и $\Lambda = 10^5$, где B – напряженность магнитного поля, T_e – температура плазмы, θ – угол наклона магнитной оси к лучу зрения и Λ – безразмерный параметр, зависящий от геометрической толщины излучающей области.

Заключение

В работе представлены фотометрические, спектральные и поляриметрические наблюдения кандидатов в магнитные катаклизмические переменные. В итоге были получены следующие результаты:

- Шесть катаклизмических переменных были классифицированы как поляры по результатам поляриметрических наблюдений на телескопе БТА САО РАН. Показано, что объекты выборки обладают высокой степенью поляризации излучения. USNO0825 – $(-32 \pm 1\%)$, RXS184542 – $(33 \pm 2\%)$, MT Dra – $(12.5 \pm 0.5\%)$, CSS081231 – $(-14 \pm 2\%)$, CSS130604 – $(-22 \pm 1.5\%)$, IPHAS0528 – $(-9.5 \pm 0.3\%)$.
- У объектов RXS184542, CSS081231, MT Dra, IPHAS0528 зарегистрирована смена знака круговой поляризации, свидетельствующая об аккреции на оба магнитных полюса.
- По результатам фотометрических наблюдений определены значения периодов орбитального движения для 4 систем. USNO0825 – $0.^d08481(2)$, IPHAS0528 – $0.^d055592(2)$, RXS0733 – $0.^d139095(2)$ и CSS130604 – $0.^d055592(2)$.
- Один из объектов лежит на нижней границе промежутка периодов, такие системы встречаются очень редко.
- По результатам долговременных фотометрических наблюдений IPHAS0528 зарегистрированы высокие и низкие состояния блеска системы. В низком состоянии произошли изменения формы кривой блеска, появился вторичный максимум. Зафиксировано увеличение блеска в голубом диапазоне.
- Анализ спектральных данных позволил определить базовые параметры систем. Для USNO0825: $M_1 \sim 0.75M_\odot$, $M_2 \sim 0.19M_\odot$ и $i \sim 80^\circ$; для BS Tri: $M_1 = 0.75 \pm 0.02M_\odot$, $M_2 = 0.16 \pm 0.02M_\odot$, $R_2 = 0.18 \pm 0.02R_\odot$, $A = 0.74 \pm 0.05R_\odot$ и $i \sim 90^\circ$; для CSS081231: $M_1 = 0.86 \pm 0.08M_\odot$, $M_2 =$

$0.18 \pm 0.02 M_{\odot}$, $R_2 = 0.20 \pm 0.03 R_{\odot}$, $A = 0.8 \pm 0.03 R_{\odot}$ и $i = 79 \pm 0.3^{\circ}$. Отметим, что для двух последних объектов использовалась новая методика учета вращения красного карлика по модельным спектрам эффектов переизлучения. Это позволило привести значение амплитуды лучевых скоростей к центру масс вторичного компонента.

- По спектральным линиям построены доплеровские карты. Показано, что основными областями их излучения являются поверхность красного карлика и струя перетекающего вещества вблизи точки Лагранжа. При высоком темпе аккреции зарегистрирована область разреженного газа вблизи поверхности белого карлика. Она обладает большой дисперсией скоростей и прежде всего проявляется в крыльях эмиссионных линий.
- Показано, что в отдельных системах могут происходить изменения спектральных характеристик при неизменном блеске в полосе V .
- В результате сравнительного анализа циклотронных гармоник в спектрах объекта CSS081231 с теоретическими моделями найдены параметры аккреционной колонны: $B = 31 - 34$ МГц, $T_e = 10 - 12$ кэВ, $\theta = 80^{\circ} - 90^{\circ}$ и $\Lambda = 10^5$, где B – напряженность магнитного поля, T_e – температура плазмы, θ – угол наклона магнитной оси к лучу зрения и Λ – безразмерный параметр, зависящий от геометрической толщины излучающей области.

Автор выражает благодарность научному руководителю **Борисову Николаю Владимировичу**, **В.Л. Афанасьеву** и **А.В. Моисееву** за помощь в обработке данных SCORPIO и других полезных наставлений, **О.И. Спиридоновой**, **В.П. Горанскому** и **А.А. Москвитину** за помощь при проведении наблюдений на Цейсс-1000, **В.В. Власюку** за поддержку работы и полезные обсуждения. Отдельная благодарность **В.В. Шиманскому** и **А.И. Колбину** за помощь в проведении расчетов теоретических спектров. Сотрудникам лаборатории обеспечения наблюдений за поддержку работы в течение всего периода выполнения и всем сотрудникам обсерватории, которые так или иначе были причастны.

И в первую очередь автор благодарен жене Вере и сыну Эрнесту и остальным членам семьи, которые заряжали меня энергией, радовали и веселили, когда я уходил работать в ночное и неурочное время.

Литература

1. I. R. Tuohy, K. O. Mason, G. P. Garmire, and F. K. Lamb, *Astrophys. J.* **245**, 183 (1981).
2. S. B. Howell, *Publ. Astron. Soc. Japan* **53**, 675 (2001).
3. B. Kalomeni, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422**, 1601 (2012).
4. M. Livio and J. E. Pringle, *Astrophys. J.* **427**, 956 (1994).
5. Z. Dai, S. Qian, and L. Li, *Astrophys. J.* **774**, 153 (2013).
6. N. F. Voikhanskaya, *Soviet Astronomy Letters* **13**, 250 (1987).
7. J. Patterson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 209 (1994).
8. H. Ritter and U. Kolb, *Astron. and Astrophys.* **404**, 301 (2003).
9. B. Warner, *Cambridge Astrophysics Series* **28** (1995).
10. H. C. Spruit, *ArXiv Astrophysics e-prints* (1998).
11. M. Cropper, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **236**, 935 (1989).
12. K. J. van der Heyden, S. B. Potter, and D. A. H. Buckley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **333**, 241 (2002).
13. J. Lafler and T. D. Kinman, *Astrophys. J. Suppl.* **11**, 216 (1965).
14. J. Bailey, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **197**, 31 (1981).
15. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
16. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).

17. W. Krzeminski and K. Serkowski, *Astrophys. J.* **216**, L45 (1977).
18. R. Giacconi, S. Murray, H. Gursky, et al., *Astrophys. J.* **178**, 281 (1972).
19. S. Tapia, *IAU Circ.***2987** (1976).
20. S. Tapia, *Astrophys. J.* **212**, L125 (1977).
21. G. D. Schmidt, H. S. Stockman, and B. Margon, *Astrophys. J.* **243**, L157 (1981).
22. D. W. Latham, J. Liebert, and J. E. Steiner, *Astrophys. J.* **246**, 919 (1981).
23. D. T. Wickramasinghe and B. Martin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **212**, 353 (1985).
24. S. Tapia, *IAU Circ.***3054** (1977).
25. S. Tapia, *IAU Circ.***3327** (1979).
26. N. F. Vojkhanskaya, *Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **30**, 3 (1990).
27. M. Cropper, *Space Sci. Rev.***54**, 195 (1990).
28. M. Cropper, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **222**, 853 (1986).
29. G. D. Schmidt, H. S. Stockman, and S. A. Grandi, *Astrophys. J.* **271**, 735 (1983).
30. K. O. Mason, K. A. Jensen, P. G. Murdin, et al., *Astrophys. J.* **264**, 575 (1983).
31. J. Middleditch, *Astrophys. J.* **257**, L71 (1982).
32. Gopal-Krishna, A. R. Patnaik, and H. Steppe, *Astron. and Astrophys.* **123**, 107 (1983).
33. P. Young and D. P. Schneider, *Astrophys. J.* **230**, 502 (1979).
34. J. B. Hutchings, D. Crampton, and A. P. Cowley, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **97**, 423 (1985).
35. M. P. Diaz and J. E. Steiner, *Astron. and Astrophys.* **283**, 508 (1994).

36. R. E. Mennickent, M. P. Diaz, and J. Arenas, *Astron. and Astrophys.* **352**, 167 (1999).
37. N. Visvanathan and D. T. Wickramasinghe, *IAU Circ.***3340** (1979).
38. N. Visvanathan and D. T. Wickramasinghe, *Nature* **281**, 47 (1979).
39. H. S. Stockman, J. Liebert, and H. E. Bond, in *IAU Colloq. 53: White Dwarfs and Variable Degenerate Stars*, Edited by H. M. van Horn and V. Weidemann (1979), pp. 334–340.
40. D. T. Wickramasinghe and N. Visvanathan, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **191**, 589 (1980).
41. G. Chanmugam, *Astrophys. J.* **241**, 1122 (1980).
42. D. T. Wickramasinghe and S. M. A. Meggitt, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **198**, 975 (1982).
43. K. Aizu, *Progress of Theoretical Physics* **49**, 1184 (1973).
44. R. E. Rothschild, D. E. Gruber, F. K. Knight, et al., *Astrophys. J.* **250**, 723 (1981).
45. N. E. White, *Astrophys. J.* **244**, L85 (1981).
46. K. Beuermann, *Astrophys. and Space Sci.* **131**, 625 (1987).
47. J. Heise, R. Mewe, A. Kruszewski, et al., *Physica Scripta Volume T* **7**, 115 (1984).
48. J. P. Osborne, J.-M. Bonnet-Bidaud, S. Bowyer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **221**, 823 (1986).
49. A. R. King and J. P. Lasota, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **188**, 653 (1979).
50. K. O. Mason, *Space Sci. Rev.***40**, 99 (1985).
51. J. P. Osborne, K. Beuermann, P. Charles, et al., *Astrophys. J.* **315**, L123 (1987).
52. K. Beuermann and L. Stella, *Space Sci. Rev.***40**, 139 (1985).

53. D. Q. Lamb and J. Patterson, *Science* **230**, 802 (1985).
54. K. Mukai, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **232**, 175 (1988).
55. J. Frank, A. R. King, and D. J. Raine, *Accretion power in astrophysics* (1985).
56. M. Milgrom and E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **196**, 583 (1975).
57. M. G. Watson, in *The Physics of Accretion onto Compact Objects*, Edited by K. O. Mason, M. G. Watson, and N. E. White (1986), *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, vol. 266, p. 97.
58. D. Q. Lamb and A. R. Masters, *Astrophys. J.* **234**, L117 (1979).
59. J. Kuijpers and J. E. Pringle, *Astron. and Astrophys.* **114**, L4 (1982).
60. K. M. G. Silva, C. V. Rodrigues, and J. E. R. Costa, *ArXiv e-prints* (2011).
61. K. M. G. Silva, C. V. Rodrigues, J. E. R. Costa, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432**, 1587 (2013).
62. S. Potter, E. Romero-Colmenero, and D. A. H. Buckley, *Astronomische Nachrichten* **325**, 201 (2004).
63. J. E. R. Costa and C. V. Rodrigues, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **398**, 240 (2009).
64. G. H. Tovmassian, P. Szkody, J. Greiner, et al., *Astron. and Astrophys.* **379**, 199 (2001).
65. R. K. Campbell, T. E. Harrison, and S. Kafka, *Astrophys. J.* **683**, 409 (2008).
66. W. H. Baumgartner, J. Tueller, C. B. Markwardt, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **207**, 19 (2013).
67. A. J. Bird, A. Bazzano, L. Bassani, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **186**, 1 (2010).
68. J. Greiner and G. A. Richter, *Astron. and Astrophys.* **575**, A42 (2015).
69. D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., et al., *Astron. J.* **120**, 1579 (2000).
70. A. J. Drake, S. G. Djorgovski, A. Mahabal, et al., *Astrophys. J.* **696**, 870 (2009).

71. P. Szkody, M. E. Everett, S. B. Howell, et al., *Astron. J.* **148**, 63 (2014).
72. A. R. Witham, C. Knigge, A. Aungwerojwit, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **382**, 1158 (2007).
73. V. L. Afanasiev and V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **67**, 438 (2012).
74. R. Schwarz, J. Greiner, G. H. Tovmassian, et al., *Astron. and Astrophys.* **392**, 505 (2002).
75. A. M. Zubareva, E. P. Pavlenko, M. V. Andreev, et al., *Astronomy Reports* **55**, 224 (2011).
76. D. V. Denisenko and K. V. Sokolovsky, *Astronomy Letters* **37**, 91 (2011).
77. E. Pavlenko, K. Sokolovsky, A. Baklanov, et al., *The Astronomer's Telegram* **3436** (2011).
78. T. Kryachko, A. Samokhvalov, and B. Satovskiy, *Information Bulletin on Variable Stars* **5952** (2010).
79. Maehara, *vsnet-alert* **10876** (2009).
80. M. Templeton, A. Oksanen, D. Boyd, et al., *Central Bureau Electronic Telegrams* **1652** (2009).
81. K. Thorne, P. Garnavich, and K. Mohrig, *Information Bulletin on Variable Stars* **5923** (2010).
82. N. Katysheva and S. Shugarov, *Memorie della Società Astronomica Italiana* **83**, 670 (2012).
83. A. U. Landolt, *Astron. J.* **104**, 340 (1992).
84. D. V. Denisenko, A. J. Drake, S. G. Djorgovski, et al., *Astronomy Letters* **37**, 858 (2011).
85. M. Cropper, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **228**, 389 (1987).
86. K. Beuermann, L. Stella, and J. Patterson, *Astrophys. J.* **316**, 360 (1987).

87. R. C. Bohlin, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts #188* (1996), *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 28, p. 910.
88. S. B. Howell, L. A. Nelson, and S. Rappaport, *Astrophys. J.* **550**, 897 (2001).
89. C. Knigge, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **373**, 484 (2006).
90. M. Plavec, *Astrophys. and Space Sci.* **1**, 239 (1968).
91. A. D. Schwope, H. C. Thomas, and K. Beuermann, *Astron. and Astrophys.* **271**, L25 (1993).
92. R. Downes, R. F. Webbink, and M. M. Shara, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **109**, 345 (1997).
93. J.-H. Wu, Y. Chen, X.-T. He, et al., *Chinese J. Astron. and Astrophys.* **1**, 57 (2001).
94. D. V. Denisenko, R. A. Sunyaev, Z. Aslan, and I. Khamitov, *The Astronomer's Telegram* **652** (2005).
95. P. Rodriguez-Gil, J. Casares, C. Zurita, et al., *The Astronomer's Telegram* **666** (2005).
96. D. V. Denisenko, M. N. Pavlinsky, R. A. Sunyaev, et al., *Astronomy Letters* **32**, 252 (2006).
97. M. K. Abubekеров, E. A. Antokhina, A. M. Cherepashchuk, and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **50**, 544 (2006).
98. V. V. Shimansky, N. V. Borisov, and N. N. Shimanskaya, *Astronomy Reports* **47**, 763 (2003).
99. N. A. Sakhibullin, *Trudy Kazanskaia Gorodkoj Astronomicheskoy Observatorii* **48**, 9 (1983).
100. P. P. Eggleton, *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983).
101. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).

102. G. D. Schmidt, P. Szkody, L. Homer, et al., *Astrophys. J.* **620**, 422 (2005).
103. F. Verbunt, E. P. J. van den Heuvel, T. J. van der Linden, et al., *Astron. and Astrophys.* **86**, L10 (1980).
104. G. Ramsay and P. J. Wheatley, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **301**, 95 (1998).
105. N. A. Sakhibullin and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **40**, 723 (1996).
106. D. V. Ivanova, N. A. Sakhibullin, and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **46**, 390 (2002).
107. V. F. Suleimanov, *Astronomy Letters* **22**, 92 (1996).
108. E. Anders and N. Grevesse, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**, 197 (1989).
109. K. Horne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **213**, 129 (1985).
110. J. A. Panei, L. G. Althaus, and O. G. Benvenuto, *Astron. and Astrophys.* **353**, 970 (2000).
111. T. R. Marsh and K. Horne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **235**, 269 (1988).
112. A. D. Schwope, K.-H. Mantel, and K. Horne, *Astron. and Astrophys.* **319**, 894 (1997).
113. R. Mahadevan, R. Narayan, and I. Yi, *Astrophys. J.* **465**, 327 (1996).
114. D. T. Wickramasinghe and L. Ferrario, *Astrophys. J.* **334**, 412 (1988).
115. A. D. Schwope and K. Beuermann, *Astron. and Astrophys.* **238**, 173 (1990).
116. M. Cropper and K. Horne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **267**, 481 (1994).
117. S. B. Potter, M. Cropper, and P. J. Hakala, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **315**, 423 (2000).