ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Б.Н.ЕЛЬЦИНА»

На правах рукописи УДК 524.3

Горда Станислав Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, ЭВОЛЮЦИОННОГО СТАТУСА И КОНФИГУРАЦИИ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ЗАТМЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД МЕТОДАМИ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ АСТРОНОМИИ

1.3.1 — физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук

Екатеринбург – 2023

Оглавление

Введен	Зведение		
Глава 1	. Эмпи	рические зависимости между физическими параметрами	
3Be 3	звезд на основе данных РГП систем 3		
1.1	Линей	ная регрессия при наличии шума в аргументе	
	Основ	ные положения	40
1.2	Линей	ная регрессия при наличии шума в аргументе	
	Практ	ическая реализация	46
1.3	Эмпиј	рические зависимости «Масса — Светимость» и «Масса	
	– Ради	чус» для звезд главной последовательности – компонен-	
	тов за	тменных двойных систем	52
1.4	Эмпиј	рические зависимости «Масса — Светимость» и «Масса	
	— Рад	циус» и «Macca — Спектр» с учетом звезд малых масс	59
1.5	Обсуж	кдение результатов и выводы	67
1.6	Положения, выносимые на защиту		69
Глава	2. Ком	плексное исследование трех тесных двойных систем с	
мас	сивным	и компонентами ранних спектральных классов	71
2.1	Скане	рное Φ отометрическое исследование SZ Cam (ADS 2984B)	74
	2.1.1	Сканерные Фотометрическое наблюдения SZ Cam в	
		Коуровской обсерватории	74
	2.1.2	Малоамплитудные колебания блеска SZ Cam	82
2.2	Спект	ральное исследование SZ Cam	85
2.3	Параметры относительной орбиты третьего тела в системе		
	SZ Ca	m	90

	2.3.1	Основные соотношения
	2.3.2	Спекл-интерферометрия SZ Cam
	2.3.3	Аппроксимация световой кривой $O-C$ 95
	2.3.4	Определение полного набора параметров относитель-
		ной орбиты третьего тела
	2.3.5	Оценки массы третьего тела и расстояния до SZ Cam 100
2.4	Крива	ая лучевых скоростей ADS 2984 А
	2.4.1	Спектральные наблюдения ADS 2984 A 104
	2.4.2	Определение значения периода ADS 2984 A 105
	2.4.3	Разделение профилей спектральных линий на два
		компонента
	2.4.4	Доказательства наличия звездного ветра и оценка ско-
		рости осевого вращения яркого компонента ADS 2984 A114
2.5	Обсуж	кдение результатов и выводы
2.6	Полох	кения, выносимые на защиту

Глава	3. Спектрофотометрия двух тесных двойных систем с	
мас	сивными компонентами раннего спектрального класса,	
нах	одящихся на разных этапах эволюционного развития	124
3.1	Определение масс компонентов UU Cas	125
	3.1.1 Сведения о ТДС UU Cas	125
	3.1.2 Кривые лучевых скоростей компонентов UU Cas	128
3.2	Эволюционный статус UU CAS	137
3.3	Доплеровская томография UU Cas	142
3.4	Спектральное исследование СС Cas	151
3.5	Обсуждение результатов и выводы	158
3.6	Положения, выносимые на защиту	162

Глан	за 4.]	Исследование пятенной активности компонентов дву	X		
короткопериодических тесных двойных систем типа W UMa 163					
4.1	Некот	торые сведения о системах типа W UMa и AM Leo в			
	частн	ости	165		
	4.1.1	Современное представление о системах типа W UMa	165		
	4.1.2	Сведения о системе АМ Leo	167		
4.2	Спект	рофотометрия AM Leo	169		
	4.2.1	Наблюдения и предварительная обработка	169		
	4.2.2	Кривые лучевых скоростей	172		
4.3	Парам	летры системы AM Leo, найденные по фотометриче-			
	СКИМ	наблюдениям 2015г	178		
4.4	Измен	нение периода AM Leo	185		
4.5	Малоа	амплитудные внезатменные изменения блеска АМ Leo			
	на до.	лговременном промежутке, как проявления изменений			
	магни	тного поля компонентов	192		
	4.5.1	Долговременные изменения общего блеска системы .	192		
	4.5.2	Изменения блеска системы АМ Leo в максимумах и			
		минимумах кривой блеска	198		
	4.5.3	Изменения внезатменного блеска системы АМ Leo,			
		как проявления активности магнитного поля компо-			
		нентов	200		
4.6	Возмо	жная периодичность пятенной активности новой			
	затме	нной переменной типа W UMa GSC 3599-2569	206		
	4.6.1	Параметры системы GSC 3599-2569, найденные по			
		наблюдениям 2009 - 2013 годов	206		
	4.6.2	Изменение внезатменного блеска GSC 3599-2569 за			
		весь период наблюдений	218		
4.7	Обсух	кдение результатов и выводы	224		
4.8	Полох	кения, выносимые на защиту	226		

Глава 5	. Фотометрический мониторинг V645 Cyg и новых переменны	X
звезд в ее окрестности		
5.1	Долговременное изменение блеска и цвета звезды Ae/Be	
	Хербига - молодой переменной звезды неправильного типа	
	V645 Cyg	229
5.2	Новые переменные звезды с большим инфракрасным избыт-	
	ком в ближайшей окрестности V645 Cyg	236
5.3	Параметры и эволюционный статус новой затменной пере-	
	менной звезды ЗUC 281-203711 (V3157 Cyg)	243
5.4	Обсуждение результатов и выводы	250
5.5	Положения, выносимые на защиту	252
Заключение		253
Прилох	Приложение 1	
Приложение 2		258
Приложение 3		267
Литература		274

Введение

Актуальность темы диссертации

Переменные звёзды играют весьма существенную роль в понимании строения и эволюции звезд и в тоже время являются важным инструментом их исследования. Определенная часть переменных звезд является двойными системами. Около ста мллиардов звезд составляют Нашу Галактику и более половины из них - это двойные и кратные системы. Среди них порядка 10% являются кратными системами [1, 2]. Эволюция достаточно тесных двойных звезд, вследствие взаимодействия компонентов, на определенном этапе их эволюционного развития идет по несколько иному сценарию, чем у одиночных звезд. В этом смысле они являются своеобразными лабораториями по изучению такого не свойственного одиночным звездам эволюционного развития. До последнего времени определенный тип переменных звезд - затменные переменные двойные системы, относящиеся к классу тесных двойных систем (ТДС), являлись основным источником наших знаний, главным образом, о массах и радиусах звезд.

К началу 70-х прошлого века было сформировано строгое определение тесной двойной системы [3], основанное на обмене веществом в процессе взаимодействия между комопонентами, а, следовательно, влиянии одного компонента на эволюцию другого [4]. Была создана классификация ТДС по степени заполнения компонентами своих полостей Роша [5,6], принятая, вместе с морфологической классификацией по типам кривых блеска, за основу классификации ТДС в Общем Каталоге Переменных Звезд (ОКПЗ, GCVS) [7,8].

В результате был достигнут большой прогресс в понимании природы

и эволюционного статуса большого числа типов тесных двойных систем. Особенно большие успехи были достигнуты в изучении систем с релятивистскими компонентами (компонентом). Природу таких явлений, связанных с выделением огромного количества энергии ($E = 10^{46}$ эрг), например, как Новые Звезды, удалось понять только после того, как было достигнуто понимание их принадлежности к ТДС, одним из компонентов которых являетсяся белый карлик, накапливающий вещество соседа - обычной звезды - до момента термоядерного взрыва на своей поверхности [9–12]. Еще более грандиозное явление, как вспышка Сверхновой типа Іа, сопровождающаяся выделением энергии до $(E = 10^{51} \, \text{эрг})$, связано с термоядерным взрывом, но уже всего белого карлика, тоже являющегося компонентом ТДС. Не так давно на основе вспышек Сверновых типа Ia, зарегистрированных в других галактиках, находящихся на различных Z, был обнаружен эффект ускоренного расширения Вселенной [13, 14]. Обязательным наличием в качестве компонента ТДС белого карлика объясняется природа таких типов переменых звезд, как катаклизмические переменные, карликовые новые, новоподобные звезды и др. Природа так называемых рентгеновских переменных объясняется присутствием в составе ТДС нейтронных звезд, аккрецирующих вещество нормальной звезды. Таким образом, тесные двойные системы являются своеобразными лабораториями, позволяющими изучать релятивистские объекты, которые трудно обнаружить из-за их низкой светимости в изолированном состоянии. В этом смысле проблема изучения тесных двойных звезд является весьма актуальной.

Циклическое движение компонентов двойных звезд по взаимным орбитам позволяет, вследствие эффекта Допплера, определять, посредством построения кривых лучевых скоростей, получаемых из спектральных наблюдений, амплитуду изменения лучевых скоростей компонентов, т.е. получить привязку к размерности скорости [км· c^{-1}], правда с точностью до множителя sin *i*. Отсюда, используя третий закон Кеплера, можно определить значения масс компонентов и размеры больших полуосей орбит, правда с точностью до множителей $\sin^3 i$ и $\sin i$, соответственно. В свою очередь, если тесная двойная звезда является затменной переменной, угол наклона плоскости орбиты к картинной плоскости *i*, а также относительные размеры компонентов, можно определить из анализа кривой блеска [15]. Таким образом, как уже отмечалось выше, исследование затменных переменных звезд, являющихся тесными двойными системами, позволяет определить, по крайней мере, значения масс и радиусов звезд, явяющихся компонентами этих ТДС, а также размеры их орбит.

Большое значение для проверки тех и или иных эволюционных теорий звезд имеют эмпирические зависимости между физическими параметрами звезд, которые строятся на основе наблюдательных данных (классический пример - диаграмма Герцшпрунга-Рессела [16–18]). Первые эмпирические зависимости, такие как Масса — Светимость были построены еще в первой половине прошлого века на основе данных, полученных при исследовании широких двойных звезд и некоторых ТДС [19–23]. На основе значительно более точных наблюдательных данных, позднее были получены более новые, улучшенные эмпирические зависимости «Масса — Светимость», «Масса — Радиус» и «Масса — Спектр» (см., например, [24, 25]). Это также делает тему исследования затменных переменных звезд весьма актуальной, особенно в настоящее время.

Следует отметить, что наиболее полный обзор результатов исследований затменно-переменных звезд и методов их исследования, полученных в последнее время, приведен в двух-томной монографии А. М. Черепащука [26, 27].

С увеличением собирающей способности современных телескопов, развитием компьютерной техники, увеличением скорости вычислений, объемов используемой оперативной памяти, развитием техники программирования и внедрения, на основе этого, новых методов наблюдений и обработки

8

полученного материала, в последнее время был достигнут огромный прогресс в исследовании практически любых астрономических объектов и затменных переменных звезд, в частности. Этому же способствовало и развитие светоприемной аппаратуры. Повсеместное оснащение телескопов почти идеальными приемниками излучения - ПЗС-камерами, автоматизация процессов наблюдений, а также интернет или спутниковая связь значительно упростили процесс получения качественного наблюдательного материала, его точной привязки к стандартной шкале времени.

Сейчас появилась возможность даже на небольших обсерваториях, имеющих телескопы с оптикой малых и умеренных размеров, проводить астрономические исследования, которые еще 20 - 25 лет назад были возможны только на крупных телескопах. К тому же, на таких обсерваториях возможно проведение долговременного исследования какого-нибудь одного объекта, и получение наблюдательного материала такого объема, равномерно распределенного во времени, который невозможно получить на больших обсерваториях из-за загруженности крупных телескопов задачами исследования глубокого космоса, стоящими на переднем крае науки, а также дороговизны наблюдательного времени на них.

В настоящее время с помощью автоматизированных телескопов созданы и представлены на сайтах сети интернет каталоги большого объема фотометрических и спектральных данных, например, проекты SDSS, ASAS [28, 29] и другие. Однако представленная в них информация по одному объекту, за немногими исключениями, получается, как правило, в течение достаточно коротких интервалов времени. Это связано с тем, что такие телескопы производят обзоры всего неба, а не концентрируются на исследовании одного объекта. По данным таких каталогов открыты десятки тысяч переменных звезд, но получить мониторинговую информацию по конкретному, избранному объекту зачастую не представляется возможным. В этой связи мониторинговые наблюдения на малых обсерваторих не

9

потеряли своей актуальности до настоящего времени.

Длительные мониторинговые наблюдения позволяют подтвердить на более обширном материале выводы, сделанные на основе кратковременных исследований объектов, зачастую значительно уточнив или существенно поправив результаты предыдущих исследований. А в некоторых, достаточно частых случаях, обнаружить существенно новые особенности объектов (звезд), проявляющие себя на достаточно длительных интервалах времени.

Так, например, исследование так называемых магнитных звезд, в частности изменений магнитной активности компонентов короткопериодических контактных тесных двойных систем типа W UMa возможно только при продолжительности мониторинга изменений блеска системы на временах порядка десятка(ов) лет [30]. В то время как точные значения физических и орбитальных параметров компонентов таких систем можно найти по наблюдениям всего нескольких ночей, поскольку периоды орбитального движения составляют несколько часов. Исследование изменения магнитной активности звезд важно в плане сопоставления с 11-летним циклом Солнечной активности для более полного понимания процессов пятенной активности Солнца.

Важную роль в формировании и эволюции структуры Галактики играют массивные звёзды, как образовавшиеся отдельно, так и входящие в состав ТДС. Наше понимание процессов их образования и ранних стадий эволюции по-прежнему неполно. Одна из причин состоит в том, что эволюция массивных звёзд происходит внутри газопылевой оболочки, которая не успевает рассеяться за время их формирования. Оптическое и инфракрасное излучение молодой массивной звезды скрыто полностью или частично этой оболочкой, что затрудняет наблюдение ранних стадий её образования и эволюции по сравнению с маломассивными звёздами [31]. Такие исследования для получения значимого результата требуют также длительного времени наблюдений. В предыдущие 20-25 лет был достигнут большой прогресс в плане понимания и теоретического изучения процессов переноса вещества между компонентами ТДС. Так трехмерное моделирование данного процесса показало наличие определенных газовых структур, которые могут изменяться во времени при образовании и развитии аккреционного диска вокруг одного из компонентов, о существовании которых не подозревали ранее [32]. Подтверждение наличия этих структур, влияние которых может определенным образом отражаться, например, на кривых блеска или профилях спектральных линий в спектрах взаимодействующих тесных двойных систем, позволяет проверить адекватность теоретических моделей действительной природе газодинамической структуры в ТДС.

В этой связи очень перспективен развитый сравнительно недавно, но уже повсеместно использующийся в изучении ТДС, метод Допплеровской звездной томографии [33, 34]. Метод основан на определении пространственной структуры элементов ТДС путем сопоставления поля скоростей компонентов и газовых структур на соответствующих фотометрических фазах. Источником данных здесь являются ряды спектральных данных изучаемых ТДС, в ходе обработки которых и получают допплеровские значения скоростей компонентов ТДС и газовой структуры путем разделения бленд спектральных линий на отдельные составляющие. Таким образом, особую актуальность применительно к решению задачи определения газовой структуры ТДС приобретают мониторинговые спектральные наблюдения отдельного объекта (ТДС) с целью получения достаточно объемного ряда спектральных данных на возможно более подробной сетке фотометрических фаз.

У определенного числа тесных двойных систем были обнаружены близкие спутники, так называемые третьи тела. По существу, эти системы относятся к классу кратных систем. Такая конфигурация способна коренным образом влиять на эволюцию ТДС, например, в плане изменения

11

периода системы и других параметров орбиты компонентов данной ТДС. Поэтому исследование таких систем является важной задачей. Определение фотометрических и позиционных характеристик третьих тел ТДС часто осуществляется методом спеклинтерферометрии [35–37], предложенным еще в середине 70-х годов прошлого века.

Таким образом, задача комплексного исследования тесных двойных систем с одновременным применением различных методов наблюдений с целью получения многопланового наблюдательного материала, например, фотометрического, спектрального, спеклинтерферометрического и т.д., а также использование современных методов его дальнейшей обработки с целью определения физических параметров, конфигурации или эволюционного статуса данной ТДС, сейчас становится вполне реализуемой. Этому же способствует и быстрое увеличение вычислительной мощности компьютерной техники, как в плане автоматизации управляющей функции телескопа и принимающей аппаратуры, так и обработки получаемого материала.

В данной диссертационной работе приведены результаты исследования затменных переменных звезд, являющихся компонентами тесных двойных систем, некоторые особенности которых долгое время оставались не до конца ясными и спорными, главным образом, либо из-за отсутствия достаточного наблюдательного материала, полученного на длительном временном интервале, либо по причине его однотипности.

Соискателем (в дальнейшем автором) был поставлен ряд целей, достижение которых позволяет углубить наше понимание в строении и эволюции тесных двойных, а также молодых массивных, звёзд и вещества, окружающего их.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений. Число страниц в диссертации 303, рисунков 64, таблиц 48. Список литературы содержит 254 наименования.

Во Введении представлен краткий обзор содержания диссертации, объектов исследования, описана актуальность диссертационной работы, цели, задачи, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлена информация по апробации результатов, научным публикациям по результатам исследований соискателя и его вкладе.

Глава 1:

Представлена разработанная автором процедура коррекции коэффициентов линейной регрессии при наличии ошибок в аргументе. Показано, что только на основе информации о величине отношения дисперсий ошибок функции к аргументу можно практически полностью скоректировать величину коэффициента наклона прямой так, что регрессионная вилка несовпадение прямой и обратной линий регрессии (y = y(x) и x = x(y)), полностью исчезает.

На основе данных каталога фотометрических, геометрических и абсолютных элементов 112 затменных переменных звезд типа РГП с известными элементами фотометрической и спектральной орбиты [38], а также некоторых спеклинтерферометрических данных для звезд малых масс, построены зависимости «Масса – Светимость», «Масса — Радиус» и «Масса — Спектр». Искомые соотношения представлены линейными зависимостями в логарифмическом масштабе. Соответствующие параметры были найдены методом линейного регрессионного анализа.

Проведено сравнение полученных коэффициентов найденных эмпирических зависимостей с их теоретическими оценками, вычислеными на основе теории строения и эволюции звезд. Указано, что полученные в ходе выполнения данной работы зависимости используются в исследованиях различных авторов вплоть до настоящего времени.

Глава 2: Представлены результаты фотометрического и спектрального исследования четырех тесных двойных систем с массивными компонентами раннего спектрального класса. Три из них являются компонентами иерархической кратной системы, известной как визуально-двойная звезда ADS 2984, являющаяся членом рассеянного звездного скопления NGC 1502. На основе анализа кривой блеска ТДС SZ Cam (ADS 2984B) были обнаружены колебания блеска третьего тела, также являющегося тесной двойной системой. По форме кривой изменения блеска третьего тела было установлено, что в его системе затмения не наблюдаются, а колебания блеска обусловлены наличием приливной деформации компонентов (переменность типа ELL).

На основе данных спеклинтерферометрических наблюдений, выполненных на БТА САО РАН, и полученной автором кривой изменения периода системы SZ Cam впервые были определены все элементы относительной орбиты третьего тела. Найдено значение расстояния до системы SZ Cam, которое практически точно совпадает со значением, полученным на основе измерения параллакса, по данным Gaya-DR3, а также со значением расстояния до скопления NGC 1502.

На основе спектральных данных, полученных автором на оптоволоконном эшелле спектрометре 1.2-м телескопа астрономической обсерватории Уральского федерального университета, а также данных других наблюдателей, впервые найдено значение периода спектрально- двойной звезды ADS 2984A, которое, несмотря на значительный блеск звезды $m_V \sim 7^m$, не удавалось определить за почти 100 лет ее исследования. Приведены доказательства наличия значительного звездного ветра. Показано, что эта спектрально-двойная звезда относится к типу SB1. Получена оценка нижней границы массы невидимого спектрального компонента.

Глава 3: Представлены результаты спектрального исследования двух тесных двойных систем с массивными компонентами раннего спектрального класса, находящиеся на разных этапах эволюционного развития — UU Cas и CC Cas. На основе полученных автором спектральных данных

UU Cas впервые найдены значения лучевых скоростей вторичного компонента. Получено спектроскопическое (динамическое) отношение масс компонентов, значение которого оказалось инверсным по отношению к фотометричеким определениям. Полученное значение массы вторичного компонента оказалось больше массы главного, более яркого, компонента. На основе полученных автором спектральных данных и применения метода Допплеровской томографии были выделены основные элементы газовой структуры переноса вещества в системе. Сделан вывод о том, что ТДС UU Cas находится на завершающей стадии первого обмена веществом в системе, а не в ее начале, как считалось ранее, когда принятое значении отношения масс компонентов, найденное по данным фотометрии, считалось прямо противоположным.

Представлены результаты спектральных исследований затменной переменной звезды с массивными компонентами раннего спектрального класса СС Саs, впервые выполненные с применением ПЗС-приемника. Отмечено, что это второе исследование СС Саs, в котором измерены лучевые скорости вторичного компонента, причем в данном исследовании величина разброса точек на кривой лучевых скоростей получилась в 2.5 раза меньше, чем в предыдущем исследовании с использованием ретикона в качестве светоприемного устройства.

Глава 4: Приводятся результаты долговременного фотометрического и спектрального мониторинга двух контактных тесных двойных систем типа W UMa - AM Leo и новой переменной GSC 3599–2569, открытой автором в 2013г.

Обнаружены циклические колебания блеска малой амплитуды с периодами 7.6 ± 0.3 года у переменной AM Leo и 3.3 ± 0.1 года у переменной GSC 3599–2569, не связанные с явлениями затмений и приливными деформациями компонентов и объясняемые наличием больших по площади темных или светлых областей (пятен), присутствующих на поверхности этих звезд вследствие наличия значительных магнитных полей. Сделано предположение о наличии второго, более длительного периода изменений внезатменного блеска этих звезд, аналогичное периоду изменения амплитуды 11-летнего Солнечного цикла.

Определены, с использованием всех известных на момент выполнения исследования данных о моментах минимумов кривой блеска AM Leo, параметры световой кривой изменения периода, обусловленной вращением ее по совместной орбите с третьим телом. Найдено новое, относительно предыдущих определений, значение орбитального периода и эксцентреситета орбиты. По данным о моментах минимумов, полученных в последние 20 лет по фотометрическим наблюдениям, выполненных на ПЗС-камерах, обнаружены малоамплитудные циклические колебания периода ТДС AM Leo практически с тем же значением периода осциляций, что и внезатменные изменения блеска. Сделано предположение, что механизмом таких изменений также может являться процесс изменения магнитного поля конвективных оболочек компонентов, приводящий к малоамплитудным периодическим изменениям периода (эффект Эпплгейта).

Глава 5: Представлены результаты многолетнего фотометрического и спектрального мониторинга молодой массивной звезды V645 Суg, являющейся объектом Ве Хербига. Обнаружено значительное увеличение блеска звезды за последние двенадцать лет на полторы зв.вел. в фильтре I и на одну зв. вел. в фильтре R. Сделано предположение, что причиной поярчания звезды является утончение или разрывы в газово-пылевом коконе, окружающем эту молодую звезду. Данное предположение основано на факте отсутствия корреляции между изменением блеска звезды в фильтре Rи изменением эквивалентной ширины профиля линии H_{α} , что может служить основанием считать видимое увеличение блеска звезды следствием увеличивающейся в направлении на наблюдателя площади пылевой составляющей первоначального кокона, прогретого звездой (непрерывное излучение).

На основе анализа ПЗС-кадров в ближайшей окрестности V645 Суд обнаружены пять переменных звезд неправильного типа с большим инфракрасным избытком цвета. Сделано предположение, что по крайней мере некоторые из них являются молодыми объектами типа V645 Суд.

Представлены результаты исследования обнаруженной автором новой переменной звезды 3UC 281-20371, занесенной в каталог ОКПЗ под обозначением V3157 Суд и, расположенной в ближайшей окрестности V645 Суд. На основании формы полученной кривой блеска первоначально было сделано предположение, что звезда 3UC 281-20371 является затменнопеременной типа Алголя с полным затмением во вторичном минимуме. Методом построения синтетических кривых блеска в фильтрах V и R, были найдены относительные элементы орбиты этой ТДС. Получена оценка значения фотометрического отношения масс компонентов. ТДС состоит из более массивного, горячего главного компонента большего радиуса и холодного, меньшего по размерам, менее массивного компонента. Сделано предположение, что звезда в процессе эволюции компонентов может стать классическим Алголем.

Цели диссертационной работы

- 1. Разработать новый подход к применению процедуры коррекции коэффициентов линейной регрессии при наличии ошибок в аргументе.
- Получить зависимости между фундаментальными физическими параметрами компонентов ТДС типа Разделенных Главной Последовательности (РГП) на основе применения разработанной процедуры коррекции.
- 3. Получить на основе фотометрических данных свидетельства наличия третьего тела в системе ТДС с массивными компонентами раннего

спектрального класса SZ Cam, входящую в состав визуально-двойной системы ADS 2984 и являющуюся ярким членом рассеянного звездного скопления NGC 1502.

- 4. Определить параметры орбиты третьего тела, физические характеристики компонентов и расстояние до системы SZ Cam.
- 5. Найти параметры периодичности спектрально-двойной ТДС, являющейся компонентом визуально-двойной системы ADS 2984A.
- 6. Определить эволюционный статус ТДС с массивными компонентами раннего спектрального класса UU Cas на основе новых спектральных данных.
- 7. Установить наиболее вероятный механизм формирования газовых структур в системе ТДС UU Cas.
- Получить свидетельства циклической активности магнитного поля компонентов двух короткопериодических контактных систем типа W UMa. Определить параметры периодичности пятенной активности этих систем.
- 9. Исследовать фотометрическую активность молодой массивной звезды V645 Cyg, а также звездные объекты ближайшей ее окрестности.

Задачи

- Разработать методику и получить формулы для процедуры коррекции коэффициентов линейной регрессии при наличии ошибок в аргументе.
- 2. Создать программное обеспечение (ПО) для численного исследования процедуры коррекции коэффициентов линейной регрессии при

наличии ошибок в аргументе и определения граничных условий возможности ее применения.

- 3. Построить зависимости между фундаментальными параметрами звезд членов ТДС типа РГП систем.
- Получить оригинальный фотометрический, спектральный и спеклинтерферометрический наблюдательный материал объектов исследования.
- 5. Разработать методику определения полного набора параметров орбиты третьего тела в системе ТДС на основе использования данных спеклинтерферометрических наблюдений и данных изменения периода ТДС.
- 6. Разработать и применить методику выявления долговременных малоамплитудных колебаний внезатменного блеска ТДС, являющихся индикаторами магнитной активности компонентов.
- Получить значения динамических масс компонентов ряда ТДС ранних спектральных классов методом разделения бленд спектральных линий с учетом газовой составляющей.
- 8. Разработать методику определения периода ТДС ADS 2984A, значение которого не удавалось определить с момента классификации звезды, как спектрально-двойной.

Научная новизна

Предложен и апробирован метод коррекции коэффициентов линейной регрессии при наличии ошибок в аргументе, а также определены граничные условия его применения. Впервые получены параметры фундаментальных зависимостей между физическими параметрами звезд, с использованием предложенного автором метода коррекции. Полученные соотношения используются в научных исследованиях различными авторами на протяжении последних 20-ти лет.

На основе новых фотометрических, спектральных и спеклинтерферометрических данных, полученных автором, либо с его участием, проведено комплексное исследование ряда тесных двойных систем, в результате которого были получены новые данные о физических параметрах, эволюционном статуче и структуре этих ТДС.

В процессе анализа полученных наблюдательных данных были открыты и исследованы две новые затменные переменные звезды, а также пять новых переменных звезд с неправильным типом изменения блеска. На основе наличия избытка цвета в ближней инфракрасной области сделано предположение, что это могут быть молодые звездные объекты.

Наряду с результатами спектральных и спеклинтерферометрических исследований впервые найдены свидетельства наличия третьего тела в системе ТДС SZ Cam по фотометрическим данным, выражающиеся в существовании малоамплитудной синусоидальной волны на кривой блеска SZ Cam, являющейся следствием эффекта эллипсоидальности главного компонента третьего тела. Показано, что отсутствие затмений в системе третьего тела, являющегося тоже тесной двойной системой, не предполагает наличие компланарности орбит компонентов SZ Cam и третьего тела.

Впервые с использованием новых спеклинтерферометрических данных определены все шесть элементов орбиты третьего тела в системе SZ Cam, на основе чего была получена оценка расстояния до звезды геометрическим методом, совпадающая с оценкой расстояния, определенного, по данным Gaia DR2, до рассеянного звездного скопления NGC 1502, к которому она принадлежит. Предложенным автором методом построения кривых лучевых скоростей по линиям одного химического элемента впервые с момента открытия спектральной двойственности южного компонента ADS 2984A в 1924г. найдено значение периода этой ТДС.

На основе спектральных данных, полученных автором, найдены новые значения масс компонентов тесной двойной системы с массивными компонентами ранних спектральных классов UU Cas. Показано, что система не является сверхмассивной, как считалось ранее на основе фотометрических данных, а отношение масс компонентов — обратное найденому ранее по результатам фотометрии. Сделан вывод о новом эволюционном статусе системы. Подтверждено наличие газовых структур из-за перетекания вещества с одного компонента на другой, в частности существование плотного газового диска вокруг более массивного компонента.

Впервые на основе данных многолетних фотометрических мониторингов двух короткопериодических тесных двойных систем типа W UMa AM Leo и GSC 3599–2569 найдены периоды малоамплитудных изменений внезатменного блеска этих систем, причиной которых является пятенная активности на поверхности компонентов, вызванная циклическими изменениями магнитного поля системы, аналогично процессу Солнечной активности.

Полученные в диссертации результаты важны для понимания формирования и эволюции ТДС, относящихся к разным типам. Основные результаты могут быть использованы для сравнения теоретических исследований с полученными наблюдательными данными.

Научная и практическая значимость

За последние годы, благодаря увеличению собирающей способности современных телескопов, внедрению новых методов наблюдений и обработки полученного материала, был достигнут огромный прогресс в исследовании переменных звезд и затменных переменных звезд, в частности. Благодаря появлению больших фотометрических и спектроскопических обзоров, представления о переменных звездах существенным образом изменились. Основной прогресс был достигнут в плане понимания эволюционных переходов из одного типа ТДС в другие. Поднятию интереса к исследованию переменых звезд способствовало также повсеместное оснащение телескопов почти идеальными приемниками излучения - ПЗС-камерами - и автоматизация процессов наблюдений. Благодаря чему появилась возможность комплексного исследования переменных звезд с применением различных методов наблюдений и обработки полученного наблюдательного материала.

Изучение переменных звезд имеет большое значение для астрономии в целом и для астрофизики в частности. Переменные звезды и затменнопеременные, в частности, представляют собой уникальные лаборатории по изучению астрофизики, динамики и фундаментальной физики.

Представленная работа включает в себя исследования по многим из перечисленных выше направлений. Разработанные автором методы, программное обеспечение могут применяться другими исследователями в области исследования переменных звезд. Полученные результаты (новые наблюдательные данные, параметры компонентов ТДС, определение эволюционного статуса и т.п.) способны стать отправной точкой для новых исследований.

Научная и практическая значимость диссертации заключается в комплексном использовании различных методов наблюдений и обработки полученного материала для исследования конкретных ТДС, что позволило получить новые научные результаты, практически не прибегая к использованию крупных телескопов. Возможность проведения длительных мониторингов отдельных объектов также способствовала получению абсолютно новых научных результатов, которые не могли быть получены при кратко-

22

временном изучении ТДС.

Методология и методы исследования

Задачи диссертации решались при помощи анализа данных, полученных автором на телескопах Коуровской астрономической обсерватории УрФУ, а также на телескопах Цейсс-1000 и БТА совместно с сотрудниками САО РАН. Данные анализировались на основе общепринятых методик, или созданных автором при помощи авторского программного обеспечения, написанного на языке программирования СИ.

Личный вклад соискателя

Соискатель в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач. Им разработано оригинальное программное обеспечение для анализа наблюдательных данных, проведено необходимое тестирование. Соискателем выполнены расчёты, проанализированы полученные результаты, сформулированы выводы.

В частности, соискателем:

- Разработан метод коррекции коэффициентов линейной регрессии при наличии ошибок в аргументе с использованием только информации, содержащейся в данных.
- 2. Определены коэффициенты линейных эмпирических зависимостей между физическими параметрами звезд с применением метода коррекции при наличии ошибок в аргументе.
- 3. Предложена методика выявления малоамплитудных колебаний блеска на кривых блеска переменных звезд.
- 4. Предложен и апробирован метод определения элементов орбиты третьего тела в ТДС на основе данных спеклинтерферометрии и изме-

нений периода затменной системы.

- 5. Получены оригинальные фотометрические, спектральные и спеклинтерферометрические данные ряда затменных переменных систем.
- 6. Впервые определены физические параметры открытых автором совместно с соавторами новых переменных звезд.
- 7. Предложен новый эволюционный статус затменной переменной звезды с массивными компонентами раннего спектрального класса UU Cas.

Положения, выносимые на защиту по результатам диссертационной работы

- Предложен метод восстановления несмещенных оценок значений коэффициентов линейной регрессионной зависимости при наличии шума в аргументе, использующий только один параметр λ, определяемый исключительно по имеющемуся набору наблюдательных данных и аппробированный на основе проведенного численного эксперимента. Показано, что восстановление значения углового коэффициента линейной зависимости, найденного с применением стандартного метода наименьших квадратов, достигается с точностью не хуже 2% – 5% при наличии шума в аргументе с величиной дисперсии не более 5% от области определения функции.
- Получены на основе данных каталога РГП систем, с использованием процедуры получения несмещенных оценок параметров, эмпирические зависимости между фундаментальными параметрами звезд «Macca — Светимость», «Macca — Радиус» и «Macca — Спектр» с учетом звезд малых масс.

- Впервые на основе анализа полученных автором фотометрических данных на кривых блеска SZ Cas обнаружен эффект эллипсоидальности видимого в спектре яркого компонента третьего тела. Подтверждена, уже фотометрическим методом, двойственность третьего тела в системе SZ Cas и отсутствие затмений в тесной паре третьего тела. Впервые найдены значения всех шести элементов видимой относительной орбиты третьего тела на основе новых, полученных с участием автора, спеклинтерферометрических данных компонентов ADS 2984 и исследования изменений периода SZ Cas.
- Впервые найдено значение периода южного компонента визуальнодвойной звезды ADS 2984, которое со времени обнаружения спектральной двойственности этой ТДС не удавалось определить. Однозначно определен тип спектрально-двойной системы ADS 2984 A, как SB1. Уточнено значение периода осевого вращения видимого компонента, а также подтверждено наличие у него звездного ветра. Получена оценка массы невидимого в спектре, маломассивного компонента.
- По оригинальным спектральным данным автора впервые найдено значение динамической массы вторичного компонента полуразделенной ТДС с массивными компонентами UU Cas, оказавшегося, в противоположность данным фотометрии, массивнее главного. Сделан вывод о новом эволюционном статусе системы UU Cas, согласно которому система находится в заключительной стадии первого обмена масс. Определены основные элементы структуры переноса газовой составляющей от менее массивного донора к массивному аккретору, полученные по спектральным данным с использованием метода допплеровской томографии.
- На основе оригинальных многолетних наблюдений автора обнаружены малоамплитудные циклические колебания внезатменного блеска

и малоамплитудные колебания периода маломассивной, короткопериодической затменной переменной звезды AM Leo, относящейся к типу W UMa систем. Предложена интерпретация этих изменений в рамках модели периодического изменения магнитного поля конвективных оболочек компонентов системы, проявляющегося в изменении общего блеска системы из-за наличия пятен на поверхности компонентов, а также в изменении периода системы вследствие взаимодействия квадрупольного момента с изменяющимся магнитным полем (эффект Эпплгейта).

- Открыта новая затменная переменная звезда типа W UMa GSC 3599-2569. На основе оригинальных многолетних наблюдений автора обнаружены малоамплитудные циклические колебания ее внезатменного блеска. Предложена интерпретация этих колебаний блеска в рамках модели изменения магнитной активности компонентов этой короткопериодической системы.
- Сделан вывод об увеличении потока излучения от нагретых областей пылевых структур, окружающих молодую массивную звезду типа Ae/Be Xepбига V645 Cyg, например, уменьшении плотности остатков пылевого кокона, сделанный на основе увеличения блеска и покраснения данного объекта, обнаруженных по результатам многолетних фотометрических наблюдений данной звезды автором.
- Обнаружены в ближайшей окрестности молодой массивной звезды типа Ae/Be Xepбига V645 Cyg пять новых переменных звезд с неправильным типом переменности, имеющими большие инфракрасные избытки цвета и, возможно, являющиеся молодыми объектами.
- Обнаружена новая переменная звезда 3UC 281-20371. Установлено на основе анализа кривых блеска и определения физических параметров, что звезда является тесной двойной системой, вероятно, относя-

щейся к типу пред-Алголей. В 2021 году она была занесена в Общий Каталог Переменных Звезд под обозначением V3157 Cyg.

Апробация

Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах и представлены как на российских, так и на зарубежных конференциях и семинарах.

Основные результаты диссертации представлены в устных и стендовых докладах на следующих мероприятиях:

- 1. 27-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 2-6 февраля 1998г., Екатеринбург.
- 2. 29-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 31 января-4 февраля 2000г., Екатеринбург.
- Международная конференция «Переменные звезды ключ к пониманию строения и эволюции Галактики», посвященная 90-летию со дня рождения Б.В. Кукаркина. 25-29 октября 1999г., Россия, Москва, ГА-ИШ, МГУ.
- Международная конференция «The Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM)-2000», 29 мая - 3 июня 2000г., Россия, Москва, МГУ.
- 5. Всероссийская Астрономическая Конференция ВАК- 2001, 6-12 августа 2001г., Россия, Санкт-Петербург.
- 6. 31-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 28 января 1 февраля 2002г., Екатеринбург.
- 7. 32-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 3-7 февраля 2003г. Екатеринбург, УрГУ.

- Восьмой съезд Астрономического общества и Международный симпозиум «Астрономия – 2005 - состояние и перспективы развития», 1-6 июня 2005г., Россия, Москва, ГАИШ.
- 9. Мемориальная конференция памяти Д.Я. Мартынова и П.П. Паренаго, 22-26 мая 2006г., Россия, ГАИШ, Москва.
- 10. 35-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» 30 января 3 февраля 2006г., Екатеринбург.
- 11. Всероссийская астрономическая конференция «ВАК 2007», 17-22 сентября 2007г., Россия, Казань, КГУ.
- 12. 37-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 28 янв.- 1 фев. 2008г. Екатеринбург.
- Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010) «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз: 13-18 сентября 2010г., Россия, Нижний Архыз, САО РАН.
- 14. 40-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 31 янв.- 4 фев. 2011г. Екатеринбург.
- 15. 41-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 30 янв.- 3 фев. 2012г. Екатеринбург.
- 42-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 28 янв.- 1 фев. 2013г. Екатеринбург.
- 17. 43-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 3 — 7 февр. 2014 г. Екатеринбург.
- 44-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 2 — 6 февр. 2015 г. Екатеринбург.

- Международная конференция «Настоящее и будущее малых и средних телескопов, СМТ-2015», 19 - 22 октября 2015 г., Россия, п.Нижний Архыз, САО РАН.
- 45-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», Екатеринбург, 1 — 5 февр. 2016 г. Екатеринбург.
- 21. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия 2016», Кисловодск, 8 10 июня, 2016г.
- 22. Международная конференция «Физика звёзд: от коллапса до коллапса», САО РАН, пос. Нижний Архыз, Россия, 3 - 7 октября 2016 г.
- 23. 46-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 30 января 3 февр. 2017 г. Екатеринбург.
- 24. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия 2017», 14 16 июня 2017г, Екатеринбург.
- 25. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2017 «Астрономия: познание без границ», 17-22 сентября 2017 г., Ялта, Крым.
- 26. 47-я международная студенческая научая конференция «Физика космоса», 29 января — 2 февр. 2018 г. Екатеринбург.
- 27. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия», Астрономия - 2018, 22-26 октября 2018г., Москва, Россия
- 28. Международная конференция «Physics of Magnetic Stars», 1-5 октября 2018г., Россия, Нижний Архыз, САО РАН.
- 29. 48-й международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 28 января 1 февр. 2019 г. Екатеринбург
- Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия» ,7-11 октября 2019г., Россия, Нижний Архыз, САО РАН.

- 31. 49-й международная студенческая научная конференция «Физика космоса», 27-31 января 2020 г. Екатеринбург.
- Всероссийская конференция «Магнетизм и активность Солнца и звезд», 31 августа – 3 сентября 2021 г., Россия, ФГБУН «КРАО РАН», п.Научный.
- 33. Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти П.Е. Захаровой «Астрономия и исследование космического пространства», 1—5 февр. 2021 г., Россия, Екатеринбург.
- 34. Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых «Астрономия и исследование космического пространства», 31 января — 4 февр. 2022 г., Россия, Екатеринбург.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- Горда С. Ю., Свечников М. А. Определение эмпирических зависимостей масса-светимость и масса-радиус для звезд главной последовательности - компонентов затменных двойных систем // Астрономический Журнал. — 1998. — Т. 75.— С. 896-902.
- Горда С. Ю., Свечников М. А. Эмпирические зависимости L-M, R-M, and M-T_{eff} для звезд главной последовательности компонентов ТДС и звезд малых масс // Астрономический Журнал. — 1999. — Т. 76. — С. 598-603.
- Gorda S. Yu. UBVR-Photometry of the Eclipsing Binary SZ Cam // Information Bulletin on Variable Stars. - 2000.- Nº 4839. - Pp. 1-4.

- Gorda S. Yu. Confirmation of a Double Nature of the Third Body in SZ Cam // Information Bulletin on Variable Stars. — 2002.— Nº 5345. — Pp. 1-4.
- Gorda S. Yu., Balega Yu. Yu., Pluzhnik E. A. and Shkhagosheva Z. U Visual orbit of the third body on the eclipsing binary SZ Cam // Astronomical and Astrophysical Transactions. — 2007. — V. 26. — Pp. 145-146.
- Gorda S. Yu., Balega Yu. Yu., Pluzhnik E. A. and Shkhagosheva Z. U Parameters of the apparent relative orbit of the third body in the SZ Cam system. // Astrophysical Bulletin. — 2007. V. 62. — Pp. 352-359.
- Горда С. Ю. Новая спектрофотометрия SZ Сат (проблема третьего компонента). // Письма в Астрономический Журнал. — 2008. — Т. 34. — С. 351-361.
- Gorda S. Yu., Sobolev A. M. First solution of the light curve of the new variable star 3UC 281-20371. // Information Bulletin on Variable Stars. 2012. Nº 6036. Pp. 1-5.
- Gorda S. Yu. CCD spectrophotometry of CC Cas. I. Radial velocity curves. // Astrophysical Bulletin. — 2013. — V. 68. — Pp. 101-106.
- Sobolev A. M., Gorda S. Yu. and Davydova O. A. Discovery of irregular variability of five stars in the vicinity of the young stellar object V645 Cygni. // Information Bulletin on Variable Stars. — 2013. — Nº 6061. Pp. 1-6.
- Gorda S. Yu. 30 years of observations of eclipsing variable stars, Astronomical and Astrophysical Transactions. - 2014. - V. 28. -Pp. 245-248.

- 12. Gorda S. Yu., Lyaptsev A. P. and Sobolev A. M. Spot activity of the new W UMa-type variable GSC3599-2569 // Astrophysical Bulletin. — 2015. — V. 70. — Pp. 109-116.
- Горда С. Ю. Результаты долговременного мониторинга кратной системы SZ Cam // Письма в Астрономический Журнал. 2015. Т. 41. С. 303-316.
- 14. Gorda S. Yu. Spectrometric and photometric study of the eclipsing variable AM Leo // Astrophysical Bulletin. -2016. V. 71. Pp. 64-74.
- Горда С. Ю. Кривая лучевых скоростей спектрально-двойной HD 25639 (ADS 2984A). // Письма в Астрономический Журнал. — 2016. — Т. 42 — С. 762-772.
- 16. Gorda S. Yu. Eclipsing binary UU Cas: Radial-velocity curves. // Astrophysical Bulletin. — 2017. — V. 72. — Pp. 321-329.
- 17. Gorda S. Yu., Matveeva E. A. New Light-Time Curve of Eclipsing Binary AM Leo. // Information Bulletin on Variable Stars. - 2017. - Nº 6227. - Pp. 1-6.
- Kononov D. A., Gorda S. Yu. and Parfenov S. Yu. On the Gas Dynamic Features of the Interacting Binary System UU Cas. // Astrophysical Journal. — 2019. — V. 883. — Pp. 186-196.
- Горда С. Ю. Цикличность изменений внезатменного блеска и периода тесной двойной системы типа W UMa AM Leo. // Астрономический Журнал. — 2020. — Т. 97. — С. 924-938.
- 20. Gorda S. and Vatolin Y. Possible Periodic Spot Activity of the New W UMa-type Variable GSC 3599-2569. // Peremennye Zvezdy (Variable Stars). - 2021.- V. 41. - Pp. 19-26.

- 21. Hadrava P., Cabezas M., Djurasevich G., Garces J., Gorda S. Yu., Jurkovich M. I., Korchakova D., Markov H., Mennickent R. E., Petrovich J., Vince I., and Zharikov S. Spectroscopy of the massive interacting binary UU Cassiopeiae. // Astronomy and Astrophysics.— 2022.— V. 663. — A8(15).
- 22. Gorda S. Yu, Bisyarina A. P., Sobolev A. M. and Parfenov S. Yu. Long-term brightness and color variations of the young variable star V645 Cyg. // Peremennye Zvezdy (Variable Stars). 2022. V. 42 N 11. Pp. 87-105.

Другие публикации автора по теме диссертации

- Горда С. Ю. Применение метода сканирования для наблюдений переменных звезд в визуально-двойных системах //Астрономогеодезические исследования: Динамические и физические характеристики небесных тел. Сб.науч.тр. Свердловск: УрГУ — 1988. — С. 131-139.
- Горда С. Ю. К вопросу о точности сканерной фотометрии (численный эксперимент). // Астрономо-геодезические исследования: Физика и динамика звездных систем. Сб.науч.тр. Свердловск: УрГУ — 1991. — С. 119-130.
- Горда С. Ю., Свечников М. А. Эмпирические зависимости «массасветимость» и «масса-радиус» для звезд главной последовательности
 компонентов затменных двойных систем // Физика космоса: тез. докл. и сообщ.27-й междунар. студ. науч. конф., 2-6 фев. 1998г. Екатеринбург: УрГУ, 1998. С. 36.
- 4. Горда С. Ю., Свечников М. А. Эмпирические зависимости L-M, R-M, и М-Т_{eff} для звезд главной последовательности компонентов ТДС и

звезд малых масс // Физика космоса: тез. докл. и сообщ.28-й междунар. студ. науч. конф., 1-5 фев. 1999г. Екатеринбург: УрГУ, 1999. С. 41.

- 5. Горда С. Ю., Свечников М. А. Эмпирические зависимости «Масса-Светимость», «Масса-Радиус» и «Масса-Эффективная температура» для звезд главной последовательности - компонентов затменных двойных систем, включая маломассивные звезды // Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей затменных переменных звезд типа РГП и некоторые результаты его статистической обработки: сб. ст. Екатеринбург: УрГУ, 1999. С. 58-65.
- 6. Горда С. Ю. Полная кривая блеска SZ Cam (ADS 2984B) // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2000. С. 114.
- Горда С. Ю. Точная фотометрия переменных компонентов в визуальнодвойных системах (SZ Cam, AM Leo) // Переменные звезды - ключ к пониманию строения и эволюции Галактики: сб. тр. Междунар. конф. памяти Б.В. Кукаркина. М.: Н. Архыз, 2000. С. 127-131.
- Gorda S. Yu. UBVR-photometry of the eclipsing binary SZ Cam (UBVRфотометрия затменной двойной SZ Cam) // The Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM)-2000: book of abstr. M.: МГУ, 2000. P. 75.
- Горда С. Ю. Некоторые результаты спектрофотометрического исследования SZ Cam // Всероссийская Астрономическая Конференция: тез. докл. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2001. С. 49.
- Горда С. Ю. Подтверждение двойственности третьего тела в системе SZ Cam // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2002. С. 57.

- Горда С. Ю., Балега Ю. Ю., Шхагошева З. У. Спеклинтерферометрическая орбита третьего тела в системе SZ Cam // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2003. С. 268.
- Горда С. Ю. О природе третьего компонента в спектре SZ Cam // Астрономия 2005: состояние и перспективы развития: тез. докл. восьмого съезда Астрономич. об-ва и Междунар. симп. (Тр. ГАИШ). М.: изд-во МГУ, 2005. Т. 78. С. 75.
- Горда С. Ю. Оценки расстояния до SZ Сат и массы третьего тела // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2006. С. 267.
- 14. Горда С. Ю. Точная ПЗС-фотометрия АМ Leo // ВАК 2007: тр. Всерос. астрономич. конф. Казань: КГУ, 2007. С. 225-227.
- Горда С. Ю. Спектрофотометрия SZ Сат на 1 и 6-м телескопах САО РАН // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2008. С. 278.
- 16. Горда С. Ю., Калинин А.А. О моделировании линий гелия в спектре затменной двойной SZ Cam // От эпохи Галилея до наших дней: тез. докл. Всерос. астрономич. конф. (ВАК-2010). Нижний Архыз: САО РАН, 2010. С. 91.
- Горда С. Ю., Захарова П. Е., Крушинский В. В., Кузнецов Э. Д. 1.2м альт-азимутальный телескоп Коуровской обсерватории. // Физика космоса: Тр. 40-й международ. студ. науч. конф. Екатеринбург: Издво Урал.ун-та, 2011. С. 110-112.
- Горда С. Ю., Соболев А. М. Новая переменная с полным затмением // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2011. С. 314.

- Gorda S. and Sobolev A. 3UC 281-203711: a New Variable with Total Eclipses. // Peremennye Zvezdy Prilozhenie. — 2011. — V. 11. — Pp. 19.
- 20. Горда С. Ю. Решение сканерной кривой блеска SZ Cam // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 259.
- Горда С. Ю. ПЗС-спектрофотометрия СС Саѕ на оптоволоконном эшелле-спектрометре 1.2м телескопа ФО УрФУ // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2013. С. 153.
- 22. Горда С. Ю., Соболев А.М., Давыдова О. А. Открытие переменности блеска неправильного типа у вероятных молодых звездных объектов в окрестности V645 Cyg // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2013. С. 180.
- 23. Горда С. Ю. 30 лет наблюдений затменно-переменных звезд // Физика космоса: тез. докл. науч. конф. Екатеринбург: УрГУ, 2013. С. 267.
- 24. Горда С. Ю. Спектрофотометрия высокого разрешения АМ Leo на 1.2м телескопе АО УрФУ // Физика Космоса: Тр. 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3. - 7 февр. 2014 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. С. 220.
- Горда С. Ю., Ляпцев А. П., Соболев А. М. Исследование новой переменной типа W UMa //Физика Космоса: Тр. 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3. - 7 февр. 2014 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. С. 190.
- 26. Горда С. Ю., Захарова П. Е., Кузнецов Э. Д. Основные спектральные исследования, выполненные в течение первых пяти лет работы 1.2м альт-азимутального телескопа Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета // Международная конференция, "Настоящее и будущее малых и средних телеско-
пов СМТ-2015, 19-22 октября 2015 г., п.Нижний Архыз, САО РАН, С. 40-42.

- 27. Gorda S. Yu. VizieR Online Data Catalog: Long-term monitoring of SZ Cam (Gorda+, 2015) // VizieR Online Data Catalog. 2015. V. 41. Pp.276-288. Originally published in Astronomy Letters
- Горда С. Ю. Первая кривая лучевых скоростей ADS 2984A // Физика Космоса: Тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1 -5 февр. 2016 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. С. 245.
- 29. Горда С. Ю., Полушина Т. С. ПЗС-мониторинг массивной тесной двойной звезды UU Cas // Физика Космоса: Тр. 46-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 января - 3 февр. 2017 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. С. 244.
- 30. Горда С. Ю., Матвеева Е. А. Новая световая кривая изменения периода затменной переменной АМ Leo // Физика Космоса: Тр. 47-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 29 января 2 февр. 2018 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. С. 245-246.
- 31. Горда С. Ю. Возможная цикличность пятенной активности АМ Leo // Современная звездная астрономия. Том 1, Астрономия-2018 (XIII съезд международной организации "Астрономическое Общество сборник трудов, Москва: ИЗМИРАН, 2018, 126-129.
- 32. Пахомов Ю. И., Горда С. Ю. Калибровка BVRI-фотометра телескопа АстроСиб-500RC Коуровской обсерватории // Научные труды Института астрономии РАН. Т. 4. с.68-72 М.: Изд-во Янус-К, 2019, 420 с.
- 33. Горда С. Ю., Полушина Т. С. Массивная затменная переменная UU Cas - в свете новых данных // Физика Космоса: Тр. 49-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 27-31 января 2020 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. С. 157-158.

- 34. Кононов Д. А., Горда С. Ю., Парфенов С. Ю. О структуре течения в массивной взаимодействующей двойной системе UU Cas // Физика Космоса: Тр. 49-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 27-31 января 2020 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. С. 170-171.
- 35. Горда С. Ю. Цикличность изменений магнитного поля затменной переменной АМ Leo // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой (Екатеринбург, Россия, 1-5 февр. 2021 г.) сборник научных трудов. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. С. 103-106.
- 36. Горда С. Ю., Ватолин Я. Ю. Возможная цикличность пятенной активности новой переменной типа W UMA GSC 3599-2569 // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых (Екатеринбург, Россия, 31 января — 4 февр. 2022 г.) сборник научных трудов. - Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2022. С. 105-108.

Глава 1. Эмпирические зависимости между физическими параметрами звезд на основе данных РГП систем

В данной главе представлены результаты построения зависимостей между фундаментальными величинами звезд, массами, радиусами, светимостями и температурами на основе данных каталогов параметров компонентов тесных двойных систем, относящихся к подтипу разделенных главной последовательности (РГП) по классификации каталога ОКПЗ [8]. При определении параметров этих зависимостей был применен метод коррекции параметров полученных регрессионных зависимостей за наличие шума в аргументе в модификации диссертанта.

В разделе 1.1 описываются методы получения линейных зависимостей при наличии шума в аргументе. Изложены теоретические основы процедуры коррекции найденных коэффициентов линейных зависимостей, полученных классическим методом наименьших квадратов, для получения несмещенных оценок, используя информацию, содержащуюся только в наблюдательных данных.

В разделе 1.2 изложены методы практического использования описанной в разделе 1.1 процедуры исправления полученных коэффициентов регрессии за наличие шума в аргументе. На основе проведенного статистического исследования показано, что данный метод позволяет получать надежные результаты в пределах погрешности до 10%.

В разделе 1.3. приведено описание используемых наблюдательных данных, а также, полученные на их основе коэффициенты линейных зависимостей между фундаментальными параметрами звезд.

В разделе 1.4. приведены новые значения коэффициентов линейных

зависимостей между фундаментальными параметрами звезд на основе данных, включающих звезды малых масс.

Анализу результатов посвящён раздел 1.5.

Результаты исследования опубликованы в статьях:

- Горда С. Ю., Свечников М. А. Определение эмпирических зависимостей масса - светимость и масса - радиус для звезд главной последовательности компонентов затменных двойных систем. // Астрономический Журнал. — 1998. — Т. 75 — № 6 — С. 896-902;
- Горда С. Ю., Свечников М. А. Эмпирические зависисмости L M, R – M и M – T_{eff} для звезд главной последовательности компонентов тесных двойных систем и звезд малых масс. // Астрономический Журнал. – 1999. – Т. 76 – № 8 – С. 598-603.

1.1. Линейная регрессия при наличии шума в аргументе Основные положения

В целом ряде астрономических задач, связанных с обработкой данных или построением тех или иных эмпирических зависимостей между физическими характеристиками исследуемых объектов, бывает достаточно аппроксимации линейными соотношениями. Как правило, для определения параметров искомых линейных соотношений используется метод наименьших квадратов (линейная регрессия), поскольку исходные данные, как правило, зашумлены. В большинстве случаев применение метода наименьших квадратов (МНК) оправдано и позволяет получить адекватные результаты. Например, когда переменная, используемая в качестве аргумента, является производной времени. Поскольку время всегда измеряется с гораздо большей точностью по сравнению с другими величинами. С другой стороны, встает вопрос, как быть, когда искомые параметры определяются методом МНК в случае наличия значимых ошибок, как в величине, используемой в качестве аргумента, так и в функции? В данном случае применение традиционного метода МНК не всегда правомерно, поскольку найденные значения параметров могут быть искажены. В этой связи следует отметить еще один момент, связанный с наличием так называемой регрессионной вилки, выражающийся в несовпадении регрессионных прямых прямой и обратной зависимостей, иными словами, линейные зависимости y = a + bxи x = a' + b'y будут иметь разный наклон относительно осей xy, поскольку в данном случае $b \neq 1/b'$. Это утверждение будет доказано ниже. Здесь понятие регрессионной вилки приведено, как наличие неоднозначности выбора регрессионной прямой при нахождении параметров зависимости методом МНК между равнозашумленными физическими величинами, например, радиусами R и массами M звезд. Какую регрессионную зависимость лучше использовать $\lg R(\lg M)$ или $\lg M(\lg R)$? Возможно ли устранение этой неоднозначности или, по крайней мере, значимое уменьшение угла раствора прямой и обратной линий регрессии?

При традиционном построении линейных регрессионных моделей подразумевается отсутствие шума в аргументе. Как известно, см., например, [39] в самом простом случае линейной зависимости между двумя переменными вида:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad , \tag{1.1}$$

наличие ошибок ε предполагается только у переменной y, являющейся функцией от аргумента x, именуемого еще предикторной переменной. Здесь уравнение описывает соотношение между какой-то одной *i*-той парой значений x, y полученных в процессе наблюдений.

Искомые параметры β_0 и β_1 , определяющие конкретный вид линейной зависимости, находятся методом МНК, а именно, ищется минимум функции

$$S = \sum \varepsilon_i^2 = \sum (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad , \tag{1.2}$$

для чего решается система уравнений

$$\partial S/\partial \beta_k = 0 \quad k = 0, 1 \quad . \tag{1.3}$$

Если, при этом, выполнены следующие условия:

$$M(\varepsilon_i) = 0$$

$$cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = \delta_{ij}$$

$$cov(x_i, \varepsilon_j) = 0$$

$$cov(y_i, \varepsilon_j) = 0$$

$$(1.4)$$

то решение представляется в виде:

$$\beta_1 = cov(x, y) / \sigma_x^2 \tag{1.5}$$

$$\beta_0 = M(y) - \beta_1 M(x) , \qquad (1.6)$$

где M(a) — математическое ожидание случайной величины a, σ_x^2 — дисперсия ее значений, cov(a, b) — ковариация случайных величин a и b, δ_{ij} — символ Кронекера.

Как правило, в реальности точные значения аргумента неизвестны. Вместо x_i используются зашумленные величины:

$$x_i' = x_i + \delta_i \quad , \tag{1.7}$$

где δ_i — ошибка, искажающая значение x_i , при этом конкретное значение δ_i неизвестно. Таким образом, вместо (1.1) имеем следующее уравнение:

$$y'_i = \beta_0 + \beta_1 x'_i + \varepsilon_i \quad , \tag{1.8}$$

Здесь предполагается, что все δ_i , как и ε_i независимы, т.е. выполняются условия, аналогичные (1.4), кроме того полагается отсутствие взаимной корреляции между ε_i и δ_i :

$$M(\delta_i) = 0$$

$$cov(\delta_i, \delta_j) = \delta_{ij}$$

$$cov(x_i, \delta_j) = 0 \qquad (1.9)$$

$$cov(y_i, \delta_j) = 0$$

$$cov(\varepsilon_i, \delta_j) = 0$$

Решение уравнения (1.8) методом наименьших квадратов относительно параметра β_1 при выполнении условий, определяемых выражениями (1.4) и (1.9), не дает точного значения искомой величины. Получаемое в данном случае решение аналогично (1.5) и имеет следующий вид:

$$\beta_1' = cov(x', y') / \sigma_{x'}^2 \quad . \tag{1.10}$$

При этом, имеет место следующее соотношение:

$$\beta_1' < \beta_1 \quad , \tag{1.11}$$

т.к., в силу условий (1.4) и (1.9)

$$cov(x', y') = cov(x, y) \quad , \tag{1.12}$$

а из (1.7) следует:

$$\sigma_{x'}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_\delta^2 \quad . \tag{1.13}$$

Таким образом, видно, что применение традиционного метода наименьших квадратов к данным, имеющим ошибки в величинах, используемых в качестве аргументов (предикторных переменных), приводит к смещенным оценкам искомых параметров. В данном случае имеет смысл рассматривать смещение только углового коэффициента β_1 , т.к. значение свободного члена регрессионной прямой β_0 определяется, согласно выражению (1.6), величиной β_1 и координатами центра тяжести используемого облака точек M(x), M(y). Эти величины в любом случае определяются без смещения, поскольку $M(\sigma_i) = 0, M(\delta_i) = 0, и cov(\varepsilon_i, \delta_j) = 0, см. (1.4) и$ (1.9).

Величину смещения углового коэффициента β_1 нетрудно оценить, учитывая (1.12) и (1.13):

$$\beta_{1}' = \frac{cov(x', y')}{\sigma_{x'}^{2}} = \frac{cov(x, y)}{\sigma_{x}^{2} + \sigma_{\delta}^{2}} = \frac{\frac{cov(x, y)}{\sigma_{x}^{2}}}{1 + \frac{\sigma_{\delta}^{2}}{\sigma_{x}^{2}}} = \frac{\beta_{1}}{1 + \frac{\sigma_{\delta}^{2}}{\sigma_{x}^{2}}} \quad . \tag{1.14}$$

Видно, что величина смещения параметра β_1 определяется довольно простым соотношением и зависит только от величин дисперсий σ_x^2 и σ_δ^2 , отвечающих за меру разброса точек аргумента (проекцию на ось *x* дисперсии разброса точек вдоль линии регрессии) и неопределенность в положении отдельной точки на оси *x*, соответственно.

Таким образом, в случае линейной зависимости между параметрами x' и y' можно найти несмещенную оценку параметра наклона β_1 , применяя классический метод МНК если известны величины σ_x^2 и σ_δ^2 . Действительно, согласно (1.14)

$$\beta_1 = \beta_1' (1 + \sigma_\delta^2 / \sigma_x^2) \quad . \tag{1.15}$$

Наличие смещения в параметрах, определяемых методом МНК, объясняет возникновение, так называемой, регрессионной вилки – несовпадение прямой и обратной линий регрессии, получаемых при смене переменных (y = y(x) и x = x(y)), выступающих в роли аргумента и функции.

Если ошибки по обеим координатам некоррелированы, величина смещения коэффициента β_1 , согласно [40], зависит только от значения отношения

$$r^2 = \sigma_\delta^2 / \sigma_x^2 \tag{1.16}$$

и представляется в виде:

$$\beta_1 - \beta_1' = \beta_1' \frac{r^2}{1+r^2}.$$
(1.17)

где σ_{δ}^2 – дисперсия шума в аргументе, σ_x^2 – дисперсия разброса всех используемых значений аргумента, β'_1 – смещенная регрессионная оценка углового параметра, β_1 – его несмещенная оценка.

Отсюда, переписав (1.17) в несколько ином виде, можно выразить несмещенную величину β_1 через ее регрессионную оценку β'_1 , найденную с помощью MHK:

$$\beta_1 = \beta_1'(1+r^2), \tag{1.18}$$

Таким образом, для корректировки МНК–оценки углового коэффициента β'_1 и получения его несмещенной оценки β_1 необходимо знать две величины σ_x^2 и σ_δ^2 . При наличии шума в аргументе x получить значение σ_x^2 в чистом виде по конкретной выборке используемых данных крайне затруднительно, т.к. величина σ_δ^2 , как правило, неизвестна. Вместо нее можно оценить только суммарную дисперсию (1.13).

Для определения σ_{δ}^2 , как правило, требуется привлечение дополнительной информации. В большинстве практических случаев бывает нетрудно оценить величину $\lambda = \sigma_{\xi}^2/\sigma_{\delta}^2$ (σ_{ξ}^2 - дисперсия ошибки по y). Тогда оценку σ_{δ}^2 , согласно [39], можно найти из следующего соотношения :

$$\sigma_{\delta}^{\prime 2} = \frac{\lambda}{\lambda + 1/\beta_1^2} \sigma_{xx}^2, \qquad (1.19)$$

где σ_{xx}^2 дисперсия разброса точек относительно линии регрессии по оси x.

Таким образом, видно, что даже при наличии шума в аргументе в случае двухпараметрической зависимости, получив смещеное значение углового коэффициента классическим методом МНК, можно сравнительно просто провести его коррекцию.

1.2. Линейная регрессия при наличии шума в аргументе Практическая реализация

Для практического применения выводов, изложенных в предыдущем параграфе, необходимо знать параметры генеральной совокупности облака точек, определяемого случайными переменными x, y. В реальной ситуации мы всегда имеем дело не с генеральной совокупностью точек, а с отдельной случайной ее выборкой определенного объема N. Вместо введеных в предыдущем параграфе величин, на практике приходится иметь дело с их выборочными оценками, зависящими от величины N.

Как известно, например, вместо математического ожидания M(a)какой-либо случайной величины работают с ее средним значением \bar{a} , вместо σ_a^2 с s_a^2 , соответственно, вместо ковариации cov(a, b) двух случайных величин a и b с ее оценкой s_{ab} . Выражения для вычисления этих величин имеют следующий вид [39]:

$$\bar{a} = \sum_{1}^{N} a_i / N$$

$$s_a^2 = \sum_{1}^{N} (a_i - \bar{a})^2 / N \qquad (1.20)$$

$$s_{ab} = \sum_{1}^{N} [(a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})] / N$$

Соответственно, уравнение (1.5), для вычисления МНК оценки углового коэффициента линии регрессии, преобразуется к виду:

$$b_1 = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = \frac{\sum_{1}^{N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} , \qquad (1.21)$$

т.е. вместо коэффициента β_1 получаем его выборочную оценку b_1 , величина которой зависит от конкретной выборки точек $\{x, y\}$ и ее объема N.

Соответственно, выборочная оценка $\sigma_{x'}^2$, обозначаемая как $s_{x'}^2$, описывается следующим уравнением:

$$s_{x'}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i' - \overline{x'})^2}{N - 1} \quad , \tag{1.22}$$

где $x'_i = x_i + \delta_i$ – зашумленное *i* значение аргумента; δ_i – величина шума; $\overline{x'}$ – выборочное среднее по всем x'_i ; N – объем выборки.

Выборочное значение σ_{δ}^2 , соответственно, определяется следующим выражением:

$$s_{\delta}^2 = \frac{\lambda}{\lambda + 1/b_1^2} s_{xx}^2 \frac{N}{N-2} \quad , \tag{1.23}$$

где s_{xx}^2 – выборочная оценка σ_{xx}^2 элементарно вычисляется после определения коэффициентов линии регрессии.

Собственно говоря, в соотношение (1.23) вместо найденного значения

коэффициента b_1 нужно подставить его несмещенную выборочную оценку b, которую мы и хотим определить. Следовательно, оценка s_{xx}^2 , будет несколько искажена, т.к. будет вычислена по регрессионной прямой с угловым коэффициентом b_1 . Поэтому вместо s_{δ}^2 мы получим несколько отличную от нее величину $s_{\delta}^{\prime 2}$.

Найденное, затем, из (1.18) с заменой β'_1 и β' на b_1 и b, скорректированное значение углового коэффициента b будет недоисправленным, т.к., вместо r^2 , используется ее выборочная характеристика r'^2

$$r'^2 = \frac{s_{\delta}'^2}{s_x'^2}.$$
 (1.24)

Соответственно, вместо (1.18) имеем:

$$b' = b_1(1 + r'^2), (1.25)$$

Остается открытым вопрос, насколько полученная таким образом оценка b' отличается от искомой β , и какие имеются ограничения на величину r^2 , в пределах которых можно вместо нее использовать r'^2 в соотношении (1.25). Иными словами, насколько большой в сравнении с величиной разброса точек по оси x может быть ошибка в аргументе, чтобы скорректированная величина b' мало отличалась от β .

Для прояснения данного вопроса соискателем был проведен численный эксперимент, поскольку, в силу простоты задачи, не требуется выполнение большого объема вычислений, и ожидаемый результат можно получить достаточно быстро.

В нашей численной модели отдельная выборка данных генерировалась следующим образом: первоначально набрасывалось случайное распределение точек x_i, y_i (i = 1, ..., 100) вдоль линейной зависимости $y = \beta_0 + \beta_1 x$ в соответствии с величиной разброса по оси x, задаваемой значением дисперсии σ_x^2 (естественно, при этом $\sigma_y^2 = \beta^2 \sigma_x^2$). Затем генерировалось облако точек, для чего в значения обеих переменных аддитивно вносился нормальный шум с соответствующими дисперсиями σ_{δ}^2 для x и σ_{ξ}^2 для y, причем всегда полагалось, что $\sigma_{\delta} = \sigma_{\xi}$, т.е. значение λ принималось равным 1. В этом случае достигается наибольшая чувствительность метода к влиянию ошибок в аргументе. Поскольку в случае $\lambda > 1$, а тем более $\lambda >> 1$, величина смещения коэффициента b_1 будет меньше, чем при $\lambda = 1$, а в случаях $\lambda < 1$ и $\lambda << 1$ можно вместо линейной зависимости y = y(x) использовать x = x(y), т.е. поменять аргумент и функцию местами.

Генерация шума производилась с использованием хорошо зарекомендовавшего себя датчика случайных чисел URAND [41].

Для получения устойчивых средних МНК-оценок b_1 выборки данных генерировались достаточно большое число раз с различными реализациями шума. Затем по всем реализациям данных находились (j = 1, ..., 1000) МНК-оценки b_1^j и вычислялась средняя величина \overline{b}_1 и ее дисперсия. Одновременно производилась коррекция всех величин b_1^j , т.е. в соответствии с выражением (1.25) вычислялись $b_1'^j$. Необходимые для этого оценки $s_{\delta}'^2$ и $s_x'^2$ элементарно находились с использованием сгенерированных данных, в соответствии с приведенными выше выражениями (1.23) и (1.22). Значение λ предполагалось известным. И наконец, по всем полученным отдельным значениям b_j' находились устойчивые оценки средних значений $\overline{b'}$ и их дисперсий. Результаты вычислений показаны на рис.1, где приведены графики относительных смещений для МНК-оценок \overline{b} и их скорректированных согласно (1.25) значений $\overline{b'}$ в зависимости от $r = \sigma_{\delta}/\sigma_x$.

Адекватность нашей простой модели подтверждается абсолютным совпадением полученных оценок относительных смещений $(\beta_1 - \overline{b})/\beta_1$ с их точными, вычисленными в соответствии с выражением (1.17), значениями.

Как можно видеть из рис.1.1, применение описанной выше процедуры для коррекции МНК-оценки b_1 , позволяет исправить ее смещенное значение с точностью до $1\% \div 5\%$ даже при величине средней квадратической



Рис. 1.1. Графики величины относительного смещения углового коэффициента b_1 , полученного с помощью классического МНК и методом коррекции, в зависимости от параметра $r = \sigma_{\delta}/\sigma_x$. Пунктирными линиями показаны коридоры ошибок шириной в 1σ .

ошибки шума в аргументе σ_{δ} , достигающей 40% от размеров области определения искомой линейной зависимости, которая задается значением σ_x . Иными словами, если выполняется следующее условие

$$r' \approx r = \frac{\sigma_{\delta}}{\sigma_x} \le 0.40$$
 , (1.26)

применение традиционного регрессионного анализа с последующей коррекцией полученных параметров позволяет с точностью не хуже 5% исправить их значения и получить несмещенные оценки, конечно, если при этом мы сможем правильно оценить величину λ . Неточность в значении этого параметра вносит дополнительную неопределенность в $s_{\delta}^{\prime 2}$, а следовательно, и в величину коррекции параметра b.

Проведенное соискателем дополнительное исследование показало, что неопределенность в оценке величины λ в два раза в ту или другую сторону ужесточает требование на величину r^2 . При тех же критериях на точность коррекции b_1 равной $1\% \div 5\%$, средняя квадратичная ошибка шу-



Рис. 1.2. Графики прямой и обратной линий регрессии, полученные классическим МНК (прямые линии) и с использованием метода коррекции (пунктирные линии), для зависимости «Масса — Радиус».

ма аргумента $x - \sigma_{\delta}$ не должна превышать 20% от величины σ_x .

Иллюстрацию работы процедуры МНК-коррекции можно продемонстрировать на примере определения зависимости «Масса — Радиус» на основе данных каталога РГП систем Свечникова, Перевозкиной [38]. После получения в первом приближении линий регрессии (прямых и обратных), соответственно, lg M_{bol} – lg M и lg $M = \log R$, обнаруживается, что регрессионная вилка имеет достаточно широкий раствор (порядка 10°). Для исправления регрессионных оценок вычисляемых зависимостей, согласно соотношению (1.25), была произведена оценка значения λ , которая оказалась близкой к 1 (т.е. одинаковый разброс точек по обеим координатам $\sigma_{\xi}^2 = \sigma_{\delta}^2$), что позволило получить оценку σ_{δ} из (1.19) по вычисленной величине σ_{xx} и внести коррективы в обе линии регрессии (1.25). На рис.1.2 показан пример работы описанной выше процедуры. Видно, что исправленные линии регрессии (прямая и обратная) зависимости «Масса — Радиус» практически совпадают, в то время, как найденные по методу МНК расходятся под заметным углом.

1.3. Эмпирические зависимости «Масса — Светимость» и «Масса – Радиус» для звезд главной последовательности – компонентов затменных двойных систем

Определение статистических зависимостей «Масса — Светимость», «Масса — Радиус», «Масса — Спектр» для звезд – компонентов затменных двойных систем, оба компонента которых принадлежат главной последовательности, представляет большой интерес. Эти зависимости широко используются для оценки масс одиночных звезд с известными спектрами и (или) светимостями, для оценки абсолютных характеристик затменных переменных звезд с неизвестными элементами спектроскопической орбиты, а также в ряде других задач астрофизики и звездной астрономии.

На момент выполнения данной работы Свечниковым М. А. ранее были получены зависимости $\lg M - \lg M_{bol}$, $\lg M - \lg R$, $\lg M - \lg T$ на основе данных его каталога [42, 43], содержащих сведения о фотометрических и абсолютных элементах 75 затменных двойных систем с известными элементами фотометрической и спектроскопической орбиты, оба компонента которых принадлежат к главной последовательности (РГП – системы, согласно классификации Свечникова и др. [6, 45, 46]).

Однако, за прошедшие годы надежность определения спектральных и фотометрических характеристик существенно повысилась (благодаря применению ПЗС–приемников, широкому использованию метода кросс– корреляции при определении положений спектральных линий, применению многоканальных фотометров и улучшении техники решения кривых блеска), а также значительно увеличилось число РГП–систем с надежно определенными фотометрическими и абсолютными элементами (см., например, работы [47–55]). Поэтому возникла необходимость составления нового каталога фотометрических, геометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд типа РГП с известными элементами фотометрической и спектральной орбиты. Такая работа была выполнена Свечниковым и Перевозкиной для 112 затменных систем [38]. Для большинства из этих систем точность определения масс компонентов составляет 2% - 3%, а точность определения радиусов 2% - 4%.

По материалам этого каталога были получены новые эмпирические оценки зависимостей «Масса — Светимость» и «Масса — Радиус», для звезд Главной Последовательности. При этом, для представления зависимостей в области малых масс использовались данные по маломассивным звездам с эмиссионными линиями поздних спектральных классов из монографии Гершберга [56].

Окончательно, с учетом того, что обе зависимости имеют излом в области малых масс, были получены следующие эмпирические соотношения:

$$M_{bol} = 4.463 - 9.519 \ \lg M \qquad (\lg M > -0.4)$$

$$M_{bol} = 6.579 - 4.998 \ \lg M \qquad (\lg M \le -0.4)$$

$$\lg R = 0.096 + 0.652 \ \lg M \qquad (\lg M > 0.14)$$

$$\lg R = 0.049 + 0.993 \ \lg M \qquad (\lg M \le 0.14)$$

$$\lg R = 0.049 + 0.993 \ \lg M \qquad (\lg M \le 0.14)$$

здесь M и R выражены в долях массы и радиуса Солнца, соответственно. Коррекция за смещение угловых коэффициентов выполнялась отдельно для каждого линейного участка (до точки излома и после). Полученные зависимости ($M_{bol} - \lg M$) и ($\lg M - \lg R$) приведены на рис.1.3 и рис.1.4,



Рис. 1.3. Зависимость «Масса-Радиус» (сплошная линия), полученная по данным каталога [38] (кружки), с использованием метода коррекции. Пунктирными линиями отмечены положения начальной (ZAMS) и конечной (TAMS) главных последовательностей.

соответственно.

Следует отметить, что при определении параметров зависимостей ряд звезд – компонентов РГП – систем был исключен из рассмотрения, т.к. значения их физических параметров (массы, радиусы, светимости) значительно отклонялись от соответствующих линий регрессии, т.е. выскакивали за интервал в 3σ , определяемый по всем звездам каталога. В табл. 1.1 приведены эти "выскочившие"звезды , при этом значок I означает, что из рассмотрения исключен главный компонент соответствующей затменной системы, а значок II показывает, что исключен спутник.

Относительно некоторых звезд, указанных в таблице 1.1, можно привести следующие замечания:

AN And – фотометрические и спектральные элементы, полученные в [57], не очень надежны и показывают, что оба компонента находятся



Рис. 1.4. Зависимость «Масса — Светимость» (обозначения теже, что и на рис.1.3).

вблизи конца эволюции в пределах главной последовательности (КГП).

SZ Cen – согласно [58], главный компонент истощил водород в ядре и находится вблизи конца своей эволюции в пределах главной последовательности.

V 346 Cen – согласно [55], главный компонент находится вблизи КГП.

WX Cep – согласно [49], главный компонент истощил водород в ядре и находится вблизи КГП.

V 380 Cyg – согласно [52], массы компонентов оценены неуверенно – нет надежного фотометрического решения для определения абсолютных элементов. Главный компонент обладает значительным избытком радиуса для своей массы; по данным Леушина и Снежко [59], он окружен протяженной газовой оболочкой.

V 1765 Cyg – полученные фотометрические и спектральные элементы ненадежны. Согласно [60] и [61] главный компонент полностью истощил водород в ядре и находится вблизи КГП.

АІ Нуа – Согласно [50] и [62], главный компонент полностью истощил водород в ядре и находится вблизи КГП.

ТХ Leo – фотометрические и спектральные элементы определены очень ненадежно и не заслуживают доверия [44].

IM Mon – затмения в этой системе очень мелкие. Фотометрические и абсолютные элементы определены очень ненадежно; по-видимому, найденный угол наклонности орбиты несколько занижен, что приводит к завышению вычисленных масс обоих компонентов [44].

δ Ori A – затмения в этой системе очень мелкие. Фотометрические и абсолютные элементы определены очень ненадежно [44].

V 467 Per – система является эллипсоидальной переменной. Согласно [63], фотометрические и абсолютные элементы определены весьма ненадежно. Спутник очень позднего спектрального класса, его физические параметры оценены очень неуверенно.

EG Ser – фотометрические элементы оценены в работе Свечникова, Кузнецовой [64] приближенным методом. Надежность их определения очень низка. По-видимому, полученные с этими элементами значения масс компонентов сильно занижены.

CD Tau – оба компонента находятся вблизи конца своей эволюции в пределах главной последовательности [44,65].

Сравнение новых соотношений с ранее полученными в работах [42,43] зависимостями «Масса — Светимость» и «Масса — Радиус»:

$$\begin{split} &\lg M = 0.466 - 0.105 \ \text{M}_{\text{bol}} \quad (-0.4 \le \lg M \le 1.3) \\ &M_{\text{bol}} = 4.438 - 9.524 \ \lg M \\ &\pm 48 \quad \pm 38 \quad \lg M \\ &1 \ \text{m} R = 0.098 + 0.641 \ \lg M \quad (\lg M > 0.14) \\ &\lg R = 0.039 + 1.020 \ \lg M \quad (\lg M \le 0.14) \\ &\pm 23 \quad \pm 81 \quad (\lg M \le 0.14) \end{split}$$

показывают довольно хорошее совпадение коэффициентов в указанных интервалах масс.

Так, ранее было найдено, что в очень широком интервале масс от $\approx 0.4 M_{\odot}$ до $\approx 20 M_{\odot}$, следует $L \sim M^{3.81}$. Новым в данной работе является существенное изменение наклона зависимости M - L для масс $< 0.4 M_{\odot} (L \sim M^{2.00})$, что согласуется с теоретическими представлениями о внутреннем строении полностью конвективных звезд.

Выполненое сравнение наблюдательных данных с теоретическими моделями начальной (НГП, ZAMS) и конечной (КГП, TAMS) главными последовательностями [66], расчитанными для химсостава звезд, относящихся к населению I типа (X = 0.7, Y = 0.28, Z = 0.02), с учетом конвективного проникновения (overshooting) показало, что теоретические модели НГП и КГП дают нижнюю и верхнюю огибающие на диаграмме lg R-lg M, для звезд, использованных нами для определения зависимости «Macca — Радиус».

Как можно видеть на рис.1.3, эмпирическая зависимость массарадиус проходит через наиболее плотную область распределения точек на плоскости $\lg R - \lg M$ паралельно теоретическим НГП и КГП. Аналогичные результаты получены и для зависимости масса–светимость (рис.1.4). Результаты данного исследования опубликованы в работе [67].

${ m M}_{ m bol} - { m lg}$	M		$\lg R - \lg$	M	
AN And	Ι	Π	AN And	Ι	Π
TU Cam	Ι				
			SZ Cen	Ι	
V346 Cen	Ι	II			
			WX Cep	Ι	
MR Cyg	Ι				
V380 Cyg	Ι	Π	V380 Cyg	Ι	Π
			V1765 Cyg	Ι	
			AI Hya		Π
CO Lac	Ι				
TX Leo		Π	TX Leo		Π
IM Mon	Ι	Π			
			δ Ori A	Ι	Π
			V467 Per		Π
EG Ser	Ι	II			
CD Tau		Π	CD Tau		Π
HD 21731 2	Ι				
			BD 66°34 B		В
L-726-8 A	А		L-726-8 A	А	

Таблица 1.1. Список звезд, данные которых не были использованы при построении зависимостей

1.4. Эмпирические зависимости «Масса — Светимость» и «Масса — Радиус» и «Масса — Спектр» с учетом звезд малых масс

Точность определения коэффициентов эмпирических зависимостей $\lg M - \lg M_{bol}$, $\lg M - \lg R$, приведенных в разделе 1.3 и работе [67], для масс $M > 1.0 M_{\odot}$ оказалась в среднем в 5 раз выше прежних определений, что обусловлено высоким качеством использованных данных. В то же время участки этих зависимостей для звезд малых масс были определены менее уверенно, главным образом, из-за малочисленности данных.

Как известно, определение параметров маломассивных звезд представляет определенные трудности, связанные в первую очередь с их низкой светимостью и малой температурой поверхности. Основная доля излучения таких звезд приходится на длинноволновую область спектра. Поэтому только сравнительно недавно, с развитием приемников инфракрасного излучения и, особенно, методов спеклинтерферометрии, начали появляться работы по определению физических параметров (масс, светимостей, показателей цвета в ближней ИК области) близких маломассивных двойных систем.

Наиболее полной по количеству данных является работа Генри и Маккарти [68], в которой приведены значения масс и абсолютных звездных величин в полосах J, H и K для 37 компонентов 19 близких двойных систем. Значения масс лежат в интервале $0.08M_{\odot} - 1.0M_{\odot}$, точность определения масс отдельных компонентов колеблется от 2% до 20% и в среднем составляет 7% – 10%. Точность инфракрасной фотометрии также относительно высока и составляет в среднем 10% – 15%.

Используя эти данные мы определили абсолютные болометрические величины компонентов этих двойных звезд, воспользовавшись эмпирической формулой связи Веедера [69] между величинами M_{bol} и M_K , определенной в интервале $4.0 < M_K < 9.5$ с коэффициентом корреляции 0.99. Значения абсолютных величин M_K компонентов практически всех используемых нами двойных звезд удовлетворяли данному интервалу.

Для оценки эффективных температур были использованы данные инфракрасной фотометрии для некоторых звезд низкой светимости, приведенные в работе [68]. С этой целью мы нашли соотношение между спектральным классом и показателем цвета J - K, а затем, используя шкалу Поппера [70], определили и соотношение между J - K и lg T_{eff} . Таким образом, для всех звезд с измереными величинами M_J и M_K были найдены оценки lg T_{eff} .

Теперь, зная M_{bol} и T_{eff} , не составило труда оценить радиусы компонентов, используя известное соотношение:

$$M_{bol} = 42.31 - 5 \lg(R/R_{\odot}) - 10 \lg T_{eff}.$$

Определенные таким образом значения M_{bol} , радиусов и эффективных температур для маломассивных звезд по данным монографии Гершберга [56] и работы [68] приведены в таблице 1.2.

Обозначение	$\mathrm{M}_{\mathrm{bol}}$	$\lg M/M_{\odot}$	$\lg R/R_{\odot}$	$\lg T_{eff}$	
BD $-32^{\circ}16135$ A	8.83	-0.409	-0.344	3.52	
$BD + 60^{\circ}34 A$	8.47	-0.398	-0.332	3.55	
$BD + 66^{\circ}34 B$	9.97	-0.886	-0.572	3.52	
$BD + 43^{\circ}44 A$	8.50	-0.509	-0.338	3.55	
продолжение таблицы далее					

Таблица 1.2: Значения M_{bol} , радиусов и эффективных температур для маломассивных звезд, вычисленные по данным работы [68].

продолжение таблицы 1.2					
Обозначение	M _{bol}	$\lg M/M_{\odot}$	$\lg R/R_{\odot}$	$\lg T_{eff}$	
$BD + 43^{\circ}44 B$	10.90	-0.886	-0.758	3.52	
DO Cep B	10.89	-0.796	-0.756	3.52	
BD $-7^{\circ}781$ B	10.44	-0.796	-0.682	3.52	
Ross 128 B	11.06	-0.824	-0.790	3.52	
L - 726 - 8 A	12.67	-0.921	-1.082	3.50	
L - 726 - 8 B	10.64	-0.959	-0.706	3.52	
Wolf 44 A	12.29	-1.190	-1.006	3.50	
GL 22 A	9.02	-0.453			
$\mathrm{GL}\ 22\ \mathrm{C}$	11.20	-0.906			
GL 25 A	6.09	-0.192			
GL 25 B	6.27	-0.192			
GL 65 A	11.67	-1.013	-0.846	3.49	
GL 65 B	12.11	-1.026	-0.945	3.49	
GL 67 A	5.02	-0.030	0.294	3.58	
GL 67 B	9.99	-0.552	-0.709	3.59	
GL 166 C	10.30	-0.809	-0.578	3.49	
GL 234 A	10.38	-0.747	-0.624	3.50	
GL 234 B	12.06	-1.080	-0.802	3.43	
GL 340 A	6.57	-0.182	0.026	3.56	
GL 340 B	6.66	-0.229	0.084	3.52	
GL 352 A	8.96	-0.709	-0.374	3.52	
GL 352 B	9.21	-0.692	-0.387	3.50	
GL 508 A	7.35	-0.149	-0.047	3.52	
GL 508 B	8.38	-0.304	-0.185	3.48	
GL 559 A	5.06	0.036	0.300	3.57	
GL 559 B	6.04	-0.044	0.158	3.55	
продолжение таблицы далее					

продолжение таблицы 1.2					
Обозначение	$\mathrm{M}_{\mathrm{bol}}$	$\lg M/M_{\odot}$	$\lg R/R_{\odot}$	$\lg T_{eff}$	
GL 570 B	7.94	-0.257	-0.163	3.52	
GL 570 C	9.19	-0.409	-0.336	3.48	
GL 623 A	9.18	-0.291	-0.423	3.52	
GL 623 B	12.39	-0.943	-0.856	3.42	
GL 661 A	8.98	-0.578	-0.382	3.52	
GL 661 B	9.45	-0.585	-0.480	3.52	
GL 677 A	7.34	-0.545	-0.065	3.53	
GL 677 B	7.66	-0.600	-0.121	3.53	
GL 702 A	6.18	-0.067	0.059	3.58	
GL 702 B	7.01	-0.168	0.137	3.46	
GL 704 A	4.48	-0.030	0.398	3.58	
GL 704 B	6.78	-0.210	0.046	3.52	
GL 725 A	9.34	-0.431	-0.447	3.52	
GL 725 B	9.93	-0.500	-0.569	3.52	
GL 860 A	9.64	-0.590	-0.455	3.49	
GL 860 B	11.17	-0.777	-0.831	3.53	
GL 1245 A	11.85	-0.894	-0.922	3.50	
GL 1245 C	13.00	-1.131	-1.036	3.45	

Сравнение значений M_{bol} , $\lg(R/R_{\odot})$ и $\lg T_{eff}$, полученных нами по данным инфракрасной спеклинтерферометрии, с аналогичными величинами для звезд с массой $M < 1.0 M_{\odot}$ из каталога Свечникова, Перевозкиной [38] и монографии Гершберга [56] показало полное отсутствие какихлибо систематических отличий между ними, что хорошо видно на приводимых ниже рисунках. Кроме того, для каждого компонента двух затменных переменных звезд малых масс CM Dra и YY Gem эти величины, взятые из работ [71–73], были определены с большой точностью, поэтому они являлись для нас своеобразными реперами. Эти звезды, отмеченные на рисунках отдельными значками, лежат внутри облака точек, образованного остальными звездами, что также свидетельствует об адекватности полученных нами оценок.

Используя данные каталога Свечникова, Перевозкиной [38], а также оценки для маломассивных звезд, мы получили новые эмпирические зависимости «Macca — Светимость», «Macca — Радиус», «Macca — Эффективная температура» для звезд Главной Последовательности. При этом, применялась методика исправления коэффициентов регрессии за наличие шума в аргументе, подробно описанная в нашей предыдущей работе [67].

Окончательно, с учетом того, что зависимости имеют излом в области малых масс, были получены следующие эмпирические соотношения:

$$\begin{split} \mathbf{M}_{\text{bol}} &= 4.463 - 9.519 \ \text{lg} M & (\text{lg} M > -0.4) \\ \pm 19 & \pm 36 \ \text{lg} M & (\text{lg} M > -0.4) \\ \mathbf{M}_{\text{bol}} &= 6.180 - 5.912 \ \text{lg} M & (\text{lg} M \leq -0.4) \\ \pm 79 & \pm 121 \ \text{lg} M & (\text{lg} M > 0.14) \\ \text{lg} R &= 0.096 + 0.652 \ \text{lg} M & (\text{lg} M > 0.14) \\ \text{lg} R &= 0.101 + 1.030 \ \text{lg} M & (\text{lg} M \leq 0.14) \\ \pm 16 & \pm 243 \ \text{lg} T_{eff} & (\text{lg} T_{eff} > 3.58) \\ \text{lg} M &= -29.42 + 8.16 \ \text{lg} T_{eff} & (\text{lg} T_{eff} \leq 3.58) \\ \pm 1.16 & \pm 33 \ \text{lg} T_{eff} & (\text{lg} T_{eff} \leq 3.58) \end{split}$$

Здесь M и R выражены в долях массы и радиуса Солнца, соответственно. Коррекция за смещение угловых коэффициентов выполнялась отдельно для каждого линейного участка (до точки излома и после). Полученные зависимости приведены на рис.1.5 (lg M – lg R), рис.1.6 (M_{bol} – lg M) и рис.1.7 (lg M – lg T_{eff}).

Как и следовало ожидать, участки зависимостей $M_{bol} - \lg M$ и lg $M - \lg R$ в области больших масс остались теже самые, что приведены в разделе 1.3(см. так же работу [67], в то время как маломассивные концы зависимостей претерпели некоторые изменения. Главным образом увеличилась значимость полученных коэффициентов (среднеквадратическая ошибка уменьшилась в 1.4 раза) за счет увеличения объема выборки по сравнению с определениями Горды, Свечникова [67] (раздел 1.3). Некоторое формальное увеличение ошибок коэффициентов маломассивного конца зависимости lg $M - \lg R$ является на наш взгляд результатом увеличения выборки и отнюдь не снижает значимости полученных коэффициентов [74] по сравненению с ранее определенными [67], т.к. приведенные там величины ошибок в силу малости выборки не характеризовали в полной мере



Рис. 1.5. Зависимость «Масса — Радиус» (сплошная линия), полученная по данным каталога [38](незаполненные кружки) и данным инфракрасной спеклинтерферометрии (закрашенные кружки). Крестиками отмечены звезды СМ Dra и YY Gem.



Рис. 1.6. Зависимость «Масса — Светимость» (обозначения те же, что и на рис.1.5).



Рис. 1.7. Зависимость «Масса — Эффективная температура» (обозначения те же, что и на рис.1.5).

значимость найденных коэффициентов, а являлись результатом случайного расположения небольшого числа точек относительно линии регрессии.

Зависимость «Масса — Эффективная температура» (lg M/M_{\odot} – lg T_{eff}) получена на основе уточненных данных нового каталога фотометрических и геометрических элементов тесных двойных систем с компонентами, принадлежащими к типу РГП [38]. Необходимые для этого величины lg T_{eff} были найдены с помощью шкалы Поппера [70] на основе спектральных классов звезд. Как предсказывает теория, вблизи спектрального класса M0 (lg $T_{eff} = 3.6$) наблюдается резкое изменение угла наклона зависимости (lg M/M_{\odot} – lg T_{eff}), что связано, по-видимому, с переходом к полностью конвективным звездам. Эмпирическая зависимость «Масса — Эффективная температура» в области малых масс для такой представительной выборки звезд была получена впервые. Как можно видеть на всех рисунках, эмпирические зависимости проходят через наиболее плотную об-

ласть распределения точек.

1.5. Обсуждение результатов и выводы

Эмпирические зависимости между фундаментальными параметрами звезд, представленные в предыдущих разделах данной главы, были получены на основе данных РГП систем более 20 лет назад. В настоящее время в литературе представлены более современные варианты этих зависимостей, полученные на более обширном и более точном наблюдательном материале см., например, [75–80]. Изменилась и парадигма построения таких зависимостей, а также, подход к выбору наблюдательного материала. Так в ряде работ предлагается представлять логарифмическую форму отдельных зависимостей, имеющих значительную кривизну, в полиномиальном виде [77], либо в виде ломаной кривой, состоящей из коротких прямолинейных отрезков [80].

Следует также отметить тот факт, что получаемые тем или иным способом зависимости представляют собой усредненные соотношения между теми или иными параметрами звезд, например, светимостью и массой. Они располагаюся между начальной (НГП) и конечной (КГП) положениями Главной Последовательности. В то время как для отдельной звезды главной последовательности определенного возраста и химсостава соотношение параметров будет несколько иным. Как указано в работе Экера и др. [81], в этом случае в параметры, определенные по этим последовательностям, необходимо внести некоторые поправки, поскольку точность современных данных уже позволяет это сделать.

Еще один дискуссионный момент связан с правомерностью использования зависимостей, полученных на основе данных тесных двойных систем (ТДС), точнее РГП-систем, для определения параметров одиночных звезд, поскольку эволюция компонентов ТДС и одиночных звезд идет немного разными путями из-за наличия приливных эффектов и синхронизации осе-

вого вращения компонентов ТДС с орбитальным периодом системы. В то время, как одиночные звезды могут иметь произвольную скорость вращения, а следовательно, и отличную от компонентов ТДС той же массы и возраста скорость перемешивания вещества, а значит и несколько иные значения светимости и радиуса. Еще большие расхождения имеют место при использовании данных полуразделенных ТДС, т.е. уже значительно проэволюционировавших ТДС. Как известно, в этом случае значения параметров компонентов могут заметно отличаться от параметров одиночных звезд вследствие наличия переноса массы между компонентами. Эти вопросы подробно изложены в работах Малкова и Князева [77, 82, 83]. В этой связи данные авторы предлагают использовать для построения зависимостей между параметрами звезд только данные компонентов широких ТДС, имеющих орбитальные периоды более 20 дней, поскольку у таких пар компоненты практически не деформированы, а осевое вращение еще не синхронизировано с орбитальным, вследствие малости эффектов приливного взаимодействия.

Не смотря на отличие современного подхода к построению эмпирических зависимостей между параметрами звезд и критериям, имевшим место 20 лет назад, зависимости, представленные в данной дисертационной работе, не потеряли актуальности до настоящего времени. По данным сайта Astrophysics Data System (ADS) (https://ui.adsabs.harvard.edu) с 1999г. по 2022г. имеется более 50 ссылок на обе наши работы [67,74]. В среднем более 2 ссылок в год и распределение по годам достаточно равномерное. Из них, в подавляющем числе статей использовались данные наших зависимостей. Видимо, простые линейные формы взаимосвязи между параметрами звезд позволяют в достаточно большом числе случаев их использования просто и быстро получать адекватные данные, даже в задачах настоящего времени. В заключение следует отметить, что зависимости, полученные в работе [74] были включены в список достижений мировой астрономии за 1999г. [84]. Вклад соискателя:

По данным из литературы выбран простой метод коррекции смещеных оценок коэффициентов регрессии, получаемых классическим методом наименьших квадратов, в случае наличия значимых ошибок в аргументе.

Методом численного моделирования произведено исследование данного метода. Получены критерии его применимости при различной степени зашумленности данных, выраженные в уменьшении так называемой регрессионной вилки.

Произведена оцифровка данных карточного каталога РГП систем Свечникова, Перевозкиной. Вычислены необходимые для построения зависимостей параметры звезд малых масс по данным инфракрасной спеклинтерферометрии.

Методом наименьших квадратов с использованием процедуры коррекции смещенных оценок получены коэффициенты линейных зависимостей «Масса — Светимость», «Масса — Радиус» и «Масса — Спектр».

Анализ результатов произведен в равной степени с соавтором.

1.6. Положения, выносимые на защиту

По результатам первой главы на защиту выносится следующие положения:

 Предложен метод восстановления несмещенных оценок значений коэффициентов линейной регрессионной зависимости при наличии шума в аргументе, использующий только один параметр λ, определяемый исключительно по имеющемуся набору наблюдательных данных и аппробированный на основе проведенного численного эксперимента. Показано, что восстановление значения углового коэффициента линейной зависимости, найденного с применением стандартного метода наименьших квадратов, достигается с точностью не хуже 2% — 5% при наличии шума в аргументе с величиной дисперсии не более 5% от области определения функции.

• Получены на основе данных каталога РГП систем, с использованием процедуры получения несмещенных оценок параметров, эмпирические зависимости между фундаментальными параметрами звезд «Macca — Светимость», «Macca — Радиус» и «Macca — Спектр» с учетом звезд малых масс.

Глава 2. Комплексное исследование трех тесных двойных систем с массивными компонентами ранних спектральных классов

В данной главе диссертационной работы представлены результаты сканерного фотометрического, спектрального и спеклинтерферометрического исследования тесной двойной системы SZ Cam, а также спектрального исследования двух ТДС с массивными компонентами раннего спектрального класса. Все три системы одновременно являются компонентами визуально-двойной звезды ADS 2984, являющейся самым ярким членом рассеянного звездного скопления NGC 1502.

Затменная переменная SZ Cam (HD 25638, ADS 2984B) с массивными компонентами раннего спектрального класса B0III - O9V (Баддинг [85]) является северным компонентом визуально-двойной звезды ADS 2984. Тесная двойная SZ Cam и ее визуальный спутник, имеющий такой же блеск ($\sim 7^m$) и находящийся на угловом расстоянии 18", являются самыми ярким членами рассеянного звездного скопления NGC 1502.

Переменность SZ Cam была установлена Гутником и Прагером [86], а первые фотографические кривые блеска высокого качества были получены Весселинком [87]в 40-х годах. В 1970 - 1971 гг. Китамурой и Ямасаки [88] в Японии и Полушиной [89] в Гиссарской обсерватории были получены первые фотоэлектрические кривые блеска SZ Cam. В обоих случаях авторы выбирали для наблюдений ночи с высокой прозрачностью, чтобы исключить влияние подсветки от южного компонента. В период 1972-1974 гг. Хохолом [90] были получены кривые блеска в нестандартных фильтрах, близких к системе *B*. Фотоэлектрические кривые блеска Китамуры, Ямасаки [88] и Полушиной [89], полученные в стандартной системе фильтров *UBVR* и примерно в одно и тоже время, имели отличающиеся друг от друга значения глубин минимумов. Вместе с тем глубины минимумов кривых блеска Хохола [90], несмотря на то, что были получены в нестандартной системе узкополосных фильтров, а также фотографических кривых блеска Весселинка [87] и фотоэлектрических Китамуры, Ямасаки [88], практически совпадали. Поэтому определение параметров SZ Сат проводили даже используя фотографическую кривую блеска Весселинка [87]. Таким образом, имелась настоятельная необходимость в получении еще одной кривой блеска SZ Сат в стандартной системе фильтров.

Спектральную двойственность этой системы впервые обнаружил Пласкет [91]. Определенное время на основе результатов фотографического спектрального исследования Хохола [92] SZ Cam считалась полуразделенной системой. Существенная смена взгляда на эволюционный статус системы произошла после работы Майера и др. [93], а в последствии Лоренца и др. [94] и Харисса и др. [95]. На основе спектров, впервые полученных с использованием электронных приемников излучения, в спектрах были уверенно отождествлены линии первого и второго компонентов SZ Cam, а также обнаружены линии третьего тела, которое также оказалось спектрально-двойной системой. На основе новых данных SZ Cam была отнесена к типу разделенных систем. Наличие третьего тела в системе SZ Cam было подтверждено также спеклинтерферометрически Мейсоном и др. [96].

Проведение дальнейшего спектрального и спеклинтерферометрического исследования SZ Cam с помощью современных типов спектрометров на тот момент было вызвано необходимостью уточнения масс компонентов SZ Cam, а также компонентов третьего тела и определения параметров его относительной орбиты.
Спектральная двойственность ADS 2984A (HD 25639, HR 1260), зарегистрированная по смещению спектральных линий, была обнаружена на основе фотографических наблюдений Пласкеттом [91] еще в 1924 году и подтвердилась данными практически всех спектральных исследований этой звезды. Тем не менее, найти значение периода и получить кривые(ую) лучевых скоростей не удавалось, несмотря на достаточно большую яркость ADS 2984A ~ 7^m и наличия спектральных данных с достаточно большим отношением сигнал/шум, см., например, [94].

Для решения поставленных вопросов и было предпринято исследование, представленное во второй главе данной диссертационной работы. А именно:

В разделе 2.1 приведено описание процесса получения электрофотометрических данных, построения кривых блеска и определения параметров компонентов SZ Cam.

В разделе 2.2 описывается определение абсолютных параметров компонентов SZ Cam и третьего тела на основе построения кривых лучевых скоростей по спектральным данным, полученным автором.

В разделе 2.3 определяются параметры визуальной орбиты третьего тела, также являющегося ТДС, на основе спеклинтерферометрических данных и данных изменения периода SZ Cam.

В разделе 2.4 приведен процесс определения периода ADS 2984A и построения кривой лучевых скоростей.

В разделе 2.5 приведены обсуждение и выводы по результатам данной главы.

Результаты данного исследования опубликованы в следующих статьях:

 Gorda S. Yu. UBVR-Photometry of the Eclipsing Binary SZ Cam // Information Bulletin on Variable Stars. — 2000.— № 4839. — Pp. 1-4.

- Gorda S. Yu. Confirmation of a Double Nature of the Third Body in SZ Cam // Information Bulletin on Variable Stars. - 2002. - Nº 5345. -Pp. 1-4.
- Gorda S. Yu., Balega Yu. Yu., Pluzhnik E. A. and Shkhagosheva Z. U Visual orbit of the third body on the eclipsing binary SZ Cam // Astronomical and Astrophysical Transactions. — 2007. — V. 26. — Pp. 145-146.
- Gorda S. Yu., Balega Yu. Yu., Pluzhnik E. A. and Shkhagosheva Z. U Parameters of the apparent relative orbit of the third body in the SZ Cam system. // Astrophysical Bulletin. — 2007. V. 62. — Pp. 352-359.
- Горда С. Ю. Новая спектрофотометрия SZ Сат (проблема третьего компонента). // Письма в Астрономический Журнал. 2008. Т. 34. С. 351-361.
- Горда С. Ю. Результаты долговременного мониторинга кратной системы SZ Cam // Письма в Астрономический Журнал. 2015. Т. 41. С. 303-316.
- Горда С. Ю. Кривая лучевых скоростей спектрально-двойной HD 25639 (ADS 2984A). // Письма в Астрономический Журнал. — 2016. — Т. 42 — С. 762-772.

2.1. Сканерное Фотометрическое исследование SZ Cam (ADS 2984B)

2.1.1. Сканерные Фотометрическое наблюдения SZ Cam в Коуровской обсерватории

Фотометрические наблюдения SZ Сат были проведены диссертантом в период с 1996г. по 2013г. на телескопе-рефлекторе A3T-3 (D = 0.45 м, $F_{cass} = 10$ м) Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета, с применением одноканального электрофотометра, оснащенного блоком сканирования изображений (1996 - 2007гг.), и ПЗСкамеры U6 фирмы Apogee, оснащенной ПЗС-чипом КАF-1001, 1024х1024, 24мкм, и установленной в фокусе Ньютона ($F_{new} = 2.0$ м) этого же телескопа, (2011 - 2013гг.).

Для построения кривых блеска использовались данные, полученные только на электрофотометре в четырех фильтрах, реализующих систему близкую к стандартной системе UBVR. Наблюдения с помощью ПЗСкамеры проводились исключительно с целью регистрации моментов минимумов SZ Cam в трех U, B и V фильтрах.

В качестве звезды сравнения использовался южный компонент этой визуально-двойной звезды ADS 2984A раннего спектрального класса B0 III (Слеттебак [97]), B0 II (Абт [98]), поскольку являлся практически идеальной звездой сравнения. Как отмечено в работе Лоренца и др. [94], у компонента ADS 2984A не было зарегистрировано изменений блеска в пределах 0.^m01. Он имеет практически одинаковый с переменной SZ Cam блеск и цвет и расположен от нее на расстоянии всего 18". Поэтому, полностью исчезает необходимость в учете эффектов атмосферной экстинкции.

Для исключения влияния на результаты фотометрии SZ Сат блеска этого близкого соседнего компонента, $m_V \sim 7^m$ применялся метод сканирования изображений щелью (Ракоши [99], Франц [100]) в модификации автора [101, 102]. С этой целью одноканальный электрофотометр был оборудован блоком сканирования изображений и работал в режиме квазитрехканального, когда накопление сигнала от обоих компонентов визуальнодвойной ADS 2984 и фона неба происходило практически одновременно. Время записи одного скана изображения визуально-двойной звезды, включающего фон неба, не превышало 1.5 с. В один профиль суммировалось по 100 сканов, что было достаточно для получения профиля с пригодным для дальнейшей обработки значением отношения сигнал/шум.

Помимо сканов SZ Cam и ее визуального компаньона, с частотой один

раз в полчаса производились сканерные наблюдения одиночной звезды, в качестве которой была выбрана звезда по характеристикам блеска и цвета близким к SZ Cam. Это звезда HD 25443, имеющая блеск $m_V = 6.78^m$ и спектральный класс B0.5III.

Для определения блеска каждого из компонентов сканерные профили компонентов двойной звезды ADS 2984A и ADS 2984B - SZ Cam) аппроксимировались суммой сглаженных, нормированных профилей одиночной звезды. Поскольку из-за атмосферных эффектов вид звездного изображения постоянно менялся, процедура аппроксимации каждого профиля ADS 2984 проводилась последовательным перебором всех профилей одиночной звезды, полученных за ночь. Окончательно использовались результаты, полученные с тем профилем одиночной звезды, который максимально точно описывал форму профилей компонентов ADS 2984 в момент наблюдения. Таким образом, были получены все значения разностей блеска SZ Cam относительно соседнего компонента ADS 2984A в U, B, V и Rфильтрах. Более полную информацию о методике сканерной фотометрии, применявшейся автором при наблюдениях переменных звезд, являющихся компонентами визуально-двойных систем, можно найти в кандидатской диссертационной работе автора [103].

Среднеквадратичная ошибка одного измерения, определенная по разбросу точек на участках кривых блеска, полученных в течение одной ночи, не превышала величины $\pm 0.008^m$. Всего было получено 1397, 1395, 1390 и 1374 точек в фильтрах U, B, V и R, соответственно. Предварительные результаты наблюдений (кривые блеска) были опубликованы автором в 2000 году [105].

Также, за все время наблюдений автором было получено 22 значения моментов минимумов SZ Cam [104]. В период с 1985 по 2005 гг. моменты минимумов определялись по наблюдениям, выполненным методом сканерной фотометрии, а с 2006 по 2013 г. с использованием ПЗС-матрицы. Значения всех полученных моментов минимумов приведены в табл. 2.1.

Необходимые для построения кривых блеска фотометрические фазы были вычислены по следующей формуле:

$$\varphi = \frac{JD_{\odot}(JD_{\odot} - (JD_{\odot}I_{min} + P \cdot E + \Delta P \cdot E^2)}{P + \Delta P \cdot E}, \qquad (2.1)$$

которая учитывает изменение периода из-за движения SZ Cam по взаимной орбите с третьим телом. Здесь $JD_{\odot}I_{min}$, P и ΔP являются параметрами квадратичного эфемеридного уравнения, значения которых были взяты из работы автора [106].

Полученные значения моментов наблюдений, фотометрических фаз и разностей блеска в электронном виде приведены в базе данных VizieR [108], а построенные на их основе кривые блеска SZ Cam в U, B, V и R фильтрах на рис.2.1. Можно видеть, что форма кривых блеска во всех фильтрах практически одинакова. Величина среднеквадратической ошибки разброса точек на кривых блеска не превышает $\pm 0.^m 011$ во всех фильтрах. Значения глубин главного и вторичного минимумов в B, V, u R - фильтрах составляют $\delta m_P = \Delta m_{min_P} - \Delta m_{max} = 0.^m 275, \delta m_S = \Delta m_{min_S} - \Delta m_{max} = 0.^m 227,$ соответственно. В фильтре U значения глубин минимумов немного отли $чаются - <math>\delta m_P = 0.^m 288, \delta m_S = 0.^m 222.$

В период получения наблюдательного материала автором, в 2004-2005гг., кривые блеска SZ Cam с небольшими пробелами на отдельных фазах в $UBVI_c$ фильтрах с применением ПЗС-приемника были получены Михальской и др. [109]. Также в 2012г. были опубликованы результаты иследования SZ Cam, выполненные на основе ПЗС-фотометрии, полученной на небольшом телескопе в 2010-2011гг. Тамажо и др. [110]. Параметры системы, найденные на основе новых фотометрических данных, полученных Тамажо и др. [110], достаточно хорошо согласуются с величинами, приведенными в предыдущих работах, упомянутых выше. На основе анализа разностей O-C (кривая блеска – синтетическая кривая)данные авторы об-

Таблица 2.1. Моменты минимумов блеска SZ Сат, полученные по электрофотометрическим (верхняя часть таблицы) и ПЗС наблюдениям на телескопе АЗТ-3 астрономической обсерватории Уральского университета в 1985-2013гг.

Ν	Дата	JD_{\odot}	ТИП
		2400000.0+	минимума
1	02.03.1985	46127.3300 ± 0.0030	II
2	25.03.1985	46150.2684 ± 0.0025	Ι
3	17.02.1999	51227.3545 ± 0.0006	II
4	21.02.1999	51231.3982 ± 0.0009	Ι
5	09.10.1999	51463.4610 ± 0.0011	Ι
6	28.11.1999	51501.2452 ± 0.0010	Ι
7	07.12.2001	52251.4000 ± 0.0015	Ι
8	15.12.2001	52259.4934 ± 0.0018	Ι
9	05.12.2002	52614.3371 ± 0.0020	II
10	20.12.2002	52629.1766 ± 0.0049	Ι
11	12.02.2003	52683.1464 ± 0.0018	Ι
12	14.10.2003	52927.3579 ± 0.0050	II
13	24.03.2004	53089.2574 ± 0.0030	II
14	09.04.2004	53105.4666 ± 0.0062	II
15	12.02.2005	53406.3284 ± 0.0061	Ι
16	03.03.2005	53433.3095 ± 0.0022	Ι
17	11.03.2007	54171.3336 ± 0.0020	II
18	20.10.2011	55855.1637 ± 0.0010	II
19	25.01.2012	55952.2960 ± 0.0018	II
20	13.02.2012	55971.1919 ± 0.0020	II
21	21.02.2012	55979.2829 ± 0.0020	II
22	08.11.2013	56605.3182 ± 0.0020	II



Рис. 2.1. Кривые блеска SZ Сат. Для исключения перекрытия изображений кривых блеска данные, полученные в U, V, R фильтрах, смещены на $-0^m.1, 0^m.1, 0^m.2$, соответственно

наружили остаточные малоамплитудные короткопериодические колебания блеска и сделали предположение о наличии в системе SZ Cam пульсирующего компонента типа β Cep.

Решение полученных автором кривых блеска было проведено с использованием пакета *PHOEBE* [111], реализующего метод синтеза кривых блеска на основе кода Вилсона-Девиннея [112]. Для поиска оптимальных значений искомых параметров в пакете используется симплекс-метод Нелдера-Мида.

Определение элементов орбиты и физических параметров компонентов затменной системы проводилось с одновременным использованием данных, полученных во всех четырех фильтрах. При этом отношение масс компонентов и расстояние между центрами компонент были взяты из данных обработки кривых лучевых скоростей, см. табл. 2.3, 2.4 раздела 2.2 настоящей работы. В процессе решения эти величины не варьировались. Вели-



Рис. 2.2. Кривая блеска SZ Сат в фильтре V, синтетическая кривая - сплошная красная линия и разности O - C в UBVR фильтрах. Величины смещений разностей O - C в U, V, R фильтрах такие же, как на предыдущем рисунке

чина третьего блеска в системе, согласно данным спеклинтерферометрии Мэйсона [96], Балеги и др. [113], принималась равной 30% и варьировалась в процессе решения. Начальные значения поверхностных температур и lg(g) главного и вторичного компонентов были приняты согласно данным решения кривых блеска Тамажо и др. [110].

Соответствующая полученному решению синтетическая кривая блеска для фильтра V, а также разности O - C для всех четырех фильтров приведены на рис.2.2. Можно видеть, что приближение наблюдательных кривых блеска синтетическими кривыми достаточно хорошее. Разности O - C не показывают заметных систематических отклонений. Найденные в процессе решения параметры SZ Cam приведены в табл.2.2, их значения лежат в интервале величин, приведенных в работах Лоренца и др. [94], Майера и др. [114] и Тамажо и др. [110].

параметр	значение	параметр	значение
i	$78^{\circ}.5 \pm 0^{\circ}.5$	q	0.72 ± 0.01
$a(R_{\odot})$	20.4	$log(g_1)$	3.71 ± 0.02
$\overline{r_1}$	0.376 ± 0.007	$log(g_2)$	3.96 ± 0.03
$\overline{r_2}$	0.241 ± 0.012	$T_1^{eff}(K)$	30408 ± 240
r_1^{pole}	0.358 ± 0.007	$T_2^{eff}(K)$	27319 ± 300
r_1^{point}	0.420 ± 0.007	J_1/J_2	1.31
r_1^{side}	0.374 ± 0.007	Ω_1	3.470 ± 0.027
r_1^{back}	0.394 ± 0.007	Ω_2	4.164 ± 0.030
r_2^{pole}	0.236 ± 0.012	$\Omega(L_1)$	3.278 ± 0.025
r_2^{point}	0.249 ± 0.013	$\Omega(L_2)$	2.867 ± 0.024
r_2^{side}	0.240 ± 0.011	L_1	0.532
r_2^{back}	0.246 ± 0.012	L_2	0.158
$R_1(R_\odot)$	9.36 ± 0.07	l_3	0.310
$R_2(R_\odot)$	6.00 ± 0.09	M_1^{bol}	-7.28 ± 0.05
$M_1(M_{\odot})$	16.59 ± 0.62	M_2^{bol}	-5.85 ± 0.06
$M_2(M_{\odot})$	11.95 ± 0.71		

Таблица 2.2. Параметры фотометрической орбиты и компонентов SZ Cam

С целью проверки данных наших наблюдений на наличие короткопериодических малоамплитудных колебаний блеска SZ Cam, обнаруженных Тамажо и др. [110], разности блеска O-C для всех четырех фильтров были свернуты с периодом 0^d.33265. Свертка разностей *О* – *С* с этим периодом не показала каких-либо существенных колебаний блеска на кривой O-C. В тоже время, при свертке данных с периодом 0^d .3325, очень близким к периоду, найденному Тамажо и др. [110], на кривой O - C просматривалось небольшое колебание блеска с амплитудой порядка 0^m.006 на интервале фаз $\Delta \varphi = 0.4$, в то время как на остальной части кривой изменения блеска сколько-нибудь заметной амплитуды отсутствовали. Такое изменение вряд ли можно интерпретировать, как значимую переменность определенного типа. Вероятнее всего, этот эффект вызван случайными флуктуациями блеска SZ Cam на отдельных интервалах времени, близких к значению указанного выше периода. Отсутствие в наших наблюдениях периодических колебаний блеска с периодом 0^d.33265, обнаруженных Тамажо и др. [110], можно также объяснить маскированием их амплитуды более значительным разбросом точек в наших кривых блеска, чем в данных Тамажо и др. [110]. Нельзя исключить также и наличие в разностях O - C систематических отклонений, вызванных смещениями синтетической кривой блеска, построенной на основе заданной модели тесной двойной системы, относительно коридора разброса точек на наблюдаемой кривой блеска. Такие отклонения могут также приводить к маскированию имеющихся периодов изменения блеска. Нельзя отрицать и возможность уменьшения амплитуды пульсационных колебаний компонента третьего тела типа $\beta \ Cep$ в период наших наблюдений. Следует также отметить, что найденное Тамажо и др. [110] значение периода лежит на верхней границе распределения периодов пульсаций звезд типа β Cep и его величина почти точно составляет одну треть продолжительности суток. Возможно эти флуктуации блеска как-то связаны с технологией процесса наблюдений, на что указывает, например, Пигульски и др. [116].

Скорее всего причина возможного маскирования короткопериодических колебаний блеска, обнаруженных Тамажо и др. [110] и интерпретированных, как пульсации типа β *Cep* одного из компонентов третьего тела, может быть связана с наличием периодического(их) колебания(ий) блеска иной природы.

Как указано выше, в системе SZ Cam присутствует спектральнодвойной третий компонент, который представляет собой тесную двойную систему с компонентами, форма которых может быть деформирована приливными эффектами. По этой причине на кривых блеска SZ Cam могут проявляться эффекты, связанные с изменением общего блеска в виде, так называемой, синусоидальной переменности (ELL по классификации OK-ПЗ). Поскольку на кривых блеска SZ Cam больших искажений не отмечается, можно предположить, что в системе третьего тела затмения отсутствуют. Тем не менее, эффект эллипсоидальности, вызванный деформацией компонент, вполне может иметь место. Степень деформации видимого в спектре SZ Cam массивного компонента третьего тела может быть невысокой, если второй, невидимый, компонент имеет малую массу. Оценка нижней границы его массы 1.4 M_{\odot} приведена в работе Горды [115]. Причина малой амплитуды изменения блеска может быть вызвана и значительной величиной угла наклона плоскости орбиты компонентов третьего тела к лучу зрения, поскольку затмения компонентов, как отмечено выше, не наблюдаются. Скорее всего проявление эффекта эллипсоидальности третьего тела на кривой блеска SZ Cam может быть слабым, с амплитудой колебаний блеска порядка 0.01^m и ниже.

Процедура проверки разностей *О* – *С* на наличие колебаний блеска с периодом третьего тела или близким к нему значением требует выполнения еще одного условия. Фаза изменения блеска разностей *О* – *С* должна соот-



Рис. 2.3. Кривая разностей O-C в UBVR фильтрах, свернутых с периодом 2^d .798, близким к периоду третьего тела $P^{3b} = 2^d$.797; о – разности – ; красная линия – аппроксимационная синусоида

ветствовать фазе изменения лучевых скоростей третьего тела. А именно, минимум кривой блеска разностей O - C должен приходиться на момент соединения компонентов, т.е когда их лучевая скорость близка к значению, так называемой, «гамма» скорости, наблюдаемой на фазах 0.0, 0.5 (параметр V_0^{3b} в табл. 2.5 раздела 2.2).

В нашем случае свертка разностей O-C со значением периода 2.798^d, удовлетворила обоим условиям. Результат приведен на Рис. 2.3, где также изображена аппроксимационная синусоида половинного периода, иллюстирующая проявление эффекта эллипсоидальности. Полная амплитуда волны синусоиды, характеризующая величину изменения блеска, оказалась порядка 0.008^m. Из сравнения кривой разностей O - C (см.Рис.2.3) и кривой лучевых скоростей третьего тела (см. Рис.2.6) можно сделать вывод о наличии необходимого фазового соотношения между ними. Равенство значений соответствующих коэффициентов эфемеридных уравнений, приведенных на рис.2.3 и в первых двух столбцах табл.2.5, также это подтверждает. Небольшую разницу в значениях периодов можно объяснить причинами, упомянутыми выше. Таким образом, есть все основания утверждать, что эффект эллипсоидальности, вызванный приливной деформацией компонентов третьего тела, проявляется на кривой блеска SZ Cam.

2.2. Спектральное исследование SZ Cam

Спектральные наблюдения SZ Сат были проведены автором совместно с сотрудниками Специальной Астрофизической Обсерватории (САО РАН) на телескопе Цейсс-1000 (D = 1 м)с использованием Кудэ-Эшелле спектрометра CEGS-Coude Echelle/Grating Spectrometer [118] в 2000 г. (получено 26 спектров) и на 6-м телескопе (БТА) в 2003 г. на эшеллеспектрометре НЭС 6-м телескопа САО РАН [119] (получено 5 спектров высокого разрешения $R = 60\,000$). Результаты этих наблюдений представлены в работах автора [115, 120]. Еще шесть спектров SZ Сат были получены автором в период с ноября 2013 г. по апрель 2014 г. на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения $R = 30\,000$ [121, 122] альт-азимутального телескопа (D = 1.21 м, F = 12.0 м) Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (Горда и др. [123]). В качестве светоприемного устройства в спектрометре использовалась ПЗС-камера, изготовленная в лаборатории перспективных разработок САО РАН, с ПЗС-чипом E2V 40-42 (2048х2048, 13.5 мкм), охлаждаемым до температуры жидкого азота системой замкнутого цикла CRYOTIGER.

Спектрограммы содержали по 60 перекрывающихся порядков, охватывающих спектральный интервал 4100 – 7500 A^o . Процедура получения и предварительной обработки полученных в Коуровской обсерватории спектров подробно описана в работе автора [115].

В полученных спектрах SZ Cam помимо широких линий Бальмеров-

ской серии водорода уверенно отождествлялись линии HeI, SiIII, просматривались следы линий СIII, NII, NIII, OIII. Кроме звездных линий в спектре отчетливо наблюдались полосы межзвездного поглощения, т.н. DIB-ы (Diffuse Interstellar Bands), межзвездные линии NaI и многочисленные теллурические линии в красной области спектра. В каждом спектре к дальнейшей обработке оказались пригодны несколько линий HeI, остальные имели малую глубину и практически терялись на фоне шума (значение отношения сигнал/шум по уровню непрерывного спектра не превышало величин 50-80). Все линии HeI представляли собой бленды с ярко выраженной триплетной структурой, впервые обнаруженной Майером и др. [93]. Причем, практически во всех блендах самым глубоким являлся профиль линии яркого компонента третьего тела, расположенный в середине бленды. По обеим сторонам от него располагаются профили главного и вторичного компонентов SZ Cam. Профиль более слабого вторичного компонента третьего тела явно в блендах спектральных линий не проявляется.

Разделение бленд линий HeI на компоненты проводилось методом аппроксимации профиля линии тремя гауссианами:

$$F(\lambda) = \sum_{i=1}^{3} a_i \exp((\lambda - b_i)^2 / c_i),$$
(2.2)

где a_i - амплитуда отдельного компонента, b_i - положение центра профиля компонента, c_i - параметр, определяющий ширину профиля компонента, λ - текущее значение длины волны для соответствующей точки профиля. Оптимальные значения параметров находились нелинейным методом наименьших квадратов, использующим алгоритм Марквардта. В общей сложности, при разделении отдельной бленды варьировались 11 параметров. Для отбора найденных решений в основном использовались два критерия – это минимальность суммы квадратов уклонений и соответствие лучевых скоростей основных компонентов SZ Сат их значениям, полученным по



Рис. 2.4. Пример разделения профиля линии HeI 5876 методом аппроксимации тремя гауссианами; тонкая сплошная линия - спектральный профиль, толстая сплошная линия - аппроксимационный профиль, щтриховая линия - профиль линии главного компонента, штрих-пунктирная линия - профиль линии вторичного компонента SZ Cam, пунктирная линия - профиль линии яркого компонента третьего тела.

более ранним наблюдениям на тех же фотометрических фазах. Особенно тщательный подход к процедуре отбора решений осуществлялся на фазах затмения, когда линии перекрывались особенно тесно.

Пример разделения линии HeI 5876 приведен на рис.2.4. Полученные автором значения лучевых скоростей главного, вторичного и третьего компонентов SZ Cam по наблюдениям на телескопах Цейсс-1000, БТА САО РАН и 1.2м телескопе Коуровской обсерватории приведены в табл. 1.1, 1.2 и 1.3, Приложение 1, соответственно.

Следует отметить, что все фотометрические наблюдения SZ Cam (Китамуры и Ямасаки [88], Полушиной [89], Хохола [90], Горды [104,105] показывают симметричную относительно фаз $\varphi = 0.0$ и $\varphi = 0.5$ форму кривой блеска. Это дает основание предположить, что ее компоненты обращают-



Рис. 2.5. Кривые лучевых скоростей главного (непрерывная линия) и вторичного (пунктирная линия) компонентов SZ Cam; • - лучевые скорости главного компонента, • - лучевые скорости вторичного компонента).

ся по круговым орбитам, поэтому кривые лучевых скоростей каждого из компонентов можно представить синусоидами.

При построении кривых лучевых скоростей SZ Cam и третьего тела помимо данных, полученных автором и упомянутых выше, были использованы данные из работ Майера и др. [93,114], Лоренца и др. [94]. Необходимые для построения кривых лучевых скоростей значения фотометрических фаз были вычислены с использованием уравнения (2.1), приведенного выше.

Полученные в результате кривые лучевых скоростей показаны на Рис.2.5, а численные значения полуамплитуд K_1 , K_2 , постоянной составляющей V_0 и отношения масс компонентов q приведены в табл. 2.3. Значение q = 0.72 в пределах ошибок практически совпало со значениями, получен-

Таблица 2.3. Значения коэффициентов кривых лучевых скоростей компонентов SZ Cam

$V_0(km/s)$	$K_1(km/s)$	$K_2(km/s)$	q
-3.6 ± 1.7	190.2 ± 1.9	263.0 ± 2.4	0.72 ± 0.01

Таблица 2.4. Значения масс и больших полуосей орбит компонентов SZ Cam.

	$M/M_{\odot}\sin^3 i$	$a/R_{\odot}\sin i$	M/M_{\odot}	a/R_{\odot}
главный	15.13 ± 0.31	9.90 ± 0.12	16.08 ± 0.33	10.10 ± 0.16
вторичный	10.94 ± 0.28	13.69 ± 0.15	11.63 ± 0.30	13.98 ± 0.18

ными ранее Майером и др. [114], но оказалось несколько меньше величины q = 0.74, приведенной в работе Тамажо и др. [110].

Значения проекций на картинную плоскость полуосей орбит компонентов SZ Cam $a_1 \sin i$, $a_2 \sin i$, а также величины $M_1 \sin^3 i$, $M_2 \sin^3 i$ приведены в первых двух столбцах табл. 2.4. Здесь i - угол наклона плоскости орбиты затменной к картинной плоскости. В третьем и четвертом столбцах табл. 2.4 представлены значения масс и больших полуосей компонентов SZ Cam, полученные при значении угла наклона $i = 78.5^{\circ}$, приведенного в табл. 2.2. Полученные значения в пределах погрешностей хорошо согласуются с данными Майера и др. [114], но немного больше значений, полученных Томаджо и др. [110].

Определение значений параметров кривой лучевых скоростей видимого компонента спектрально-двойного третьего тела в системе SZ Cam было проведено с использованием данных, указанных выше. С целью поиска возможных значений периода третьего тела временной ряд всех доступных на данный момент значений лучевых скоростей третьего тела был обработан с помощью программы поиска периодов переменных звезд Горанского Winefk, реализующей алгоритм Лафлера-Кинмана. В результате в широкой области частот φ на кривой $1/\theta(\varphi)$ был зарегистрирован толь-



Рис. 2.6. Кривая лучевых скоростей главного компонента третьего тела(сплошная линия); • - лучевые скорости главного компонента.

ко один высокий узкий пик, соответствующий значению периода 2^d.79704. Найденное значение периода по крайней мере до третьего знака после запятой, определенное на основе данных, полученных на временном интервале 20 лет, хорошо согласуется с опубликованными ранее оценками Лоренц и др. [94], Горда [115] и, вероятнее всего, существенно не изменится в дальнейшем при получении новых данных.

Кривая лучевых скоростей третьего тела в системе SZ Cam так же аппроксимировалась синусоидой, результат приведен на рис. 2.6 Полученные световые элементы и новые значения параметров кривой лучевых скоростей приведены в табл. 2.5

2.3. Параметры относительной орбиты третьего тела в системе SZ Cam

Изменение периода SZ Сат было замечено достаточно давно. Поскольку ранее, после работы Хохола [92], система была отнесена к классу

Таблица 2.5. Световые элементы и параметры наблюдаемой кривой лучевых скоростей третьего тела

JD_{\odot}	P^{3b} (day)	$V_0^{3b}(km/s)$	$K_1^{3b}(km/s)$
2454096.9565 ± 0.0021	2.79704 ± 0.00095	4.2 ± 0.6	26.6 ± 0.8

полуразделенных систем, изменение периода объяснялось процессом переноса и потери массы этой ТДС. Только с середины 90-х годов прошлого века, когда в системе спектроскопическим методом было обнаружено существование третьего тела [93], оказавшегося тоже двойной системой [94], была дана новая интерпретация изменения периода системы, объясняющая его взаимным движением этих двух ТДС по орбитам вокруг общего центра масс (аналог эффекта Доплера, основанный на изменении частоты наступлений затмений в затменной системе SZ Cam для внешнего наблюдателя).

Используя результаты единственного на тот момент спеклинтерферометрического исследования SZ Cam, проведенного Мэйсоном [96] и обнаружившего на угловом расстоянии 0".071 от SZ Cam визуальный спутник, Лоренц и др. [94] вычислили четыре варианта визуальной орбиты третьего тела для двух значений периода 50.7 лет и 60.1 год и двух углов наклона $i = 60^{\circ}$ и $i = 90^{\circ}$.

Таким образом, анализ данных спектральных наблюдений SZ Cam, полученных с применением современных приемников излучения, имеющих большое отношение сигнал/шум, позволил пересмотреть эволюционный статус системы, обнаружить наличие третьего тела и заподозрить его двойственную природу. Тем не менее, недостаток на тот момент как фотометрических, так и спеклинтерферометрических данных не позволил упомянутым выше авторам однозначно определить параметры орбиты третьего тела.

2.3.1. Основные соотношения

Задачу определения параметров относительной орбиты тесного визуального спутника (третьего тела) в системе затменно-двойной звезды, в случае недостаточного количества позиционных определений, можно решить, привлекая данные фотометрических измерений, а именно, используя значения моментов минимумов блеска, полученные на временном интервале, сравнимом с периодом обращения третьего тела. Учитывая, что эллипсы взаимных орбит затменной системы и третьего тела подобны [124], определение полного набора параметров орбит можно провести в два этапа. Сначала по кривой изменения периода (O – C - JD) затменной двойной SZ Cas находится часть параметров ее взаимной орбиты с третьим телом, определяющих вид этой кривой. Затем определяется часть параметров видимой относительной орбиты третьего тела с привлечением данных позиционных (в нашем случае спеклинтерферометрических) наблюдений. Принимая далее во внимание тот факт, что значения углов, определяющих ориентацию орбит третьего тела и затменной пары в пространстве, будут принимать одинаковые значения, либо отличаться на 180°, а значения эксцентриситетов иметь одну и ту же величину, можно окончательно найти все шесть параметров видимой относительной орбиты третьего тела.

Соответствующие уравнения [125,126], описывающие зависимости наблюдательных данных как функции параметров орбит, приведены ниже:

$$tg(\theta - \Omega) = tg(\upsilon + \omega)\cos i, \qquad (2.3)$$

$$\rho = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\upsilon} \cdot \frac{\cos(\upsilon+\omega)}{\cos(\theta-\Omega)}, \qquad (2.4)$$

$$z = a'(1 - e\cos E')\sin i\sin(\upsilon + \omega), \qquad (2.5)$$

$$\delta t = \frac{z}{c},\tag{2.6}$$

где Ω - позиционный угол линии узлов, ω - долгота периастра, v - истинная аномалия, i - угол наклона плоскости орбиты к картинной плоскости, *a* - большая полуось видимой относительной орбиты третьего тела, выраженная в секундах дуги, *e* - эксцентриситет, a' - большая полуось орбиты затменной системы в а.е. относительно барицентра системы затменная - третье тело, E' - эксцентричная аномалия, ω - долгота периастра, *c* – скорость света.

В нашем случае уравнения (2.3) и (2.4) отражают связь величин позиционных измерений - углового разделения ρ и позиционного угла θ с элементами видимой относительной орбиты третьего тела. Уравнение (2.5) описывает изменение проекции радиуса вектора орбиты затменной двойной z на луч зрения, а уравнение (2.6) — время запаздывания или опережения наблюдаемых явлений в затменной системе по мере ее движения по орбите вокруг общего с третьим телом центра масс. Величина δt соответствует, например, разности между наблюдаемым и истинным моментом минимума блеска затменной системы. В нашем случае функция изменения δt со временем, например, $\delta t(JD)$ описывает наблюдаемую кривую изменения периода ТДС вследствие движения системы по орбите с третьим телом.

2.3.2. Спекл-интерферометрия SZ Cam

Поскольку на исходный момент имелось только одно измерение ρ и θ (Мейсон [96]), для определения полного набора параметров орбиты третьего тела необходимо было получить, по крайней мере, еще одно значение ρ и θ на другую эпоху.

Спекл-интерферометрические наблюдения SZ Сат были проведены автором совместно с сотрудниками САО РАН в период с 31 марта по 4 апреля 2002г. с использованием цифрового спекл-интерферометра [127], установленного в главном фокусе 6-м телескопа САО РАН. Измерения проводились в двух узкополосных фильтрах, центрированных на длины

Эпоха	ho''	$ heta^{\circ}$	фильтр(нм)	кол. кадров	телескоп	Источник
1994.7035	0.071	300	549/22		3.8-м	Мейсон [96]
2002.2485	0.076	295.107	545/25	1500	6-м	CAO
2002.2485	0.076	295.806	750/35	1500	6-м	CAO
2002.2486	0.075	295.453	750/35	1500	6-м	CAO
2002.2485	0.076 ± 0.001	295.6 ± 0.5		4500	6-м	CAO

Таблица 2.6. Данные спекл-интерферометрических измерений близкого спутника в системе SZ Cam

волн 545 нм и 750 нм. В общей сложности было получено порядка 4500 спекл-интерферограмм SZ Cam с экспозицией 20 мс. Обработка данных производилась методом, применяемым в САО РАН для редукции спеклинтерферометрических наблюдений [128]. В результате были получены новые значения разделения и позиционного угла очень близкого спутника SZ Cam на вторую эпоху $T_2 = 2002.2485$. Результаты имеющихся на сегодняшний момент спекл-интерферометрических наблюдений SZ Cam приведены в табл. 2.6, где в первом столбце дана эпоха наблюдений, выраженная в долях года, во втором - значение разделения ρ , в третьем столбце значение угла θ , в четвертом столбце - длина волны применяемого фильтра/ширина полосы пропускания, в пятом - количество измерений в данном фильтре, в шестом - диаметр объектива используемого телескопа и в седьмом столбце - источник данных. Усреденные значения полученных нами позиционных параметров и их погрешностей приведены в последней строке табл. 2.6. Как можно видеть, наблюдается существенное отличие позиционных параметров тесного спутника, полученных на 6-м телескопе, от данных Мейсона и др. [96] 1994 года, что с большой долей вероятности может свидетельствовать о наличии физической связи затменной системы и ее близкого визуального спутника.

К сожалению, из-за больших, порядка 3["] – 4["], размеров изображений в период наблюдений не удалось определить значение разности блеска между SZ Cam и ее спекл-интерферометрическим спутником.

Проведенные в это же время спекл-интерферометрические наблюдения визуального спутника SZ Cam ($\rho = 18''$) не выявили у него наличие близкого соседа, по крайней мере в пределах радиуса до 1''.

2.3.3. Аппроксимация световой кривой O-C

Для построения световой кривой были использованы все известные на тот момент данные о моментах минимумов SZ Cam. Помимо значений из табл. 2.1, были использованы данные фотографической фотометрии SZ Cam, приведенные в пионерской работе Весселинка [87], а также моменты минимумов из работ Китамуры и Ямасаки [88], Полушиной [89], Хохола [90], Майера и др. [93], Цаше и др. [129]. В общей сложности было использовано 119 значений моментов минимумов SZ Cam.

Значения (O-C), вычислялись согласно световому уравнению, представляемому следующим простым соотношением:

$$O - C = JD_{min}^{obs} - (JD_{\odot}I_{min} + P \cdot E), \qquad (2.7)$$

где JD_{min}^{obs} - значение момента минимума блеска, определенное из наблюдений, $JD_{\odot} I_{min}$ - значение момента главного минимума на определенную эпоху, P - истинный период затменной системы, E - число циклов, протекших с момента $JD_{\odot}I_{min}$ до заданного момента минимума. В качестве начального приближения $JD_{\odot} I_{min}$ мы использовали значение первого момента минимума, приведенного в работе Весселинка [87], а в качестве P значение истинного периода SZ Сат из работы Лоренца и др. [94].

Аппроксимация наблюдательных данных (O - C) теоретической световой кривой δt , соотношения (2.5, 2.6), с целью определения параметров орбиты SZ Cam, проводилась методом наименьших квадратов. В процессе апроксимации методом случайного поиска подбирались значения $a' \sin(i)$,



Рис. 2.7. Световая кривая SZ Cam (непрерывная линия), • - величины -, вычисленные по значениям моментов минимумов.

Таблица 2.7. Параметры орбиты SZ Сат относительно третьего тела.

P_{orb}	55.6 ± 1.5 года
$(\delta t_{max} - \delta t_{min})/2$	$0^{d}.0904$
e	0.72 ± 0.04
ω	$26^{\circ}.3\pm1^{\circ}.6$
$T_0(JD)$	2444435 ± 30
$a'\sin i$	-20.5 ± 1.2 a.e.
P_0 (SZ Cam)	$2^{d}.6984676$
$JD_{\odot}I_{min}$	$2426286^d.7647$

 e, ω , а также T_0 - момент прохождения перигелия и P_{orb} - период обращения SZ Cam вокруг третьего тела. Кроме того уточнялись значения $JD_{\odot} I_{min}$ и P, при этом на каждом шаге, когда менялись значения этих величин, производился пересчет значений (O - C), согласно выражению (2.7).

Световая кривая представлена на рис. 2.7, а в табл. 2.7 приведены значения ее параметров, где P_{orb} - период обращения SZ Cam по взаимной орбите с третьим телом; $(\delta t_{max} - \delta t_{min})/2$ - полуамплитуда изменений световой кривой; e - эксцентриситет орбиты; ω - ; T_0 - момент прохождения периастра; $a \sin i$ - проекция большой полуоси орбиты на картинную плоскость; P_0 - истинный период обращения компонентов SZ Cam; $JD_{\odot}I_{min}$ момент эфемеридного минимума SZ Cam.

2.3.4. Определение полного набора параметров относительной орбиты третьего тела

Значения трех недостающих параметров орбиты - долготы восходящего узла - Ω , большой полуоси орбиты - a третьего тела в системе SZ Cam и наклонения орбиты - i находились по данным спеклинтерферометрических наблюдений. Первоначально был сделан переход от величин ρ и θ к прямоугольным координатам x и y, где ось x соответствует направлению на восток, а y на север. Затем, путем варьирования значений искомых параметров Ω , a и i, минимизировалась сумма квадратов уклонений координат двух положений спутника, полученных из наблюдений, от соответствующих им точек вычисляемой орбиты. При этом в выражения (2.3) и (2.4), которые для работы в прямоугольных координатах были соответствующим образом преобразованы, подставлялись найденные ранее по световой кривой значения P_{orb} , ω , и e.

Следует отметить, что построенная на основании вычисленных по данной схеме параметров видимая относительная орбита третьего тела недостаточно хорошо аппроксимировала данные спекл-интерферометрических наблюдений. Поэтому, несмотря на то, что в данном случае сумма квадратов уклонений вычислялась только по четырем слагаемым (по две координаты на каждую точку), для улучшения аппроксимации мы вынуждены были помимо трех, упомянутых выше, параметров варьировать еще одну какую-либо величину. А именно, наименьшие значения суммы квадратов уклонений получались при варьировании Porb. Естественно, после определения нового значения параметра P_{orb} заново проводилась аппроксимация кривой O - C, при фиксированном значении данного параметра. При этом сумма квадратов уклонений получаемой световой кривой от значений О – С, вычисленных по данным наблюденний, имела несколько большее значение, чем в случае варьирования всех параметров, определяющих ее вид. Учитывая тот факт, что масштаб уклонений координат наблюдаемых величин от соответствующих точек аппроксимирующих кривых как в случае световой кривой, так и видимой орбиты, имел приблизительно одинаковое значение, окончательный подбор всех параметров производился по минимуму объединенной суммы квадратов уклонений S вида:

$$S = S_{O-C} + kS_{orb}, (2.8)$$

где S_{O-C} и S_{orb} - значения сумм квадратов уклонений для световой кривой и относительной орбиты, соответственно, k = 20 - весовой коэффициент пропорциональный отношению числа слагаемых S_{O-C} (количество использованных значений мимнимумов) к числу слагаемых S_{orb} . Данный весовой коэфициент вводился для уравнивания значимости обоих слагаемых, а следовательно и параметров орбиты, получаемых по той или другой кривой.

Значения параметров видимой относительной орбиты третьего тела, гравитационно связанного с SZ Cam, приведены в табл. 2.8, а на рис. 2.8 изображено положение вычисленной орбиты относительно двух измерений третьего тела, полученных по данным спеклинтерферометрических наблю-

T_0	P_{orb}	e	a
1980.437 ± 0.082	$53^{d}.5 \pm 1.5$	0.78 ± 0.05	$0''.047 \pm 0''.002$
T_0	i	Ω	ω
1980.437 ± 0.082	$72^{\circ}.9 \pm 2^{\circ}.1$	$302^{\circ}.0 \pm 2^{\circ}.1$	$26^{\circ}.3 \pm 1^{\circ}.6$

Таблица 2.8. Параметры видимой относительной орбиты третьего тела



Рис. 2.8. Видимая относительная орбита третьего тела (непрерывная линия); • - данные спеклинтерферометрических наблюдений; • - вычисленные положения третьего тела на эпохи начала десятилетий

дений.

Ниже приведены световые элементы, которые можно использовать для вычисления значений наблюдаемого периода SZ Cam на ближайшую эпоху. Для их определения использовались значения моментов минимумов за последние 20 лет. На рис. 2.7 им соответствует нисходящая ветвь световой кривой. Эти данные хорошо аппроксимируются следующей параболической зависимостью:

$$JD_{\odot} = 2451922.1883 + 2.69841927 \cdot E + 0.457 \cdot 10^{-8} \cdot E^2 \tag{2.9}$$

Отсюда, световые элементы, пригодные для вычисления моментов минимумов SZ Cam в настоящее время, имеют следующий вид:

$$JD_{\odot}I_{min} = 2453676.1628 + 2.6984222 \cdot E \tag{2.10}$$

2.3.5. Оценки массы третьего тела и расстояния до SZ Cam

Оценка массы третьего тела M_3 производилась с использованием функции масс $f(M_3)$ системы SZ Cam - спекл-интерферометрический спутник, которую в данном случае можно записать следующий образом:

$$f(M_3) = \frac{(M_3 \sin i)^3}{(M_{12} + M_3)^2},$$
(2.11)

где M_{12} суммарная масса первого и второго компонентов затменной системы. Как известно функцию масс можно также выразить через элементы орбиты, используя следующее соотношение:

$$f(M_3) = \frac{a'^3 \sin^3 i}{P_{orb}^2}$$
(2.12)

Приравнивая правые части выражений (2.11) и (2.12), получаем урав-

нение относительно M_3 . Подставив в него найденные значения a', i и P_{orb} , а также $M_{12} = 28.5 \pm 0.5 M_{\odot}$ из работы [115], получаем следующую оценку массы третьего тела: $M_3 = 23.4 \pm 2.4 M_{\odot}$. Большое значение массы, а также периодическое смещение спектральных линий, принадлежащих третьему телу [94, 120], указывают на двойственную природу этого объекта.

Используя найденное значение массы третьего тела, оценим расстояние от Солнца до SZ Cam. Для этого используем выражение для большой полуоси относительной орбиты двух притягивающих центров, которое в нашем случае можно записать в следующем виде:

$$A = a' + a_3 = a' \frac{M_{12} + M_3}{M_3},$$
(2.13)

где a_3 - большая полуось орбиты третьего тела. Подставив в (2.13) приведенные выше значения M_{12} , M_3 и a', получим следующее значение большой полуоси относительной орбиты третьего тела $A = 52.9 \pm 5.8$ а.е. Затем, зная величину a, выраженную в угловой мере (см. табл. 2.8), найдем оценку расстояния d до системы SZ Cam, используя очевидное соотношение:

$$d = \frac{A}{a} = \frac{52.9 \text{ au}}{0''.047} = 1125 \pm 135 \text{ ps}$$
(2.14)

Новые фотометрические и спекл-интерферометрических данные, использованные в данной работе, позволили обнаружить угловое смещение тесного спутника, отождествляемого с третьим телом, относительно SZ Cam, а также получить однозначные оценки значений параметров его видимой относительной орбиты.

Существенное уточнение параметров орбиты тесного спутника возможно после получения, по крайней мере, еще нескольких спекл-интерферометрических определений его положения относительно SZ Cam. В настоящий момент, согласно полученным автором параметрам орбиты, третье тело находится в окрестности своего апоастра и его видимое смещение минимально. Поэтому точная орбита с использованием только позиционных данных может быть получена не ранее, чем через 5 – 10 лет.

Найденное значение угла наклона плоскости орбиты SZ Cam $i = 72^{\circ}.9$ сравнимо по величине со значением угла наклона $i = 74^{\circ} - 78^{\circ}$, приведенного в работе Лоренца и др. [94]. Это обстоятельство позволяет предположить, что плоскости орбит компонентов этой, по всей видимости четверной, иерархической системы параллельны. По крайней мере, это справедливо для SZ Cam.

Предположение о параллельности орбиты компонентов третьего тела необходимо делать с большой оговоркой, поскольку в этом случае в системе третьего тела должны наблюдаться затмения, а т.к. суммарные массы компонентов SZ Cam и третьего тела имеют значения более $20M_{\odot}$ и сравнимы по величине, имеет смысл предположить, что система третьего тела подобна SZ Cam, и ее блеск, вследствие затмений, должен существенно меняться. Это, в свою очередь, должно определенным образом сказываться на кривой блеска SZ Cam. Тем не менее, искажений кривой блеска SZ Cam на величину более 0.^m03 не наблюдается [104, 105, 110].

2.4. Кривая лучевых скоростей ADS 2984 A

Как отмечено в начале данной главы спектрально-двойная ADS 2984 A (HD 25639, HR 1260) раннего спектрального класса B0 III [97], B0 II [98] является южным компонентом визуально-двойной звезды ADS 2984. В табл. 2.9 приведены параметры компонентов визуально-двойной системы ADS2984 из работы Холе и др. [130].

Спектральная двойственность ADS 2984 A, зарегистрированная по смещению спектральных линий, была обнаружена на основе фотографических наблюдений Пласкеттом [91] еще в 1924 году и подтвердилась данными практически всех спектральных исследований этой звезды [91, 94, 114, 130, 131]. Однако, до настоящего времени периодичность в

компонент	V	B-V	Спектр
А	6.88	0.469	B0II
B (SZ Cam)	6.91	0.428	O9IV + B0V

Таблица 2.9. Параметры компонентов визуально-двойной системы ADS 2984

смещениях спектральных линий не была найдена.

Наиболее детальное исследование особенностей спектральных линий ADS 2984 А представлено в работе Лоренца и др. [94]. Авторы пришли к выводу, что в спектре, вероятнее всего, наблюдаются линии одного компонента, поскольку они не обнаружили значимых изменений значений полуширины (FWHM) линий бальмеровской серии водорода и нейтрального гелия со временем. Существенное уширение спектральных линий ADS 2984A по сравнению с линиями затменно-переменного соседа – ADS 2984B (SZ Cam), состоящего из звезд спектрального класса O9V — B0V, они объяснили быстрым вращением видимого в спектре компонента $-v \sin(i) \approx 220$ км/с. Большое значение $v \sin(i)$ свидетельствует об отсутствии синхронизации периода вращения звезды с орбитальным периодом, как это имеет место у соседа, представляющего собой иерархическую квадрупольную систему, состоящую из двух тесных двойных систем с орбитальными периодами порядка 2.7 суток, обращающихся по взаимной орбите с периодом ~ 50 лет. Учитывая это обстоятельство, авторы предположили, что двойная система ADS 2984A достаточно широкая и наиболее вероятное значение ее орбитального периода составляет несколько десятков суток. Они также сделали предположение, что причиной небольших изменений формы и глубины спектральных линий может быть наличие переменного звездного ветра, истекающего с поверхности этой звезды, являющейся голубым гигантом.

2.4.1. Спектральные наблюдения ADS 2984 A

Спеклинтерферометрические наблюдения ADS 2984, проведенные автором совместно с сотрудниками отдела спеклинтерферометрических исследований САО РАН на 6 м телескопе [106, 107], не показали наличия спутника у ADS 2984A, в отличие от визуального компонета ADS 2984B (SZ Cam), имеющего третье тело на угловом расстоянии 0.072″ и представляющего собой тесную двойную систему.

Информация о переменности или постоянстве блеска ADS 2984A носит противоречивый характер. Впервые на переменность блеска в пределах $0.06^m - 0.07^m$ на основе фотоэлектронных данных указывали Гутник и Прагер [86] (1930 г.). Звезда была занесена в каталог "Звезд Заподозренных в Переменности Блеска"под номером NSV 1458. В то же время Весселинк [87] (1941 г.) и Китамура и Ямасаки [88] (1972 г.) не нашли изменений блеска ADS 2984 A в пределах ошибок наблюдений. Позже Дельгадо и др. [132] (1992 г.) обнаружили колебания блеска ADS 2984A с амплитудой порядка 0.01^m и периодом 4.6 часа, зарегистрированные в течение двух из четырех ночей наблюдений, и заподозрили звезду в переменности типа β Сер . Последующие измерения, проведенные Лоренцем и др. [94], Михальской и др. [109] и Майером и др. [114], не показади сколько-нибудь заметной переменности блеска ADS 2984A.

В некоторых работах по исследованию SZ Cam (Весселинк [87], Полушина [89], Хохол [90], Горда [104]) ADS 2984А использовалась в качестве звезды сравнения, т.к. является для этой цели идеальным кандидатом по своим параметрам — блеску, цвету и близкому угловому расстоянию, что практически сводит эфекты влияния атмосферной экстинкции к нулю.

Данная работа была предпринята с целью обнаружения периодичности в смещениях спектральных линий этой звезды и, в случае положительного результата, определения параметров кривой(ых) лучевых скоростей.

Спектры ADS 2984 А были получены автором в период с января

2014 г. по февраль 2016 г. на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения $R = 15\,000$, альт-азимутального телескопа (D = 1.21 м, F = 12.0 м) Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета [123] (см. информацию о приборной базе в разделе 2.2). Всего было получено 13 спектров.

Спектрограммы содержали по 60 перекрывающихся порядков, охватывающих спектральный интервал 4100 — 7500 A^{o} . Значение отношения сигнал/шум (S/N) в порядках спектра ADS 2984A, определяющее качество регистрируемых спектральных деталей и зависящее от величины экспозиции, прозрачности атмосферы и спектральной чувствительности регистрирующей ПЗС-матрицы, изменялось в широких пределах от порядка к порядку. Так в красной области спектра значения S/N изменялись в интервале от 90 до 150, в зеленой от 70 до 120, в синей от 30 до 60.

В полученных спектрах ADS 2984A самыми сильными являлись линии Бальмеровской серии водорода и нейтрального гелия. Менее отчетливо просматривались линии HeII, SiIII, CIII, NII, NIII, OII. Кроме звездных линий в спектре наблюдались полосы межзвездного поглощения, т.н. DIBы (Diffuse Interstellar Bands), межзвездные линии NaI и многочисленные теллурические линии в красной области спектра. Список всех отождествленных линий в спектре ADS 2984 A, а также значений их остаточных интенсивностей $r = I/I_{cont}$ приведен в табл. 2.10.

2.4.2. Определение значения периода ADS 2984 A

Первоначально, как и в работе Лоренца и др. [94], значения лучевых ADS 2984 A определялись автором по смещениям спектральных линий, без деления их на компоненты. Для этого использовалась процедура определения лучевых скоростей совмещением прямого и зеркального профилей линии, реализованная в программе DECH Г. Галазутдинова [133]. Поскольку звезда является горячим гигантом и обладает протяженной раздувающейся

Таблица 2.10. Линии, отождествленные в спектрах ADS 2984A, полученных на оптоволоконном эшелле-спектрометре 1.2 м телескопа астрономической обсерватории УрФУ.

элемент	λ, A^o	r	элемент	λ, A^o	r
H_{δ}	4101.74	0.76	HeI	4713.18	0.93
HeI	4120.82	0.97	H_{β}	4861.33	0.76
HeI	4143.76	0.93	HeI	4921.93	0.91
CIII	4186.90	0.97	HeI	5015.68	0.94
CII	4267.14	0.98	DIB	5780.37	0.87
OII	4275.53	0.96	DIB	5796.96	0.90
H_{γ}	4340.47	0.79	DIB	5849.80	0.96
NIII	4379.11	0.97	HeI	5875.72	0.82
HeI	4387.93	0.92	NaI	5889.95	0.10
FeIII	4419.59	0.98	NaI	5895.92	0.17
HeI	4471.52	0.87	DIB	6195.96	0.96
HeII	4541.59	0.97	DIB	6203.08	0.96
SiIII	4552.62	0.98	DIB	6269.75	0.96
SiIII	4567.82	0.96	DIB	6375.95	0.98
NIII	4640.64	0.97	DIB	6379.29	0.91
(OII	4649.14		H_{α}	6562.81	0.81
CIII	4650.25	0.87	DIB	6613.56	0.87
OII)	4651.47		HeI	6678.15	0.90
HeII	4685.71	0.96			

атмосферой, для определения лучевой скорости ее центра масс необходимо использовать т.н. фотосферные линии, с достаточно большим потенциалом возбуждения. Линии Бальмеровской серии водорода с малым потенциалом возбуждения в данном случае мало подходят, поскольку, в зависимости от величины потенциала возбуждения, могут быть образованы на разных глубинах внешних частей расширяющейся атмосферы (звездном ветре), имеющих разные скорости расширения. Более предпочтительны линии ионизованных металлов, азота кремния или кислорода. В нашем случае эти линии имеют малую интенсивность, см. табл. 2.10. Определение по ним лучевых скоростей связано с большой неопределенностью. Поэтому использовались линии нейтрального гелия (HeI 6678.15, HeI 5875.62, HeI 5015.68, HeI 4921.93, HeI 4713.18, HeI 4471.52), имеющие потенциал возбуждения вдвое выше, чем у водорода, и достаточно большие глубины профилей. Для уменьшения величины разброса было произведено усреднение значений лучевых скоростей, полученных по отдельным линиям HeI для каждого спектра. Значения усредненных лучевых скоростей были приведены к барицентру солнечной системы путем добавления к ним гелиоцентрических поправок. Результаты приведены в четвертом столбце табл. 2.11.

Поиск периодичностей по полученному временному ряду лучевых скоростей проводился с использованием программы В. П. Горанского WINEFK, реализующей алгоритм Лафлера-Кинмана. Учитывая замечания Лоренца и др. [94] о возможной величине периода порядка десятков суток, автор производил поиск, начиная со значения 10 суток и более. Параметр $1/\theta(\varphi)$, большое значение которого является индикатором наличия периода, показал заметный, но достаточно широкий пик на частоте φ , соответствующей периоду в 57 суток.

Первоначально было принято предположение, что орбита видимого в спектре компонента ADS 2984 А круговая. Варьируя в небольших пределах найденное значение периода и вычисляя соответствующие ему значения

Таблица 2.11. Моменты времени, соответствующие серединам экспозиций полученных спектров ADS 2984A, фазы периода и средние значения лучевых скоростей, полученных по линиям HeI и линиям бальмеровской серии водорода (H).

Дата	JD_{\odot}	фаза	\overline{V}_r (HeI)	\overline{V}_r (H)
	2450000.0+	$(P = 57^{d}.6)$	KM/C	KM/C
29.01.2014	6687.4837	0.457	-17.1 ± 8.5	-24.0 ± 7.8
21.02.2014	6710.2926	0.853	24.2 ± 4.3	17.8 ± 8.9
03.04.2014	6751.2690	0.565	9.9 ± 6.7	7.1 ± 5.3
17.04.2014	6765.2441	0.808	36.0 ± 2.2	32.8 ± 8.5
22.04.2014	6770.2667	0.895	19.0 ± 2.6	8.6 ± 6.1
07.05.2014	6785.2696	0.156	-38.4 ± 6.1	-56.6 ± 7.5
17.03.2015	7099.2573	0.611	24.7 ± 4.9	21.3 ± 3.8
18.03.2015	7100.2509	0.629	26.0 ± 5.6	18.2 ± 6.0
26.03.2015	7108.3053	0.769	36.8 ± 3.2	27.0 ± 1.5
31.03.2015	7113.1681	0.853	31.8 ± 6.5	15.4 ± 2.9
31.03.2015	7113.2188	0.854	25.0 ± 5.0	15.5 ± 7.2
02.04.2015	7115.2465	0.889	24.9 ± 5.3	21.9 ± 2.5
12.02.2016	7431.3545	0.380	-31.5 ± 4.6	-32.3 ± 4.7


Рис. 2.9. Кривая лучевых скоростей ADS 2984A, построенная по линиям HeI на основе данных, полученных автором.

фаз, автор аппроксимировал ряд получаемых при этом кривых лучевых скоростей функцией синус. В результате было найдено значение периода, при котором аппроксимация по критерию минимума суммы квадратов уклонений была наилучшей. Ниже приведена эфемеридная формула, соответствующая этой наилучшей аппроксимации:

$$JD_{\odot} = 2456776.288 + 57.56 \cdot E. \qquad (2.15)$$

$$\pm 4 \qquad \pm 2$$

Результат аппроксимации показан на рис. 2.9, а значения гаммаскорости V_0 и полуамплитуды K приведены во второй колонке табл. 2.12. Можно видеть, что полученная кривая лучевых скоростей очень хорошо представляется функцией синус. Величина среднеквадратичной ошибки разброса точек относительно аппроксимационной функции σ составляет всего ±2.5 км/с. Это позволяет сделать вывод, что орбиты компонентов в системе ADS 2984 A с большой долей вероятности круговые.

Параметр	автор	автор+
		LMD*+MDKS**
$V_0, km/s$	-4.4 ± 0.9	-5.5 ± 1.2
K, km/s	41.3 ± 1.2	41.5 ± 1.7
$\sigma, km/s$	± 2.5	± 7.5

Таблица 2.12. Параметры кривой лучевых скоростей ADS 2984A.

* - данные из работы Лоренца и др. [94]

** - данные из работы Майера и др. [114]

Основной объем данных, приведенный в табл. 2.11, был получен на интервале времени немногим более года, или на протяжении семи орбитальных циклов этой спектрально-двойной звезды. Как отмечено выше, значения лучевых скоростей ADS 2984 A, были получены и в другие эпохи, отличающиеся от момента наблюдений автора на значительное количество времени, порядка 20-ти лет. Это работы Лоренца и др. [94] и Майера и др. [114]. Объединив свои значения лучевых скоростей с данными из этих работ, автор снова обнаружил пик функции $1/\theta(\varphi)$ на частоте, соответствующей периоду ~ 57 суток. Проведя далее аппроксимацию объединенных данных функцией синус и применив процедуру уточнениия периода, описанную выше, автор получил новые значения параметров кривой лучевых скоростей, (см. третий столбец табл. 2.11). Уточненное значение периода ADS 2984 A, найденное на основе данных, полученных на интервале времени порядка 20-ти лет, приведено ниже в эфемеридной формуле:

$$JD_{\odot} = 2456776.47 + 57.24 \cdot E.$$

$$\pm 8 \qquad \pm 5 \qquad (2.16)$$

На рис. 2.10 показан результат аппроксимации объединенных данных лучевых скоростей функцией синус. Можно отметить, что разброс точек относительно аппроксимационной кривой несколько больше, чем на рис. 2.9, где изображены только данные автора. Вместе с тем, вели-



Рис. 2.10. Кривая лучевых скоростей ADS 2984 А; заполненные кружки — данные автора; квадраты — данные из работы (Лоренц и др. [94]); ромбы — данные из работы (Майер и др. [114]).

чина разброса точек, соответствующих этим данным, относительно новой аппроксимационной кривой осталась практически неизменной. Новые значения гамма-скорости и полуамплитуды изменения лучевых скоростей также очень мало отличаются от величин, полученных с использованием только наших данных. Окончательно, за значение орбитального периода спектрально-двойной ADS 2984A следует принять величину P = 57.24 суток. Таким образом, использование значений лучевых скоростей, найденных по линиям одного химического элемента, позволило найти значение периода.

2.4.3. Разделение профилей спектральных линий на два компонента

Полученную синусоидальную кривую лучевых скоростей ADS 2984 A, можно интерпретировать и как кривую лучевых скоростей видимого, более яркого, компонента в системе, и как суперпозицию двух синусоид с



Рис. 2.11. Вид профилей линии HeI 5875 на различных фазах и примеры деления их на два компонента; тонкая линия — наблюдательные профили; толстая линия — суммарные аппроксимационные профили; штриховая линия — гауссиана профиля первого компонента; пунктирная линия — гауссиана профиля второго компонента.

отличающимися по величине амплитудами противоположного знака, представляющими собой кривые лучевых скоростей двух компонентов.

Профили абсорбционных линий HeI в спектре ADS 2984 A, полученные нами, были значительно уширены. Подобный эффект ранее был отмечен в работе Лоренца и др. [94]. В основной массе профили имели чашеобразную форму. У некоторых из них наблюдалось плоское дно или слабо выраженная двухкомпонентная структура, выражающаяся в наличии небольшого поднятия в середине дна профиля. Основная масса профилей самой сильной в спектре линии HeI 5876 имела заметно нессиметричную форму с более глубокой синей половиной по сравнению с красной.

Поскольку форма линий явно указывала на двухкомпонентную структуру, была сделана попытка разделения полученных профилей наболее сильной и наименее зашумленной линии HeI 5876 на два компонента. Использовалась часто применяемая в подобных случаях процедура пред-



Рис. 2.12. Профили спектральных линий HeI 5875 и H_{β} ADS 2984A, полученные на разных фазах периода (φ); сплошная линия — $\varphi = 0.77$; штриховая линия — $\varphi = 0.16$; пунктирная линия — $\varphi = 0.46$. Для совмещения профилей в значения лучевых скоростей линий, полученных на фазах 0.16 и 0.46, были внесены соответствующие аддитивные добавки.

ставления профиля линии двумя гауссианами. На рис. 2.11 представлены примеры деления профилей для различных фаз периода, вычисленных с использованием эфемеридной формулы 2.16. Полученные при этом значения лучевых скоростей компонентов аппроксимировались синусоидами с найденным выше периодом. Результаты аппроксимации оказались неудовлетворительными. Среднеквадратичная ошибка разброса точек лучевых скоростей обоих компонентов относительно соответствующих синусоид составляла порядка ± 30 км/с. На фазах, близких к соединению $\varphi \sim 0.50$, разница в значениях лучевых скоростей первого и второго компонентов была практически такой же, как и на фазах вблизи квадратуры $\varphi \sim 0.75$. Полученный результат с очевидностью доказывает, что уширение спектральных линий и сложная форма их профилей не связаны с блендированием линий, образованных двумя компонентами.

Для окончательного решения вопроса было проведено сравнение ширин линий HeI 5875 и H_{β} путем наложения их профилей, полученных на фазах вблизи соединений и квадратуры. Результат показан на рис. 2.12. Видно, что все профили имеют практически одну ширину. В то время как в предположении двухкомпонентой модели на фазах, соответствующих соединению, когда имеет место значительное переналожение спектральных линий, образованных разными компонентами, суммарные профили должны быть заметно у́же полученных на фазах вблизи квадратуры, когда профили отдельных компонентов максимально разнесены из-за эффекта Доплера.

2.4.4. Доказательства наличия звездного ветра и оценка скорости осевого вращения яркого компонента ADS 2984 А

Предположение о том, что в спектре ADS 2984 А наблюдаются линии, образованные одним компонентом, было высказано еще в работе Лоренца и др. [94]. Как отмечено им же, причиной изменения формы и глубины профилей спектральных линий могло быть наличие звездного ветра, а уширение обусловлено вращением звезды. Проверить предположение о наличии звездного ветра можно, например, по линиям бальмеровской серии водорода, имеющих более низкий потенциал возбуждения и образующихся в более верхних слоях атмосферы звезды.

В последнем столбце табл. 2.10, помещены усредненные значения лучевых скоростей ADS 2984 A, определенные по трем линиям водорода (H_{α} , H_{β} и H_{γ}). Значение гамма-скорости (V_0) кривой лучевых скоростей, построенной по этим данным, оказалось на 10 км/с меньше (более отрицательное), чем то же значение, определенное по линиям гелия (см. рис. 2.13). Это указывает на то, что более верхние слои атмосферы, где образуются линии водорода, движутся с большей радиальной скоростью относительно нижних слоев, трассируемых линиями нейтрального гелия. Иными словами, под-



Рис. 2.13. Кривая лучевых скоростей линий бальмеровской серии водорода (незаполненные кружки); кривая лучевых скоростей линий нейтрального гелия (заполненные кружки); непрерывная линия — аппроксимационная синусоида лучевых скоростей, найденных по линиям гелия; штриховая линия — аппроксимационная синусоида лучевых скоростей, найденных по линиям водорода.

тверждается предположение о наличии ветра или расширении атмосферы этого голубого гиганта.

Кроме того, кривые лучевых скоростей, построенные на основе наших данных по отдельным линиям бальмеровской серии водорода и приведенные на рис. 2.14, показывают наличие т.н. бальмеровского прогресса увеличение абсолютного значения гамма скорости с уменьшением номера линии в серии. Это также подтверждает сделанный вывод о наличии звездного ветра (расширения атмосферы) у видимого компонента ADS 2984A.

Вместе с тем, обнаружить дифференциальные сдвиги линий нейтрального гелия (гелиевый прогресс) не удалось. Это свидетельствует о том, что линии HeI образуются в слоях, близких к фотосфере.

Единственная линия, показавшая более отрицательные лучевые скорости относительно других линий гелия, — это линия HeI 5876. Следует



Рис. 2.14. Кривые лучевых скоростей, построенные по линиям бальмеровской серии водорода. Непрерывная линия и кружки — аппроксимационная синусоида и лучевые скорости линии H_α; штриховая линия и треугольники — аппроксимационная синусоида и лучевые скорости линии H_β; пунктирная линия и квадраты — аппроксимационная синусоида и лучевые скорости линии H_γ.

заметить, что профили этой линии в спектрах, полученных на фазах первой квадратуры ($\varphi = 0.0 - 0.5$), когда видимый компонент ADS 2984A в своем движении по орбите приближается к наблюдателю, имеют симметричную форму, а на фазах второй квадратуры ($\varphi = 0.5 - 1.0$), когда звезда удаляется, синее крыло линии заметно глубже, что можно видеть на рис. 2.11. Учитывая быстрое вращение звезды это можно интерпретировать, как наличие своеобразного (газового) ветрового шлейфа, тянущегося за звездой при ее движении по орбите.

Оценка скорости вращения видимого компонента ADS 2984A была сделана путем сравнения спектральных линий HeI и бальмеровской серии водорода с теоретическими профилями, рассчитанными с помощью пакета SYNPEC48 [134] и моделей звездных атмосфер BSTAR2006 [135], а также с применением Фурье-преобразования профилей линий [136]. Вне зависимости от применяемого метода получено среднее значение $v \sin(i) = 230$ км/с, что находится в хорошем согласии с данными Лоренца и др. (1998). По просьбе автора вычисления были произведены сотрудником Коуровской обсерватории С. Ю. Парфеновым.

Далее, принимая величину радиуса звезды гиганта спектрального класса ВО III равной $16R_{\odot}$, получаем оценку периода вращения $P_{rot} = 3.6$ суток.

Учитывая, что температурные неоднородности на поверхности звезды, приводящие к неоднородностям звездного ветра, чаще всего проявляются в структуре линии Н_а, было рассмотрено изменение ее профилей в ряде спектров ADS 2984A, полученных в течение 15 суток или 4-ех оборотов звезды. Соответствующие даты приведены в строках с 7 по 12 в первом столбце табл. 2.11. Для оценки условий видимости горячей области на поверхности звезды в момент получения того или иного спектра были вычислены значения фаз с использованием найденного значения периода P_{rot} . При этом, за нулевое значение фазы был принят момент получения спектра 17 марта 2015г. Профили линии H_{α} , а также значения фаз, приведены на рис. 2.15. Видно, что два верхних профиля линии, полученные в две соседние ночи (17 марта 2015 г. и 18 марта 2015 г.), имеют несколько меньшие глубины и более пологие правые ветви, чем профили, полученные в последующие ночи. Это может свидетельствовать о наличии небольшой эмиссии, образованной в более горячей области поверхности звезды, обращенной в сторону наблюдателя в первые две даты. Остальные профили линии Н_α, полученные в другие моменты времени, на других фазах, имеют бо́льшую глубину. Это можно объяснить тем, что на данных фазах, вследствие вращения звезды, горячая область не была видна, либо находилась на самом краю диска звезды и вносила очень малый вклад в формирование профиля. Таким образом, можно констатировать, правда с большой степенью осторожности, что форма профиля линии Н_α изменяется в небольшой



Рис. 2.15. Профили линии H_{α} в спектрах ADS 2984A, полученных в течение четырех ночей на интервале 15 суток; верхний профиль соответствует дате 17.03.2016, нижний — 02.04.2016; для избежания наложения все профили, за исключением верхнего, смещены вниз один относительно другого на величину $I/I_{cont} = 0.05$; справа от каждого профиля приведены значения фаз, соответствующие периоду вращения звезды 3.6 суток, подробности в тексте.

степени вследствие вращения звезды.

В заключение, была найдена оценка нижней границы массы невидимого компонента (см. табл. 2.13), с использованием значения функции масс системы $f(m) = 0.412 M_{\odot}$, вычисленной согласно следующему выражению:

$$f(m) = \frac{M_1^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = 1.038 \cdot 10^{-7} K_1^3 P, \qquad (2.17)$$

и подстановкой граничных значений массы видимого в спектре компонента ADS 2984A (M_1), из работы Холе и др. [130], полученных для двух значений расстояния до NGC 1502, из работы Лоренца и др. [94]. Здесь M_1 и M_2 массы компонентов, i — угол между лучем зрения и нормалью к плоскости орбиты, K_1 — полуамплитуда кривой лучевых скоростей, P — орбитальный период. Результаты раздела 2.4 приведены в работе Горды [137].

Расстояние	M_1	$M_2\sin(i)$
ПК	M_{\odot}	M_{\odot}
830	14.5	5.2
1050	15.1	5.5

Таблица 2.13. Оценки значений нижней границы массы невидимого в спектре компонента (M_2) ADS 2984A, в зависимости от расстояния до NGC 1502, подробности в тексте

2.5. Обсуждение результатов и выводы

В данной главе приведены результаты исследования обоих компонентов визуально-двойной звезды ADS 2984, представляющих собой иерархическую, квадрупольную и двойную системы, полученные на основе фотометрических, спектральных и спеклинтерферометрических данных автора.

Найденные автором на основе анализа результатов собственного фотометрического исследования параметры компонентов и элементов орбит затменной переменной SZ Cam в пределах ошибок лежат среди данных, полученных ранее другими исследователями [94, 109, 110, 114]. Так в работе [138] отмечено, что приведенное в статье автора [104] значение отношения масс компонентов SZ Cam $q = 0.72 \pm 0.01$ (см. табл. 2.2), являвшееся на тот момент последним определением этой величины для TДC SZ Cam, хорошо согласуется с данными предыдущих исследований и было использовано в данной работе, как основное.

Предложенная автором на основе собственных наблюдений интерпретация малоамплитудных колебаний блеска SZ Cam, как проявление эффекта эллипсоидальности более яркого компонента третьего тела, пока никак не прокоментирована, в статьях других исследователей. Возможно, из-за отсутствия новых фотометрических данных. Однако и предложенная в работе Томажо и др. [110] концепция о пульсационной природе, типа β Cep, одного из компонентов не находит поддержки из-за найденного ими периода пульсаций почти в точности равного 1/3 суток [116]. Как отмечено в этой же работе [116], малоамплитудные колебания блеска с таким периодом не были обнаружены ни в данных Михальской и др. [109] 2009 года, ни Гордой [104] (см. также раздел 2.1.2 данной диссертации). В вышедшей совсем недавно работе Саутворса и Боумана [117] также отмечается отсутствие колебаний блеска с периодом, найденным Томажо и др. [110] на кривых блеска SZ Cam, полученных со спутника TESS.

В результате проведения автором совместно с сотрудниками САО РАН спеклинтерферометрических наблюдений компонентов ADS 2984 было получено еще одно положение третьего компонента относительно SZ Cam на вторую эпоху, отличное от определения Майсона и др. [96]. Это позволило прямым позиционным методом, помимо результатов спектральных наблюдений, доказать наличие движения SZ Cam и третьего тела по взаимной орбите. В ходе выполнения данной работы впервые определен полный однозначный набор параметров видимой относительной орбиты третьего тела в системе SZ Cam, получена состоятельная оценка массы третьего тела.

Полученная простым геометрическим методом, не использующим зависящие от поглощения света фотометрические данные, величина расстояния до ADS 2984 B, равная 1135 ± 135 пк (2.14), лежит в пределах разброса оценок расстояния до скопления NGC 1502, полученных в ряде работ [109, 139–142].

Согласно данным третьего релиза *Gaia* DR3, расстояние до SZ Cam (ADS 2984 B), определенное по значению параллакса, составляет 849 \pm 65 пк, а до компонента ADS 2984 A — 1171 \pm 41 пк. Среднее значение $\bar{d} = 1010 \pm 35$ пк. Для сравнения можно привести одно из последних определений расстояния до скопления NGC 1502 1171 \pm 18 пк из работы Кантат-Гаудин и др. [143], найденное с использованием данных второго релиза *Gaia* DR2. Таким образом, значение полученной автором оценки

расстояния до ТДС SZ Cam не противоречит современным данным. Можно с большой степенью уверенности утверждать, что обе звезды визуальной пары ADS 2984 принадлежат скоплению NGC 1502.

Найденное значение угла наклона плоскости орбиты SZ Cam $i = 72^{\circ}.9$ сравнимо по величине со значением угла наклона $i = 74^{\circ} - 78^{\circ}$ орбит компонентов этой затменной системы [94, 104]. Это обстоятельство позволяет предположить, что плоскости орбит компонентов этой, по всей видимости четверной, иерархической системы практически компланарны. По крайней мере, это справедливо для SZ Cam. Предположение о компланарности орбиты компонентов третьего тела необходимо делать с большой оговоркой, поскольку в этом случае в системе третьего тела должны наблюдаться затмения. А это, в свою очередь, должно определенным образом сказываться на кривой блеска SZ Cam. Тем не менее, искажений кривой блеска SZ Cam на величину более 0.^m03 не наблюдается [88, 104, 105, 110].

На основе полученных автором спектральных данных впервые было найдено значение периода спектрально-двойной звезды ADS 2984A. Произведено уточнение его значения с использованием имеющихся в литературе данных с разностью эпох 20 лет. Подтверждено, что в спектре наблюдаются линии одного быстро вращающегося компонента, с поверхности которого истекает регистрируемый в наблюдениях звездный ветер. Сейчас эту спектрально-двойную звезду с большой степенью уверенности можно отнести к типу SB1.

Вероятная причина, по которой периодичность в смещениях спектральных линий не была обнаружена ранее, по всей видимости, заключается в использовании исследователями для построения кривых лучевых скоростей данных, полученных по линиям различных химических элементов, в частности, водорода и гелия, имеющих разные потенциалы возбуждения и образующихся в слоях, движущихся с разными скоростями расширяющейся атмосферы данной звезды. Как следствие, авторы не могли сделать

ADS 2984B						
Параметр	SZ Cam	3-е тело				
P_{orb}	~ 50 лет					
ho,	$0.075'', \sim 20$ a.e.					
ТИП	сп. двойная, затменная	сп. двойная				
P_{sb}	2.698 дня	2.797 дня				
M_1	$\sim 15 M_{\odot}$	$< 20 M_{\odot}$				
M_2	$\sim 11 M_{\odot}$	$> 1.4 M_{\odot}$				
	$10 - 15 \cdot 10^6$ лет	$\sim 15 \cdot 10^6$ лет				

Таблица 2.14. Структура и параметры компонентов кратной системы ADS 2984B (SZ Cam)

однозначный вывод из-за большого разброса значений лучевых скоростей при построении соответствующих кривых. Например, на рис. 2.10, на фазах $\varphi = 0.734$ и $\varphi = 0.991$, можно видеть два значительно "выскакивающих"в сторону отрицательных значений отсчета лучевой скорости, помеченных значками ромба, которые, вероятно, найдены по линии H_{α}. Сделать более точное заключение не представляется возможным, т.к. в работе Майера и др. [114], где приведены эти данные, не указано, на основе спектральной линии какого химического элемента получено то или иное значение лучевой скорости ADS 2984 А.

Информация, известная на сегодняшний день о затменной переменной SZ Cam, являющейся северным компонентом —(B) визуально-двойной звезды ADS 2984, приведена в табл. 2.14.

Вклад автора в исследовании SZ Cam с применением спекл-интерферометрического метода: постановка задачи, участие в наблюдениях, применение метода, сочетающего информацию, полученную на основе спеклинтерферометрических наблюдений с данными изменения периода звезды. Определение всех параметров видимой относительной орбиты третьего тела. Обработка спекл-интерферометрических наблюдений была произведена сотрудниками отдела спеклинтерферометрии САО РАН.

2.6. Положения, выносимые на защиту

По результатам второй главы на защиту выносятся следующие положения:

- Впервые на основе анализа полученных автором фотометрических данных на кривых блеска SZ Cas обнаружен эффект эллипсоидальности видимого в спектре яркого компонента третьего тела. Подтверждена, уже фотометрическим методом, двойственность третьего тела в системе SZ Cas и отсутствие затмений в тесной паре третьего тела. Впервые найдены значения всех шести элементов видимой относительной орбиты третьего тела на основе новых, полученных с участием автора, спеклинтерферометрических данных компонентов ADS 2984 и исследования изменений периода SZ Cas.
- Впервые найдено значение периода южного компонента визуальнодвойной звезды ADS 2984, которое со времени обнаружения спектральной двойственности этой ТДС не удавалось определить. Однозначно определен тип спектрально-двойной системы ADS 2984 A, как SB1. Уточнено значение периода осевого вращения видимого компонента, а также подтверждено наличие у него звездного ветра. Получена оценка массы невидимого в спектре, маломассивного компонента.

Глава 3. Спектрофотометрия двух тесных двойных систем с массивными компонентами раннего спектрального класса, находящихся на разных этапах эволюционного развития

В данной главе приведены результаты спектрального исследования двух тесных двойных систем с компонентами раннего спектрального класса UU Cas и CC Cas. Для обеих звезд, на момент начала их исследования автором, не имелось достаточного по объему и качеству спектрального материала, полученного с помощью современных электронных приемников излучения - ПЗС матриц. Данное исследование проведено на основе наблюдательного материала, полученного автором на современном эшеллеспектрометре.

В разделе 3.1 на основе спектральных наблюдений автора впервые определяются динамические массы обоих компонентов системы UU Cas. В разделе 3.2, на основе полученного из анализа спектральных данных нового отношения масс компонентов и эффектов проявления газовой составляющей в спектрах, приводится оценка нового эволюционного статуса системы. В разделе 3.3 методом допплеровской томографии определяются основные газовые структуры в системе UU Cas. Раздел 3.4 посвящен определению масс компонентов ТДС с массивными компонентами ранних спектральных классов CC Cas на основе спектрограмм, полученных с применением современных приемников излучения. Выводы и обсуждение представлены в разделе 3.4.

Результаты исследования опубликованы в следующих статьях:

 Gorda S. Yu. CCD spectrophotometry of CC Cas. I. Radial velocity curves. // Astrophysical Bulletin. — 2013. — V. 68. — Pp. 101-106.

- Gorda S. Yu. Eclipsing binary UU Cas: Radial-velocity curves. // Astrophysical Bulletin. — 2017. — V. 72. — Pp. 321-329.
- Kononov D. A., Gorda S. Yu. and Parfenov S. Yu. On the Gas Dynamic Features of the Interacting Binary System UU Cas. // Astrophysical Journal. — 2019. — V. 883. — Pp. 186-196.
- Hadrava P., Cabezas M., Djurasevich G., Garces J., Gorda S. Yu., Jurkovich M. I., Korchakova D., Markov H., Mennickent R. E., Petrovich J., Vince I., and Zharikov S. Spectroscopy of the massive interacting binary UU Cassiopeiae. // Astronomy and Astrophysics.— 2022.— V. 663 — A8(15).

3.1. Определение масс компонентов UU Cas

3.1.1. Сведения о ТДС UU Cas

Затменная переменная UU Cas ($V = 10^m.4 - 10^m.8$, $P = 8^d.51929$) известна, как тесная двойная система (ТДС) с очень массивными, порядка $30M_{\odot}$ и более, компонентами. Первое и, вплоть до настоящего времени, единственное спектральное исследование UU Cas на основе фотографического материала было проведено Сенфордом [144] еще в 30-х годах прошлого века. В полученных им спектрах присутствовали линии только одного компонента. Сенфорд определил его спектральный класс, как B1. Учитывая значение полуамплитуды построенной им кривой лучевых скоростей, 161 км·с⁻¹ и принимая во внимание найденное им же правильное значение периода, порядка 8-ми суток, Сенфорд оценил массу видимого компонента в пределах $30 - 100M_{\odot}$. Первое значение соответствовало случаю равенства масс компонентов, второе - половинной массе вторичного компонента $q = M_2/M_1 = 0.5$. Случай меньшей массы вторичного компонента рассматривался Сенфордом, как более реалистичный, т.к. его линии в спектре не

просматривались. На основе этих данных система UU Cas долгое время считалась одной из самых массивных известных ТДС.

Несколько позднее были получены визуальные и фотографические кривые блеска UU Cas, подробная библиография которых приведена в работах Антохиной и Кумсиашвили [145] и Полушиной [146]. Уже первые фотографические кривые блеска показали, что компоненты значительно деформированы приливными силами (см., например, работу Паренаго и Кукаркина [147]). Кривая блеска соответствовала типу переменности β Lyr. Получив из решения кривой блеска отношение светимостей компонентов, Паренаго и Кукаркин [147], используя зависимость «Масса - Светимость», получили оценку отношения масс компонентов q = 0.68, а также и сами значения масс $M_1 = 58M_{\odot}, M_2 = 40M_{\odot}$. Найденные результаты не противоречили выводам Стенфорда [144] о больших массах компонентов данной ТДС.

На более точных современных кривых блеска UU Cas, полученных Кумсиашвили [148] и Полушиной [146] с использованием фотоэлектронных приемников излучения, отмечались значимые (до $0.^{m}08$) отклонения блеска от средних значений. Это объяснялось наличием газовой составляющей в системе (общая оболочка, газовые струи), образующейся вследствие заполнения одним или двумя компонентами своих полостей Роша. Полученные в процессе решения кривых блеска методом синтеза (Антохина и Кумсиашвили [145]) и классическим методом Рессела-Мерила (Полушина [146]) оценки значений масс компонентов в интервале $23M_{\odot} - 35M_{\odot}$ также не противоречили сделанным ранее выводам о том, что UU Cas является массивной ТДС.

Если фотометрические наблюдения UU Cas время от времени проводились, то детального спектрального исследования звезды со времен Сенфорда долгое время не было сделано. В начале 70-х годов прошлого века Мартин [149] при исследовании участка Галактического поля в районе созвездия Кассиопеи по фотографическим низкодисперсионным спектрам оценил спектральный класс UU Cas как B0.5III.

В 2008 году на 2-м телескопе Болгарской Национальной Обсерватории была запущена программа спектрального исследования UU Cas, в процессе выполнения которой был получен ряд спектров в двух спектральных интервалах (Марков и др. [150, 151]). В полученных спектрах линия H_{α} наблюдалась в сильной эмиссии. Авторами было отмечено изменение формы линии с фотометрической фазой, что свидетельствовало о наличии газа в системе. Абсорбционные профили некоторых линий нейтрального гелия, особенно на фазах близких к квадратурам, показывали двойственную структуру. При этом один из компонентов был значительно глубже. Помимо линий водорода и гелия в спектрах присутствовали более слабые линии металлов, образующиеся в фотосфере. Профили этих линий имели одиночную структуру и принадлежали одному из компонентов UU Cas. По смещениям этих линий авторами была построена кривая лучевых скоростей, аналогичная кривой Сенфорда, но с полуамплитудой на 25% больше. Кривая лучевых скоростей, построенная по более сильной компоненте линиий гелия, полностью повторяла кривую металлов. Попытки построить кривую лучевых скоростей второго компонента по линиям нейтрального гелия не увенчались успехом из-за недостаточного количества спектров, полученных на фазах, где двойственность спектральных линий гелия явственно проявлялась. Анализируя форму эмиссионных линий Н_α авторы предположили, что вторичный, плохо проявляющийся в спектре, компонент системы окружен толстым аккреционным диском, значительно экранирующим поток излучения от него. Модель системы UU Cas с аккреционным диском вокруг массивного компонента была представлена Джурасевичем и др. [152].

В процессе выполнения данных исследований UU Cas Маркову и др. не удалось найти значения лучевых скоростей вторичного компонента, кривая его лучевых скоростей не была построена. Следовательно, не было найдено спектроскопическое (динамическое) значение отношения масс компонентов.

3.1.2. Кривые лучевых скоростей компонентов UU Cas

Спектры UU Cas были получены автором в период с января по апрель 2017г. на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения $R = 15\,000$ альт-азимутального телескопа (D = 1.21 м, F = 12.0 м) Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (см. 2.2). В качестве светоприемного устройства в спектрометре использовалась ПЗС-камера ANDOR DZ936N-BEX2-DD (2048 × 2048, 13.5 мкм), с охлаждением ПЗС-чипа до температуры $-85^{\circ}C$.

Полученные в одну ночь серии кадров спектра звезды объединялись с помощью процедуры медианного усреднения для увеличения отношения сигнал-шум и устранения эффектов, вызванных действием космических частиц. Для дальнейшей обработки использовались эти суммарные кадры спектров UU Cas с эффективными временами экспозиции от 1 до 3 часов. Моменты времени, соответствующие серединам экспозиций, приведены в первом столбце табл. 3.1. Экстракция спектральных порядков и дальнейшая обработка спектрограмм, включающая в себя построение дисперсионных кривых, проведение уровня континуума и нормирование спектральных порядков, производилась в пакете DECH [133].

Значение отношения сигнал-шум (S/N) в порядках спектра UU Cas, определяющее качество регистрируемых спектральных деталей, и зависящее от величины экспозиции, прозрачности атмосферы и спектральной чувствительности регистрирующей ПЗС-матрицы, было максимальным в красной области спектра и значительно уменьшалось в синей области. В Таблице 3.2 приведены минимальные, максимальные и средние значения S/N, измеренные за весь период наблюдений в порядках эшелле-спектров,

JD(2450000+)	Exp.	Phase	V_r^{NII}	$\pm \sigma$	V_r^{HeI}	$\pm \sigma$	V_r^{HeI}	$\pm \sigma$
	time		M_1		M_1		M_2	
day	hour		${\rm km}{\cdot}{\rm s}^{-1}$	${\rm km} \cdot {\rm s}^{-1}$	${\rm km}{\cdot}{\rm s}^{-1}$	${\rm km}{\cdot}{\rm s}^{-1}$	${\rm km} \cdot {\rm s}^{-1}$	${\rm km}{\cdot}{\rm s}^{-1}$
7779.2222	3	0.273	-240.9	7.1	-251.4	2.0	66.1	6.7
7822.1542	3	0.312	-242.9	3.9	-243.2	5.2	78.4	8.1
7827.1882	3	0.902	49.1	3.7	65.5	2.1	-101.9	4.5
7827.5059	2	0.940	14.6	2.4	32.0	1.7	-83.3	6.2
7828.1918	3	0.021	-101.4	5.0	-127.2	3.0	-	-
7828.5057	2	0.057	-151.7	5.3	-173.9	3.3	-	-
7829.1773	2.5	0.136	-206.7	3.1	-206.4	2.4	27.5	4.4
7829.4939	2	0.173	-228.2	2.5	-214.3	3.6	57.9	6.4
7832.1812	2.5	0.489	-80.2	2.0	-95.4	2.4	-25.2	13.6
7832.4730	2	0.523	-34.0	3.1	-43.6	4.8	-67.6	12.8
7834.1743	2	0.723	126.7	4.5	118.9	4.6	-137.8	4.3
7834.5055	2	0.762	128.1	2.6	129.9	4.1	-135.3	2.9
7835.1763	2	0.840	99.1	3.0	100.9	2.4	-111.4	5.4
7835.4763	3	0.876	79.1	2.3	78.9	1.7	-114.7	7.1
7850.4892	1	0.638	80.1	7.7	87.6	9.7	-102.7	10.5
7855.4514	1	0.220	-248.5	5.4	-233.3	3.6	57.0	6.5
7856.4200	1	0.334	-219.7	3.1	-214.5	4.7	47.7	7.8
7870.3958	2	0.975	-40.1	2.8	-47.9	3.7	-	-

Таблица 3.1. Моменты наблюдений и лучевые скорости компонентов UU Cas

Спектральная	S/N_{min}	S/N_{max}	$\overline{S/N}$
линия	%	%	%
He I 7065	23	44	35
${\rm HeI6678}$	26	52	38
${\rm HeI5875}$	25	44	34
$H_{\alpha} 6563$	25	50	38
N II 5676	23	44	35
$H_{\beta} 4861$	10	13	11

Таблица 3.2. Значения отношения сигнал/шум в порядках спектра, соответствующих спектральным линиям, по которым проводилось определение лучевых скоростей.

в которых присутствовали спектральные линиии, использованные далее в работе.

В полученных спектрах UU Cas самыми сильными являлись линии H_{α} и HeI 5875, а также менее глубокие линии нейтрального гелия $\lambda 6678.2$ Å и $\lambda 7065.2$ Å. Профили линии H_{α} имели сильную эмиссионную компоненту, их форма в значительной степени изменялась с фазой. В отдельных спектрах явно присутствовали линии NaII $\lambda 6482.1$ Å, $\lambda 5710.8$ Å, а также SiII $\lambda 5739.8$ Å и CIII $\lambda 5695.9$ Å, но наиболее заметной являлась серия линий NII $\lambda 5666.6$ Å, $\lambda 5676.0$ Å, $\lambda 5679.6$ Å и $\lambda 5686.2$ Å. Кроме звездных линий в спектре наблюдались полосы межзвездного поглощения, т.н. DIB-ы (Diffuse Interstellar Bands), линии межзвездного дублета Na I и многочисленные теллурические линии в красной области спектра. В порядках с длинами волн менее $\lambda 5500$ Åиз-за низкого значения отношения сигнал-шум профили линий терялись на фоне шума и были не пригодны к дальнейшей обработке. В качестве примера в последней строке табл. 3.2 приведены значения S/N в порядке спектра, содержащем линию H_{β} .

Первоначально, как и в работах Маркова и др. [150, 151], было решено определять лучевые скорости по линиям металлов, которые скорее



Рис. 3.1. Участок спектрального порядка, содержащий линии N II λ 5666.63 Å, λ 5676.02 Å, λ 5679.56 Å, λ 5686.21 Å (S/N = 40, JD_{\odot}2457829.18).

всего образуются в фотосферах компонентов. Во всех спектрах наиболее глубокими являлись линии N II в районе $\lambda \sim 5680$ Å. Все линии проявляли однокомпонентную структуру и, скорее всего, принадлежали одному из компонентов UU Cas. На Рис. 3.1 приведен участок спектрального порядка, содержащий четыре линии N II, полученный в одну из ночей с отношением S/N = 40. Можно заметить существенное смещение центров профилей линий относительно их лабораторных длин волн.

Определение лучевых скоростей осуществлялось в пакете DECH [133] с использованием процедуры совмещения прямых и зеркальных профилей линий. В результате для каждого спектра были найдены по четыре значения лучевых скоростей. В третьей и четвертой колонках таблицы 3.1 приведены полученные по ним средние значения лучевых скоростей и их средних квадратичных ошибок. Для построения кривой лучевых скоростей были вычислены значения фотометрических фаз, с использованием приведенной ниже формулы, которая применяется для вычисления фаз при построении кривых блеска UU Cas:

$$JD_{\odot} = 2445722.^{d}10557 + 8.^{d}51929 E.$$

Поскольку из фотометрических и полученных ранее спектральных данных следует, что орбиты компонентов круговые, аппроксимация вычисленных значений лучевых скоростей производилась функцией синус.

Результат аппроксимации показан на Рис. 3.2. Форма синусоиды соответствует следущим значениям параметров: гамма скорость $V_0 = -62.8 \pm 2.0 \text{ км} \cdot \text{c}^{-1}$, полуамплитуда $K_1 = 191.2 \pm 2.7 \text{ км} \cdot \text{c}^{-1}$. Можно видеть, что полученная кривая лучевых скоростей очень хорошо представляется функцией синус. Величина среднеквадратичной ошибки разброса точек относительно аппроксимационной функции составляет всего $\sigma = \pm 8.1 \text{ км} \cdot \text{c}^{-1}$. Это подтверждает сделаный ранее вывод, что орбиты компонентов в системе UU Cas круговые.

Полученное значение полуамплитуды близко к значению 200 км·с⁻¹, приведенному в работе Маркова и др. [150], и на 20% больше, чем было определено Сенфордом [144]. В тоже время величина скорости барицентра системы, полученная нами, близка к значению Сенфорда [144] $V_0 = -57 \,\mathrm{km}\cdot\mathrm{c}^{-1}$ и в полтора раза больше значения, приведенного Марковым и др. [151] $V_0 = -45 \,\mathrm{km}\cdot\mathrm{c}^{-1}$.

Полученная кривая лучевых скоростей относится к главному, более яркому компоненту затменной системы UU Cas, т.к. после нулевой фазы, соответствующей главному, более глубокому минимуму на кривой блеска, лучевая скорость компонента увеличивается в сторону отрицательных значений, т.е. он движется по своей орбите в направлении на наблюдателя и, следовательно, выходит из затмения.



Рис. 3.2. Кривая лучевых скоростей (сплошная линия), построенная по усредненным значениям лучевых скоростей (точки), найденным по смещениям четырех линий N II.

В отличие от линий ионизованного азота профили линий нейтрального гелия, особенно в спектрах, полученных на фазах, близких к квадратурам, имели явную двукомпонентную структуру. Причем, один из компонентов всегда был заметно глубже другого. Поскольку в профилях линий Не I, практически на всех фазах, превалировал один из компонентов, было решено провести предварительное измерение лучевых скоростей этого компонента по профилям самой сильной линии в спектре He I 5875 тем же методом, который был применен для линий N II. В результате была получена кривая лучевых скоростей, повторяющая, только со значительно большим разбросом точек, кривую лучевых скоростей, построенную по смещениям линий N II. Таким образом, подтвердился вывод Маркова и др. [151] о том, что более сильный составляющий элемент линий He I, принадлежит главному компоненту системы UU Cas.

Для получения более точных значений лучевых скоростей главного компонента и, возможно, построения кривой лучевых скоростей вторично-



Рис. 3.3. Пример деления профилей линий HeI5875 на компоненты методом аппроксимации тремя гауссианами; сплошная линия - наблюдательный профиль, толстая сплошная линия - аппроксимационный профиль, щтриховая линия - профиль линии главного компонента (M_1) , пунктирная линия - профиль линии вторичного компонента (M_2) UU Cas, штрихпунктирная линия - эмиссионный профиль.

го компонента была проведена процедура деления профилей на компоненты. Разделение профилей спектральных линий He I проводилось методом аппроксимации гауссианами. При этом, учитывая, что в профилях линий гелия из-за наличия газовой составляющей в системе UU Cas и сравнительно низкого потенциала возбуждения атомов гелия может присутствовать эмиссионная составляющая, аппроксимация профилей линий проводилась тремя гауссианами. Как отмечено выше, использовались профили трех линий He I 5875, He I 6678 и He I 7065. Профили более "синих"линий гелия были существенно зашумлены и в работе не использовались.

На Рис. 3.3 приведен пример деления профилей линии He I 5875, полученных на фазах близких к квадратурам (0.25 и 0.75), на компоненты. Как можно видеть, профили линии хорошо разделяются на два компонента. Гауссиана, имитирующая эмиссионную компоненту газовой составляющей, небольшая и не влияет на определение положений центров профилей абсорбционных линий гелия. В тоже время она вносит значимую коррекцию в общий профиль линии, приближая его к наблюдательным данным. Такой чисто технический прием, конечно, не позволяет делать какие-либо выводы о природе и величине эмиссии, но может скорректировать положение абсорбционной линии, определяемое центром гауссианы, когда на нее налагается эмиссионная составляющая и симметрия профиля линии нарушается. Следует отметить, что при выполнении процедуры аппроксимации для всех профилей линий эмиссионная компонента всегда была намного меньше абсорбционных составляющих и в отдельных случаях лишь в полтора раза превышала ту, что изображена на Рис. 3.3. При аппроксимации профилей линий в спектрах, полученных на фазах 0.1 - 0.2, введение эмиссионной гауссианы вообще не потребовалось.

Средние значения лучевых скоростей компонентов UU Cas, определенные по трем линиям гелия, приведены в пятом и седьмом столбцах Таблицы 3.1. Кривые лучевых скоростей главного компонента путем аппроксимации функцией синус были построены с использованием лучевых скоростей, найденных по смещениям линий He I и N II. При этом были исключены значения лучевых скоростей, на фазах $\varphi = 0.021$ и $\varphi = 0.057$, полученные по линиям He I, т.к. их значения отличались на $-20 \div -30$ км·с⁻¹ от значений, определенных по линиям N II. Также, при построении кривых лучевых скоростей вторичного компонента не использовались значения на фазах $\varphi = 0.489$ и $\varphi = 0.523$, т.к. они были определены с большой степенью неопределенности (см. последний столбец табл. 3.1). Результаты аппроксимации проиллюстрированы на Рис.3.4, а значения соответствующих коэффициентов приведены в табл. 3.3.

Полученное значение отношения масс менее массивного компонента к более массивному $q = M_1/M_2 = K_2/K_1 = 0.54$ оказалось существенно меньше оценок, найденных из решений кривых блеска $q = M_2/M_1 =$ 0.75 - 0.8 [145, 146]. Кроме того, соотношение масс компонентов UU Cas, полученное по спектральным данным ($M_1 < M_2$), оказалось противопо-



Рис. 3.4. Кривые лучевых скоростей компонентов UU Cas (сплошные линии): заполненные кружки - лучевые скорости, найденные по линиям He I, незаполненные кружки - по линиям N II, перечеркнутые кружки - данные, исключенные из процедуры определения кривых лучевых скоростей.

Таблица 3.3. Значения коэффициентов кривых лучевых скоростей компонентов UU Cas

V_0	K_1	K_2	σ
${\rm kms^{-1}}$	${\rm kms^{-1}}$	${\rm kms^{-1}}$	${\rm kms^{-1}}$
-60.7 ± 1.8	-190.3 ± 2.3		± 8.8
-36.2 ± 2.9		102.2 ± 2.8	± 11.4

ложным тому, что определялось по фотометрическим данным $(M_1 > M_2)$. Таким образом из анализа кривых лучевых скоростей следует, что в системе UU Cas более массивным является менее яркий вторичный компонент.

Значения масс с точностью до множителя $sin^3(i)$, а также проекций больших полуосей орбит компонентов приведены в табл. 3.4, а значения масс компонентов и размера полуоси взаимной орбиты для угла наклона $i = 69^\circ$, найденного из решений кривых блеска, - в первой строке табл. 3.5.

Следует отметить, что полученные из анализа спектральных данных значения масс компонентов UU Cas существенно ниже оценок, полученных

$M_1\sin^3(i)/M_{\odot}$	$M_2\sin^3(i)/M_{\odot}$	$a_1\sin(i)/R_{\odot}$	$a_2\sin(i)/R_{\odot}$
7.7 ± 2.3	14.4 ± 2.3	32.0 ± 0.5	17.2 ± 0.4

Таблица 3.4. Значения Msin(i) и проекций больших полуосей орбит компонентов UU Cas

Таблица 3.5. Значения масс компонентов и большой полуоси орбиты UU Cas

Источник	i	M_1/M_{\odot}	M_2/M_{\odot}	$q = M_2/M_1$	A/R_{\odot}
Автор [162]	69°	9.5 ± 2.1	17.7 ± 2.3	1.85 ± 0.02	52.7 ± 0.5
Полушина [146]	69°	34.5 ± 1.5	25.7 ± 0.6	0.75 ± 0.3	69.0 ± 0.7
Антохина и	69°	26.0	23.4	0.8	65.0
Кумсиашвили [145]					

ранее по фотометрическим данным с использованием фундаментальных зависимостей между параметрами звезд (см. табл. 3.5).

3.2. Эволюционный статус UU CAS

Полученная автором по новым спектральным данным конфигурация распределения масс компонентов UU Cas оказалась прямо противоположной принятой до этого, которая основывалась на результатах фотометрических исследований и фотографической спектрометрии Сенфорда [144]. Согласно принятой концепции, более массивный и яркий компонент заполняет (переполняет) свою полость Роша и поставляет газ ко второму менее массивному и менее яркому компоненту. Система погружена в расширяющуюся газовую оболочку. Локальные скачки блеска, не связанные с затмениями, объяснялись неоднородностями газовой составляющей [148], [146]. Предполагалось, что система UU Cas с массивными компонентами раннего спектрального класса находится в начальной стадии первого обмена масс.

По спектральным наблюдениям Маркова и др. [151], полученных за 10 лет до наблюдений автора, ими было высказано предположение, что

второй компонент может быть окружен газовым диском, экранирующим поток излучения от него. Этот вывод они сделали на основе двугорбого вида профиля линии H_α на фазе, близкой к минимуму блеска, и плохой проявляемости линий вторичного компонента в спектре UU Cas. Несколько позже Джурасевичем и др. [152] была предложена модель системы с газовым диском.

В свете полученных автором данных такая модель кажется вполне соответствующей действительности. Факт наличия геометрически толстого аккреционного диска или более плотной неоднородной газовой составляющей вокруг более массивного, а значит и более горячего, компонента и в нашем случае подтверждается слабостью линий нейтрального гелия, принадлежащих ему, и зависимостью их глубин от фазы (см. Рис.3.3). Наличие газа в полости Роша более массивного компонента, поставляемого с главного и менее массивного компонента через внутреннюю точку Лагранжа L_1 , говорит о том, что система находится в стадии обмена масс. А учитывая полученное соотношение масс компонентов (масса донора в два раза меньше массы аккретора), можно предположить, что процесс идет продолжительное время и находится в установившейся стадии, возможно, ближе к заключительной стадии первого обмена масс. Это означает, что в системе могут наблюдаться элементы взаимодействия потоков газового вещества при его движении внутри и вовне полостей Роша обоих компонентов, описанные в серии вычислительных работ по трехмерной газодинамике тесных двойных систем, выполненные группой под руководством академика А.А. Боярчука и приведенные в двух монографиях [153] и [154].

Более частные модели переноса вещества и образования акреционного диска внутри полости Роша аккретора в системах с кривыми блеска типа β Lyr, к которому относится UU Cas рассмотрены в ряде работ Бисикало и др. [155–157], а также в работах Назаренко и др. [158,159]. Конкретные результаты работы моделей с диском приведены в статьях Джурасевича и др. [160, 161], в которых исследуются кривые блеска ТДС RY Scuti и V448 Суд подобные UU Cas.

Согласно данным трехмерных газодинамических расчетов, внутри полости Роша аккретора посредством переноса массы газа со звезды донора образуется акреционный диск и газовое гало, которое, ударяясь в струю газа, текущую через точку Лагранжа L_1 внутрь полости Роша звезды аккретора, создает так называемую горячую линию. Взаимодействие гало и диска с набегающим газом общей оболочки приводит к образованию отошедшей ударной волны, в которой газ частично течет в направлении, обратном орбитальному движению, и через точку Лагранжа L_3 покидает звезду, подпитывая общую расширяющуюся оболочку.

Газовые структуры проявлются в полученных спектрах в виде мощной эмиссии в линии водорода H_{α} , образующейся из-за переизлучения света обеих звезд газовыми составляющими в направлении наблюдателя. Форма профилей линии изменяется с фазой. В качестве иллюстрации на рис.3.5 приведены профили линии H_{α} для четырех ключевых фотометрических фаз вблизи квадратур и минимумов блеска. Для оценки эмиссиионной составляющей профили H_{α} были представлены тремя компонентами посредством аппроксимации гауссианами, как это было сделано при аппроксимации линий нейтрального гелия. За начальные положения гауссиан, представляющих абсорбционные компоненты профилей линий водорода, образуемых в фотосферах каждой из звезд системы, были приняты положения линий нейтрального гелия на таких же значениях фаз. Как можно видеть, такое чисто формальное представление профилей линий H_{α} тремя гауссианами позволяет получить вполне удовлетворительные приближения наблюдаемых профилей аппроксимационными.

При этом видно, что эмиссионная составляющая имеет широкий профиль, положение которого практически не зависит от фотометрической фазы и близко к скорости барицентра системы. Таким образом, можно



Рис. 3.5. Аппроксимация профилей спектральных линий H_{α} тремя гауссианами, соответствующих одному эмиссионному и двум абсорбционным компонентам (красная линия); обозначения те же, что и на Рис. 3.3; зеленая сплошная линия - профиль линии HeI 5875 на соответствующих фазах.

сделать предположение, что эмиссионная компонента образуется во всех структурах газовых течений: диске, гало, общей расширяющейся оболочке и обнаруживается как усредненный результат их совместного действия. Для проведения более детального анализа структуры эмиссионной компоненты необходимо применение метода допплеровской томографии.

Как отмечалось в предыдущем разделе, эмиссионная составляющая профилей линий гелия достаточно мала и не мешает отследить более тонкие проявления отдельных элементов газовой составляющей. Так на фазах непосредственно перед главным минимумом в профилях линий нейтрального гелия появляется смещенный в красную сторону неглубокий, но



Рис. 3.6. Вид профилей линии HeI5875 в районе главного минимума UU Cas; абсорбционный компонент справа от основного профиля (фаза $\varphi = 0.975$) образован предположительно в аккреционном диске.

явно видимый, абсорбционный компонент, синее крыло которого поднято небольшой эмиссией (см. рис. 3.6). Смещение соответствует лучевой скорости порядка 200 км·с⁻¹. С другой стороны, непосредственно после главного минимума (фазы $\varphi = 0.021$ и $\varphi = 0.057$) профили линий нейтрального гелия, принадлежащие главному компоненту, смещены в синюю сторону относительно фотосферных линий ионизованного азота на величину порядка -30 км·с⁻¹, в шесть раз превышающую ошибку измерения (см. табл. 3.1, рис. 3.4 и рис. 3.6).

Данные эффекты могут являться проявлениями в спектре звезды влияния аккреционного диска, существующего вокруг вторичного компонента UU Cas. Они связаны с частичной его проекцией со стороны наблюдателя на являющийся гигантом главный, заполняющий свою полость Роша, компонент системы на фазах вблизи главного затмения. Так образование дополнительного абсорбционного компонента в линиях He I можно объяснить просвечиванием излучением главной звезды части вращающегося с кеплеровой скоростью диска, проецируемой на нее. На фазах непосредственно перед главным минимумом на главный компонент в основном проектируется часть диска, имеющая скорость от наблюдателя. Это приводит к образованию смещенного в красную область дополнительного абсорбционного компонента. После главного минимума наблюдается обратная ситуация. Абсорбционный компонент диска, накладываясь на профиль линии He I, образованной в фотосфере звезды и имеющей на данной фазе уже отрицательную скорость, смещает ее дополнительно в синюю сторону. Эффект может усиливаться еще и смещенным в синюю сторону компонентом, который образуется в струе газа, текущей на данной фазе в сторону наблюдателя через точку L_1 и проектирующейся на главный компонент звезду донор.

3.3. Доплеровская томография UU Cas

Как отмечено в предыдущем параграфе и работе автора [162], система UU Cas находится, предположительно, на поздней стадии первого обмена масс. Здесь возникает вопрос, кажущийся на первый взгляд парадоксальным. Это то, что главный, более глубокий, минимум наблюдается, когда более массивный и, следовательно, более горячий компонент затмевает менее массивный и, следовательно, более холодный вторичный компонент. Однако этот парадокс был решен в рамках концепции переноса вещества с теперь ставшего уже маломассивным, но все еще заполняющим свою полость Роша, компонента на второй, более массивный компонент с образованием вокруг него газового диска, который может эффективно поглощать излучение вторичного, более массивного компонента.

Вместе с тем, как, например, указано в работах Подсиадловски и др. [163], а также Постнова и Юнгельсона [164], конечный продукт эволюции тесной двойной системы сильно зависит от характера взаимодействия

Дата	HJD -	Общая	Фаза
	2458000	эксп. (час.)	
22.07.2017	-037.68159	3.0	0.2644
10.11.2017	038.15110	2.0	0.1657
05.01.2018	124.27512	3.0	0.2738
06.01.2018	125.22942	2.0	0.3797
12.01.2018	131.16566	3.0	0.0838
08.02.2018	158.23150	2.0	0.2608
09.02.2018	159.14144	3.0	0.3677
16.02.2018	166.15118	2.5	0.1909
19.03.2018	197.18453	1.5	0.8332

Таблица 3.6. Новые спектры UU Cas, полученные автором с июля 2017 г. по март 2018 г.

между ее компонентами, в частности, от скорости переноса массы в процессе обмена. Поэтому важно, среди прочего, исследовать газодинамическую картину, установившуюся в системе, и выявить детали процесса переноса массы, чтобы понять его эволюционное состояние и дальнейший путь развития системы. В данном разделе продолжено исследование процесса обмена масс методами доплеровский томографии, поскольку эти особенности вносят значительный вклад в данные наблюдений, как фотометрические, так и спектроскопические, и могут дать информацию о сценарии эволюционного развития системы.

Для работы были использованы спектры UU Cas, полученные автором в январе — апреле 2017 г. и приведенные в табл. 3.1, а также спектры, полученные автором с июля 2017 г. по март 2018 г. также на эшеллеспектрометре 1.2 м телескопа Коуровской астрономической обсерватории УрФУ, информация о которых приведена в табл. 3.6.

Следует отметить, что значения фотометрических фаз, приведенные в табл. 3.6, смещены на 0.5 по сравнению с фазами спектров, приведенных

в табл. 3.1, поскольку при работе с процедурой доплеровской томографии главным считается более массивный компонент в ТДС.

С помощью метода компьютерной томографии предполагалось исследование газовой составляющей в системе UU Cas, которая наиболее явно выражена в эмиссии линии H_α. Из профилей этой линии необходимо было вычесть абсорбционные составляющие фотосферных линий обоих компонентов.

Как известно, профили фотосферных абсорбционных компонентов Бальмеровских линий зависят главным образом от эффективной температуры звезды T_{eff} , ускорения силя тяжести $\log g$ и в меньшей степени чувствительны к химическому составу и скорости микротурбулентности v_t (см., например, [165]).

Теоретические спектры компонентов UU Cas были получены по сетке BSTAR2006 звездных спектров Ланца и Хубеного [135] вычислением по параметрам T_{eff} и log g. Сетки BSTAR2006 включают спектры, вычисленные для трех наборов химического состава и микротурбулентной скорости v_t . Затем полученные теоретические профили свертывались с инструментальными и профилями вращения для заданных значений прогнозируемой скорости вращения $V \sin i$. При этом использовадась программа ROTIN3, поставляемая с программным пакетом TLUSTY [166]. Профили модели не учитывали ни приливную деформацию вторичного компонента, ни гравитационное потемнение. Также не учитывались эффекты, связанные с затмениями вблизи фаз $\varphi = 0.0$ и $\varphi = 0.5$.

Для вычисления теоретического спектра двойной системы использовался метод аналогичный подходу Ткаченко [167] с использованием отношения $q_R = (R_2/R_1)^2$, где R_1 и R_2 радиусы главного и вторичного компонентов, соответственно. В работе Полушиной [146] было показано, что в системе существует третий свет, который, вероятно, связан с околозвездным газом. Поскольку у нас не было практически никакой информации о
свойствах этого газа в системе, а также, учитывая то, что согласие фотометрических данных одновременно с нашими спектральными не получалось, вклад третьего света был смоделирован простым способом, как независимая от длины волны доля континуума l_3 двойной системы. С учетом q_R и l_3 , теоретический нормализованный спектр двойной системы может быть представлен следующим соотношением:

$$I_t = \frac{I_1 + q_R I_2 + l_3 (I_1^c + q_R I_2^c)}{(I_1^c + q_R I_2^c)(1 + l_3)},$$
(3.1)

где I_i — это полная интенсивность теоретического спектра *i*-го компонента двойной системы, а I_i^c — интенсивность континуума этого же компонента.

Для оценки параметров звездной атмосферы мы использовали наблюдаемые профили линий в спектре, полученном 5 января 2018 г. Выбранный для подгонки наблюдаемый спектр имеет лучший S/N (до 100) среди других спектров и получен на орбитальной фазе $\varphi = 0.2738$, т.е. точно вне затмения.

Более подробно процесс разделения абсорбционных и эмиссионной составляющих в профилях линии H_α приведен в нашей работе Кононов и др. [168].

Для изучения структуры газового потока в системе необходимо было быть уверенным, что эмиссионные профили линии H_{α} свободны от абсорбций, образованных в атмосферах компонентов. На рис. 3.7 приведены упорядоченные по фазе профили линии H_{α} . Черным цветом показаны исходные профили H_{α} , полученные из наблюдений, а красным — те же профили после удаления абсорбций с помощью композиционных теоретических спектров двойной системы. Как можно заметить, на интервале фаз от $\varphi = 0.10$ до $\varphi = 0.27$ в «очищенных» профилях наблюдается абсорбционный компонент с отрицательным значением потока. Такое поведение линий побудило нас предложить феноменологическую модель картины газового потока и формирования линий. Мы предположили, что профиль линии H_{α}



Рис. 3.7. Вид профилей линии H_{α} на различных значениях фотометрических фаз. Красным цветом изображены эмиссионные профили после удаления абсорбции фотосфер компонентов. Черным цветом представлены оригинальные профили линии H_{α} .



Рис. 3.8. Схематическое изображение газодинамических особенностей в системе UU Cas и их возможных наблюдательных проявлений в спектре. Подробности в тексте.

состоит, как минимум, из трех компонентов: это поток газа из точки L_1 (красная линия на рис. 3.8); звездный ветер с поверхности более массивного и горячего компонента (зеленая линия на рис. 3.8) и дискообразной газовой оболочки, окружающей массивный компонент (синяя пунктирная линия на рис. 3.8). Толстой черной линией на рис. 3.8 показан суммарный профиль, состоящий из красного, зеленого и синего компонентов профилей. В соответствии с феноменологической моделью, на рис. 3.8 приведены формы профилей линии H_{α} , как они должны формироваться для наблюдателя в двух противоположных фазах (правый нижний угол рис. 3.8 и левый верхний угол рис. 3.8). Это примерно фазы в районе $\varphi = 0.10 - 0.15$ и $\varphi = 0.60 - 0.65$. По крайней мере, чисто качественное сравнение с реальными профилями на рис. 3.7 вполне приличное.

Для проверки нашей феноменологической теории было решено использовать метод Доплеровской томографии (Марч и Хорни [169]). Этот

147

метод позволяет конвертировать наблюдаемые профили эмиссионных линий в специфические карты интенсивностей. Во многих случаях эти карты более иллюстративны (после применения метода Доплеровской томографии), чем оригинальные профили линий. В реальности Доплеровская томограмма представляет собой картину динамической структуры газа в тесной двойной системе в пространстве скоростей.

С момента своего изобретения в 1988 г. метод использовался во многих работах и помог выявить несколько газодинамических элементов, характерных для тесных полуразделенных двойных систем, например, аккреционный диск и поток через точку Лагранжа L_1 . Поэтому теперь в большинстве случаев можно уверенно идентифицировать именно эти элементы на томограмме (если они есть в объекте) и использовать томографию для проверки относительно простых моделей, например, таких, как изложенная выше.

Исходными данными для работы по методу допплеровских томограмм UU Cas являлись профили, показаные на рис. 3.7 красным цветом. В некоторых из них, где наблюдаются отрицательные величины интенсивности (ниже уровня непрерывного спектра), эти значения были приравнены к нулю, т.к. метод Доплеровских томограмм не работает с отрицательными величинами. Этот прием не нарушает основной принцип работы метода Доплеровской томографии исключительно с оптически тонкой газовой средой. Однако, в нашем случае нельзя утверждать, что все элементы газовой составляющей являются оптически тонкими. Таким образом, можно только предположить, что вклад околозвездного газа будет оптически тонким. Можно только сказать, что в данном случае замена отрицательных значений на нулевые не окажет существенного влияния на окончательный результат. Вычислительный код, который был использован для построения томограмм основан на алгоритме Люси [188] регуляризации по методу максимума энтропии (МЭ).



Рис. 3.9. Н $_{\alpha}$ Допплер томограмма UU Cas. Подробности в тексте.

Полученная томограмма приведена рис. 3.9. Фигура, похожая на цифру 8, изображенная тонкой черной линией, обрисовывает полости Роша обоих компонентов (верхняя половина - главного, более массивного компонента, нижняя вторичного). На томограмме можно выделить три главных особенности. Самую яркую область, в основном лежащую в пределах полости Роша вторичного компонента, следует ассоциировать с поверхностью вторичного, менее массивного, компонента, нагретой излучением главного компонента. Это можно сравнить с горячим пятном на поверхности донора, обращенной к аккретору в катаклизмических переменных (см., например, [171–173]).

Протяженную яркую структуру, простирающуюся к нижнему левому краю квадранта томограммы можно уверенно ассоциировать с потоком из точки L_1 . Форма и ширина указывают на то, что он может быть не таким коллимированным, как потоки в катаклизмических переменных. На томограмме видно, что газ, очевидно, извергается из широкой области вторичного компонента. Окончательно, учитывая, что основная часть эмиссии приходится на область, принадлежащую вторичному компоненту, следует отнести область, показанную на рис. 3.8 красным цветом, и к области потока, и к поверхности вторичного компонента, обращенной к аккретору.

Также прослеживается слабая дискообразная структура с центром в точке с координатами $V_x = 0$ км с⁻¹ и $V_y = 100$ км с⁻¹ и имеющим «скоростной» радиус RV = 500 - 600 км с⁻¹. Чтобы сделать его положение и предельные скорости более четкими, эта диффузная деталь обведена на томограмме пунктирной окружностью. Следует обратить внимание, что положение центра диска подтверждает результаты автора (Горда [162]) и приведенные выше выводы; а именно, расчетная амплитуда изменения лучевой скорости главного компонента $K_1 = V_{r1} \approx 100$ км с⁻¹. Это позволяет приписать дисковидную структуру более массивному первичному компоненту. В качестве еще одного подтверждения полученных результатов можно привести статью Ричардс и др. [174], где авторы изучали короткопериодические Алголи и обнаружили такие же особенности на томограммах, что и в данном случае: потоки, вклады от вторичных компонентов и дископодобные структуры.

3.4. Спектральное исследование СС Саз

СС Саз - затменно-переменная с массивными компонентами раннего спектрального класса O8.5III + B0V, ($V = 7.^{m}08$, $P = 3.^{d}366324$) была открыта Пирсом [175] в 1927 г., как спектрально-двойная звезда. Фотометрическая переменность обнаружена в 1930 г. Гутником и Прагером [86] и подтверждена Гапошкиным [176] в 1953 г. В 60-х — 80-х годах прошлого века разными авторами был проведен ряд фотоэлектрических наблюдений СС Саз (см. подробнее, например, [177]), однако, за это время было получено только 3 кривых блеска с более-менее полным покрытием кривых блеска. По форме кривой блеска звезда относится к типу *EB*. На всех полученных кривых блеска отмечается большой разброс точек и временные искажения формы на отдельных фазовых углах, что указывает на то, что СС Саз является активной взаимодействующей системой, возможно, с сильным звездным ветром, истекающим с поверхности главного компонента.

Основная масса спектральных наблюдений СС Саѕ, начиная с первого исследования Пирса [175], была выполнена фотографически. На спектрограммах хорошо выделялись линии главного компонента, линии вторичного компонента просматривались только на отдельных спектрах, их измерение не представлялось возможным. В 1985—1987гг. впервые были получены спектрограммы СС Саѕ с регистрацией светового потока фотоэлектронным устройством - ретиконом (Хилл и др. [177]), на которых линии второго компонента выделялись из шумовой дорожки и были пригодны для измерений. В этой работе получены кривые лучевых скоростей обоих компонентов CC Cas и получена значимая оценка отношения их масс, определен эволюционный статус системы.

При определении параметров орбиты главного компонента некоторые авторы обнаруживали ее эллиптичность с эксцентриситетом порядка 0.1 [175]. При этом, чаще всего эллиптичность обнаруживалась при спектральных наблюдениях, фотометрические исследования ее не показывали. Также следует отметить некоторый разнобой в оценках величины периода СС Саs, полученных разными авторами в разное время. Причем фотометрические определения давали, как правило, более короткий период, чем спектроскопические. В начале 70-х годов было зарегистрировано также значительное изменение скорости центра масс системы [177]. Более подробное обсуждение проблемы изменения периода и возможной эллиптичности орбиты можно найти в работах Хилла и др. [177] и Майера [178].

Несмотря на то, что небольшие изменения периода регистрируются давно, причина их остается неустановленной. В основном рассматриваются две возможности - это потеря массы системой за счет сильного звездного ветра, обнаруживаемого в радиодиапазоне [179] и в оптике [180], и наличие третьего тела в системе. Несмотря на то, что первая причина кажется более вероятной, вторая тоже имеет право на существование, из-за обнаруженного изменения скорости центра масс системы. Как отмечено в работе Хилла и др. [177]: «Такое объяснение (наличие третьего тела *asm.*) не может быть исключено, оно обеспечило бы нам модель, объясняющую вышеупомянутые различия скоростей и отклонения времен минимумов от линейной эфемериды». Так или иначе,- этот вопрос остается пока открытым.

С середины 80-х годов прошлого века спектральное исследование СС Саѕ не проводилось, поэтому была определенная заинтересованность включить эту систему в программу спектральных наблюдений на эшелле-

152

спектрометре нового 1.2 м телескопа Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета, тем более, что ранее в обсерватории было проведено ее фотометрическое исследование и получена одна из наиболее полных кривых блеска [181].

Спектральные наблюдения СС Саз были проведены в период с 30 марта 2011г. по 29 марта 2012г. на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения альт-азимутального телескопа (D = 1.21 м, F = 12.0 м) (см. [123]) с разрешением $R = 30\,000$. В качестве светоприемного устройства использовалась ПЗС-камера, изготовленная в лаборатории перспективных разработок САО РАН, с ПЗС-чипом E2V 40-42 (2048х2048, 13.5 мкм), охлаждаемым до температуры жидкого азота системой замкнутого цикла CRYOTIGER.

Всего за период наблюдений было получено 20 спектров СС Саз с эффективной экспозицией 1 час (3 снимка по 20 минут). Большее время накопления сигнала, учитывая величину периода системы, приводило бы к заметному размытию спектральных линий из-за движения компонентов по орбите, меньшее - к уменьшению отношения сигнал/шум в спектре. В табл. 3.7 приведен список полученных спектров. Время получения спектра приводится для среднего момента каждой триады кадров.

В полученных порядках спектра СС Саs, как и следует для звезды спектрального класса O9 - B0, выделяются абсорбционные линии нейтрального гелия и бальмеровской серии водорода, также заметны линии азота серы и кислорода. Наиболее сильной является линия HeI 5876. Остальные линии имеют меньшие глубины и более зашумлены. Среднее по спектру отношение сигнал/шум варьировалось в пределах 40 — 80.

Для построения кривых лучевых скоростей была выбрана линия HeI 5876, как наиболее сильная в спектре CC Cas. В ее профилях на фазах, близких к квадратурам, явно просматривались следы второго компонента. Разделение бленды линий проводилось классическим методом аппроксима-

Таблица 3.7. (Список полу	ченных	спектров	И	результаты	измерения	луче-
вых скоростей	і компоненто	в CC C	as				

Ν	дата	$n \times t$	JD_{\odot}	фаза	V_1	σ_1	V_2	σ_2
		с	2455000 +		$\rm km/s$	$\rm km/s$	$\rm km/s$	$\rm km/s$
1	30.03.11	3×1200	651.1943	0.120	-101.0	0.9	199.6	7.0
2	24.11.11	3×1200	889.5081	0.908	55.6	1.2	-194.1	12.8
3	24.11.11	3×1200	889.5539	0.921	39.7	2.1	-167.0	17.6
4	24.11.11	2×1200	889.5913	0.932	34.3	1.8	-168.1	11.9
5	18.01.12	3×1200	945.3149	0.484	-21.3	2.0		
6	19.01.12	3×1200	946.3040	0.778	100.4	1.4	-304.5	6.8
7	25.01.12	3×1200	952.3784	0.582	37.0	1.9	-165.8	16.2
8	26.01.12	3×1200	953.3117	0.860	76.0	1.8	-250.3	5.7
9	31.01.12	3×1200	958.3868	0.367	-119.5	1.6	191.8	11.9
10	14.02.12	3×1200	972.2281	0.478	-30.5	1.3		
11	14.02.12	3×1200	972.3527	0.515	1.6	1.4	-54.6	16.2
12	15.02.12	3×1200	973.2356	0.778	95.7	2.6	-301.5	8.5
13	15.02.12	3×1200	973.3800	0.821	88.7	2.6	-271.9	8.5
14	20.02.12	3×1200	978.3171	0.287	-144.7	1.0	246.5	6.9
15	21.02.12	3×1200	979.2282	0.558	27.9	2.8	-110.0	5.7
16	21.02.12	3×1200	979.3019	0.580	35.4	3.6	-149.8	33.1
17	21.02.12	3×1200	979.4024	0.609	61.9	3.3	-200.5	23.1
18	13.03.12	3×1200	1000.1823	0.782	94.9	1.7	-312.3	6.4
19	14.03.12	3×1200	1001.2654	0.104	-102.2	2.2	165.9	10.2
20	29.03.12	3×1200	1016.2018	0.540	8.3	4.1	-91.5	9.8



Рис. 3.10. Примеры аппроксимации профилей линий HeI 5876 суммой гауссиан. Сплошная линия - суммарный профиль, штриховая - профиль главного компонента, штрих-пунктирная - профиль вторичного компонента.

ции их суммой гауссиан с применением нелинейного метода наименьших квадратов Марквардта. На рис.3.10 приведены примеры разделения линии HeI 5876 в фазе, близкой к квадратуре (слева), и в фазе затмения (справа), когда профилии линий отдельных компонентов СС Саз значительно перекрывались. После разделения профилей были определены лучевые скорости обоих компонентов. Для главного компонента скорости были найдены по всем спектрам. Для вторичного, более слабого компонента, в двух фазах, близких к середине затмения, определить лучевые скорости не удалось из-за сильного перекрытия профилей. Значения лучевых скоростей компонентов и формальные оценки их погрешностей, полученные в процессе аппроксимации профилей, приведены в четырех последних столбцах табл. 3.7.

Практически все фотометрические и последнее спектрометрическое исследования [177] не показывали сколько-нибудь заметного эксцентриситета орбиты СС Саз. Поэтому для построения кривых лучевых скоростей были выбраны синусоидальные зависимости. В процессе аппроксимации варьировалось значение периода системы, т.к. для фаз, вычисленных по

Компонент	главный	вторичный		
$V_0~({ m km/s})$	-19.8 ± 1.4	-20.9 ± 2.9		
$K~({ m km/s})$	-121.3 ± 2.2	291.3 ± 4.5		

Таблица 3.8. Параметры кривых лучевых скоростей

эфемеридной формуле Хилла и др. [177], наблюдался повышенный разброс лучевых скоростей и систематическое смещение их относительно синусоидальных зависимостей. Новая эфемеридная формула, вычисленная только на основе наших наблюдений, приведена ниже:

$$JD_{\odot}I_{min} = 2455647.4234 + 3.^{d}3666045 \cdot E.$$
(3.2)

Найденная величина периода больше приведенного в работе Хилла и др. [177], но несколько меньше полученного Пирсом [175] и использованного в ряде работ, например, в [181]. В табл. 3.8 приведены найденные значения V_0 , K_1 и K_2 , а на рис. 3.11 в графическом виде показана аппроксимация лучевых скоростей компонентов СС Саѕ синусоидальными зависимостями.

Как видно из рис. 3.11, кривые лучевых скоростей обоих компонентов, построенные с использованием фаз, вычисленных по эфемеридной формуле (3.2), хорошо представляются синусоидальными зависимостями, что говорит об отсутствии заметного эксцентриситета их орбит. Полученные значения V_0 для обоих компонентов в пределах погрешностей имеют практически одинаковые значения (см. табл. 3.8). Этот факт подтверждает верность уточненного значения периода, по сравнению с полученным в [177], и служит косвенным подтверждением возможного процесса изменения периода.

Найденные в данной работе параметры CC Cas, вычисленные для среднего значения скорости центра масс системы $V_0 = (V_0^1 + V_0^2)/2$, при-



Рис. 3.11. Кривые лучевых скоростей компонентов СС Саз (сплошные линии), полученные по данным ПЗС-наблюдений. Кружками показаны лучевые скорости главного компонента, треугольниками – вторичного

параметр	Фотопластинка	Ретикон	ПЗС	
	[175, 177]	[177]	автор [182]	
$V_0({ m km/s})$	-9.9 ± 2.4	-10.4 ± 2.0	-20.4 ± 2.1	
$K_{1}({ m km/s})$	138.0 ± 4.0	116.0 ± 1.8	123.9 ± 2.0	
$K_{2}({ m km/s})$		285.9 ± 7.3	292.4 ± 4.6	
P(day)	3.366277	3.366324	3.366604	
$\sigma_1({ m km/s})$	10.3	5.7	5.9	
$\sigma_2({ m km/s})$		27.9	11.9	
$M_1 \sin^3 i \left(M_\odot ight)$	18.3 ± 1.4	16.1 ± 0.8	17.5 ± 1.0	
$M_2 \sin^3 i \left(M_\odot ight)$	8.8 ± 0.8	6.5 ± 0.4	7.4 ± 0.5	
$(a_1 + a_2)\sin i \left(R_\odot\right)$	28.3 ± 0.9	26.2 ± 0.6	27.0 ± 0.4	
$q = M_1/M_2$	2.1 ± 0.1	2.41 ± 0.04	2.36 ± 0.05	

Таблица 3.9. Сводная таблица параметров CC Cas

ведены в табл. 3.9. Там же для сравнения помещены аналогичные данные из [175] и [177].

Как можно видеть из табл. 3.9 величина среднеквадратического разброса измеренных скоростей относительно кривой лучевых скоростей вторичного компонента σ_2 , полученная в данной работе, практически в два с половиной раза меньше значения, приведенного в работе Хилла и др. [177].

3.5. Обсуждение результатов и выводы

В данной главе представлены результаты спектральных наблюдений UU Cas, полученные автором на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения ($R = 15\,000$) 1.2-м телескопа Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Впервые найдены значения лучевых скоростей вторичного, более массивного, менее яркого компонента. Получено спектроскопическое отношение масс компонентов $q = M_1/M_2 = 0.54$. Для значения угла наклона орбиты $i \simeq 69^\circ$, приведенного в литературе, определены массы компонентов $M_1 = 9.5 M_{\odot}$, $M_2 = 17.7 M_{\odot}$, а также значение радиуса орбиты $A = 52.7 R_{\odot}$. На основе полученных значений масс компонентов показано, что система не является такой массивной, как считалось ранее, исходя из данных фотографической спектроскопии и анализа кривых блеска. Соотношение масс компонентов, полученное автором, оказалось прямо противоположным тому, что определялось по фотометрическим данным. А именно, более горячий, заполняющий свою полость Роша, главный компонент имеет вдвое меньшую массу, чем менее яркий вторичный. Это обстоятельство значительно изменяет взгляд на эволюционный статус системы UU Cas. По всей видимости она находится в приближающейся к завершению стадии перемены ролей.

Дальнейшее исследование особенностей изменений профилей сильной спектральной линии водорода H_{α} в зависимости от фотометрической фазы, а также применение метода допплеровской томографии позволили выявить три газодинамических компонента, присутствующие в системе: это поток газа из точки L_1 , с маломассивного компонента, заполняюшего свою полость Роша, на более массивный и горячий компонент, диск, окружающий массивный компонент, и звездный ветер с горячего массивного компонента, о существовании которого свидетельствует наличие компонента Р Судпі в профилях линий.

Следует отметить, что модель системы UU Cas с диском ранее была предложена в работах Джурасевича и др. [152], а также Маркова и др. [150,151], но при отношении масс компонентов, найденном ранее из фотометрии. Полученное автором новое отношение масс компонентов UU Cas было использовано в работе Минникента и др. [183] при фотометрическом исследовании UU Cas. Авторы использовали фотометрические данные из ряда обзоров, а также из работ Полушиной [146] и Кумсиашвили и Чаргейшвили [148], полученные на достаточно большом интервале времени. При определении параметров системы UU Cas с использованием данных этой объединенной кривой блеска, авторы использовали модель диска Джурасевича [184]. Найденные ими, в отличие от прежних фотометрических исследований UU Cas (см. табл. 3.5), массы компонентов $M_1 = 17.4 M_{\odot}$ и $M_2 = 9 M_{\odot}$ и расстояние между ними $A = 52.2 R_{\odot}$ близки к спектральным определениям из работы автора [162], а именно $M_1 = 17.7 M_{\odot}, M_2 = 9.5 M_{\odot}$ и $A = 52.7 R_{\odot}$. Общая характеристика системы, как в плане эволюционного статуса, так и газодинамической структуры, представленная в этой работе, вполне совпадает с выводами, приведенными в работах автора или выполненных с его участием [162, 168].

Совсем недавно практически та же группа соавторов под руководством Петра Хадравы провела спектральное исследование системы UU Cas с привлечением всех известных на настоящий момент спектральных данных этой звезды [185]. В этой работе, по приглашению руководителя данного проекта, принял участие и автор (Горда С.Ю.). В общий список спектров были включены все спектры, полученные на тот момент автором, на основании которых ранее уже были получены изложенные выше научные результаты [162, 168].

Разделение участков спектров тесной двойной UU Cas, в которых содержались бленды спектральных линий, на отдельные компоненты, выполнялось посредством использования KOREL кода в Фурье области [186]. Профиль каждой абсорбционной линии разделялся на три компонента. Это фотосферные абсорбции двух компонентов и абсорбция, образованная в оптически тонкой области газовой составляющей (диска). Значение отношения масс компонентов $q_{sp} = 1/q_{ph}$, найденое по всем известным спектрам UU Cas, оказалось также обратным определениям, полученным исключительно по фотометрическим данным (кривым блеска). Среднее значение $q_{sp} = 2.54 \pm 0.68$ получилось даже больше, чем найденое в работе автора [162]. Следует отметить, что значение отношения масс компонентов $q_{sp} = 2.25$, найденое при таком разделении профилей линии He I 5876, исключительно по спектрам, полученным автором в Коуровской обсерватории, оказалось несколько больше полученного автором значения $q_{sp} = 1.85$ [162].

На основании проведенного анализа результатов разделения профилей спектральных линий большого числа спектров UU Cas, полученных в рвзные эпохи, авторы работы [185] пришли к выводу, что газодинамические структуры изменяются со временем. Система находится в заключительной стадии первого обмена масс. Определение точного значения отношения масс компонентов пока составляет определенную трудность из-за сильного экранирования более массивного компонента газовой составляющей.

Таким образом, выводы, сделанные автором в работе [162] и совместно с соавторами в работе [168], о новом эволюционном статусе UU Cas нашли свое подтверждение в более поздних работах других исследователей.

На основе 20-ти спектрограмм затменной переменной с массивными компонентами раннего спектрального класса СС Саs, впервые полученных с помощью ПЗС-приемника на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения, измерены лучевые скорости и построены кривые лучевых скоростей обоих компонентов, что позволило определить величину V_0 и уточнить значение орбитального периода системы. Это второе исследование СС Саs, в котором измерены лучевые скорости вторичного компонента, причем в данном исследовании величина разброса точек на кривой лучевых скоростей оказалась в 2.5 раза меньше, чем в предыдущем исследовании [177]. Найденные автором [182] значения полуамплитуд лучевых скоростей компонентов СС Саs были использованы в вышедшей в 2022 году работе Саутворса и Боумена [117] для уточнения масс компонентов, най-денных по фотометрическим данным со спутника TESS. В этой же работе при решении кривых блеска, полученных по данным спутника TESS, был обнаружен небольшой эксцентриситет орбиты $e = 0.0099 \pm 0.0013$.

Полученные значения периода и лучевой скорости центра масс системы заметно отличаются от приведенных ранее в литературе. На основе этого можно сделать предположение о возможном наличии третьего тела в системе CC Cas.

Вклад соискателя:

Вклад автора в совместной работе [168] - это постановка задачи, получение и первоначальная редукция спектрального материала, обсуждение результатов в равной мере с соавторами.

В совместной работе [185] - это предоставление наблюдательного материала и обсуждение с соавторами полученных результатов.

3.6. Положения, выносимые на защиту

По результатам третьей главы на защиту выносится следующее положение:

• По оригинальным спектральным данным автора впервые найдено значение динамической массы вторичного компонента полуразделенной ТДС с массивными компонентами UU Cas, оказавшегося, в противоположность данным фотометрии, массивнее главного. Сделан вывод о новом эволюционном статусе системы UU Cas, согласно которому система находится в заключительной стадии первого обмена масс. Определены основные элементы структуры переноса газовой составляющей от менее массивного донора к массивному аккретору, полученные по спектральным данным с использованием метода допплеровской томографии.

Глава 4. Исследование пятенной активности компонентов двух короткопериодических тесных двойных систем типа W UMa

В данной главе приведены результаты долговременного фотометрического и спектрального исследования затменной переменной звезды AM Leo, являющейся маломассивной контактной тесной двойной системой типа W UMa. А также результаты долговременного фотометрического исследования новой затменной переменной звезды GSC 3599-2569, открытой при непосредственном участии автора, оказавшейся также контактной тесной двойной системой типа W UMa.

Следует отметить, что на момент начала исследования автором переменной звезды AM Leo фотометрические наблюдения проводились с достаточной регулярностью, в то время как спектральные данные системы были получены только три раза за все время наблюдений данной затменной. Причем одно из спектральных исследований было выполнено на фотографическом материале [187]. Имело место небольшое, но постоянное несоответствие между определениями величины q, получаемых из фотометрических и спектральных наблюдений, а именно, фотометрические значения qбыли меньше спектроскопических.

Еще одна проблема, отмеченная рядом авторов, это временные изменения кривых блеска AM Leo, выражающиеся в поднятии и опускании общего блеска системы, изменении глубин минимумов и появлении разновысокости максимумов блеска. Это может свидетельствовать об активности на поверхности компонентов данной контактной тесной двойной системы появлении и исчезновении ярких и темных областей (факелов, пятен).

Наряду с изменениями кривой блеска наблюдались изменения перио-

да системы. Предлагались различные гипотезы, объясняющие данное явление. Одной из причин изменения периода AM Leo сейчас принято считать наличие третьего тела в системе.

Данное исследование AM Leo было предпринято с целью определения значений параметров компонентов этой затменной переменной, удовлетворяющих как спектральным, так и фотометрическим данным, а также исследования характера изменений кривых блеска на долговременном интервале.

Долговременное исследование случайно открытой новой затменной переменной звезды GSC 3599-2569, оказавшейся тесной двойной системой типа W UMa, было предпринято с целью получения значений параметров системы. А также проследить присущие звездам данного типа изменения кривой блеска с целью сопоставления характера таких вариаций с аналогичными явлениями, наблюдающимися у исследованных систем.

В разделе 4.1 приведены основные сведения о системах типа W UMa и TДC AM Leo в частности. Раздел 4.2 посвящен спектрофотометрическому исследованию AM Leo. В разделе 4.3 приводятся параметры системы AM Leo в том числе конфигурация пятен на поверхности компонентов, найденные на основе трехмесячного фотометрического исследования системы автором. Раздел 4.4 посвящен исследованию изменения периода системы. В разделе 4.5 приводятся результаты исследования долговременных малоамплитудных циклических изменений общего внезатменного блеска и периода AM Leo, вызванных изменением магнитного поля системы. Раздел 4.6 посвящен аналогичному исследованию новой переменной звезды типа W UMa GSC 3599-2569. В разделе 4.7 обсуждаются результаты данных исследований.

 Gorda S. Yu., Lyaptsev A. P. and Sobolev A. M. Spot activity of the new W UMa-type variable GSC3599-2569 // Astrophysical Bulletin. — 2015.
 – V. 70. – Pp. 109-116.

- Gorda S. Yu. Spectrometric and photometric study of the eclipsing variable AM Leo // Astrophysical Bulletin. 2016. V. 71. Pp. 64-74.
- Gorda S. Yu., Matveeva E. A. New Light-Time Curve of Eclipsing Binary AM Leo. // Information Bulletin on Variable Stars. - 2017. - № 6227. - Pp. 1-6.
- Горда С. Ю. Цикличность изменений внезатменного блеска и периода тесной двойной системы типа W UMa AM Leo. // Астрономический Журнал. — 2020. — Т. 97. — С. 924-938.
- Gorda S. and Vatolin Y. Possible Periodic Spot Activity of the New W UMa-type Variable GSC 3599-2569. // Peremennye Zvezdy (Variable Stars). - 2021.- V. 41. - Pp. 19-26.

4.1. Некоторые сведения о системах типа W UMa и AM Leo в частности

4.1.1. Современное представление о системах типа W UMa

Уже более сорока лет, начиная с пионерских работ Льюси, Бьерна, Томаса, Шу и др. [188–195], считается, что компоненты ТДС данного типа, имеющие разные массы, окружены общей оптически толстой конвективной газовой оболочкой, прогретой до температуры, близкой к температуре более массивного и горячего компонента. На этот факт указывает практически одинаковая глубина обоих минимумов на кривых блеска таких звезд. Газовую оболочку, окружающую оба компонента, иногда интерпретируют, как общую фотосферу компонентов. Средний возраст этих контактных короткопериодических ТДС, имеющих массы компонентов порядка Солнечной, составляет ~ $5.5 \cdot 10^9$ лет [196]. Оценка времени жизни систем в контактной стадии типа W UMa по данным тех же авторов составляет порядка ~ $1.6 \cdot 10^9$ лет. При этом определенная часть таких систем имеют несколько меньший возраст ~ $0.6 \cdot 10^9$ лет [196]. По-видимому, это связано с различными сценариями образования таких систем, поскольку около 50% из них являются тройными (имеют третье тело) или кратными [197]. Формирование таких систем происходит либо под влиянием наличия третьего тела (эффект Козаи) [198], либо посредством потери углового момента при истечении магнитного звездного ветра [199, 200].

Наблюдения показывают, что кривые блеска ТДС типа W UMa в определенной степени меняются от цикла к циклу. Изменения в основном связаны с увеличением или уменьшением на величину порядка нескольких сотых звездной величины блеска в максимумах или минимумах кривых блеска [201]. Иногда, когда понижение или увеличение блеска в максимуах и минимумах происходит (синхронно) одновременно, создается эффект небольшого повышения или ослабления общего блеска системы.

Эти эффекты в настоящее время объясняются несколькими причинами. Основная и первая из предложенных еще в 1975 году Малланом [30], - это наличие холодных или горячих пятен на поверхности главного или вторичного компонентов см., например, [201–203]. Тем более, что у некоторых звезд типа W UMa обнаружена хромосферная активность [204–206]. Вместе с тем считается, что подобные эффекты на кривых блеска может производить процесс неравномерного прогрева локальных областей общей конвективной оболочки в районе точки L_1 , т.н. «шейки», при перетекании вещества с одного компонента на другой, происходящего под общей оболочкой [207], либо ее разогрева и раширения [208,209]. Этот процесс может носить циклический характер [210]. Наличие значительного магнитного поля конвективных компонентов может влиять на квадрупольный гравитационный момент и приводить также к небольшим периодическим изменениям периода системы [195,210,211].

Исследование эффекта небольших вариаций кривых блеска некоторых контактных систем проводилось ранее [208, 209, 212], но если исследование вариаций периода проводилось на достаточно регулярном материале, полученном на значительном промежутке времени (использовались моменты минимумов), то полные кривые блеска так часто и долго, как правило, не наблюдались. Вместе с тем, необходимость проведения долговременных рядов фотометрических наблюдений ТДС типа W UMa и последующего анализа полученных данных вытекает из насущной необходимости, отбора конкретных теоретических моделей, из числа предложенных в статьях различных авторов, наиболее адекватно описывающих наблюдаемые изменения кривых блеска, периода, а также эволюцию таких систем.

4.1.2. Сведения о системе АМ Leo

Затменно-переменная звезда AM Leo (BD +10°2234A) является ярким компонентом ($V = 9.1^m - 9.7^m$) визуально двойной системы ADS 8024 (WDS11022+0954) ($\rho = 11.4''$, $\theta = 270^\circ$). Визуальный компонет (BD +10.2234B) слабее AM Leo в максимуме ее блеска на 1.48^m в V цвете [213]. Спектральный класс AM Leo был определен Хиллом и др. [187], как F8 V.

Переменность яркого компонента ADS 8024 (AM Leo) была открыта Хоффмейстером [214] в 1935г. Первая фотоэлектрическая кривая блеска получена в 1956г. Уорли и Эггеном [215]. Они же определили фотометрические элементы переменной и классифицировали ее как затменную систему типа W UMa ($P = 0.3658^d$). За прошедшее время переменная неоднократно исследовалась фотометрически, были получены многочисленные кривые блеска с помощью фотоэлектрических приемников излучения. Обстоятельный обзор фотометрических наблюдений AM Leo приведен в работах Хиллера и др. [213] и Альбайрака и др. [216].

Многие авторы отмечают изменения кривых блеска AM Leo, выражающиеся в поднятии и опускании общего блеска системы, изменении глубин минимумов и появлении разновысокости максимумов блеска, так называемый эффект О'Коннелла. Эти явления на кривых блеска наблюдались на временах от одного дня до нескольких месяцев [217,218]. Вместе с тем,

иногда, в течение одного - трех месяцев кривая блеска АМ Leo может быть достаточно стабильной, иметь одинаковую высоту максимумов блеска [201] или показывать локальные изменения блеска на отдельных фазах на протяжении одной - двух ночей. Такое поведение кривой блеска AM Leo, возможно, объясняется тем фактом, что компоненты этой контактной системы типа W UMa имеют близкое к пограничному между подтипами A и W отношение масс $q \simeq 0.45$ и в течение определенных промежутков времени система относится то к подтипу A, то к подтипу W [219]. Известно, что изменения на кривых блеска более значимо проявляются у систем, относящихся к подтипу W [220, 221], когда в главном, более глубоком минимуме при затмении менее массивного компонента наблюдается полное затмение. Это может соответствовать либо тому, что менее массивный, имеющий меньшие размеры компонент, по каким-то причинам, становится немного более горячим, либо, что более вероятно, более массивный главный компонент покрыт значительным числом холодных пятен. Впервые возможность реализации второго варианта была предложена еще в 1975 году в работе Маллана [30].

Наблюдаемые изменения кривых блеска могут свидетельствовать об активности на поверхности компонентов этой контактной тесной двойной системы - появлении и исчезновении ярких и темных областей (пятен). Тем более, что у системы зарегистрировано очень слабое рентгеновское излучение [206], которое является индикатором хромосферной и корональной активности.

Наряду с изменениями кривой блеска наблюдаются изменения периода системы. Ранее предлагались различные гипотезы, объясняющие данное явление [213, 222]. Наиболее вероятной причиной изменения периода AM Leo, как сейчас принято считать, является наличие третьего тела в системе. Это предположение впервые было рассмотрено в работах [218, 222]. Позднее Альбайраком и др. [216] на основе анализа моментов минимумов, полученных исключительно с помощью фотоэлектронных приемников излучения, было найдено значение периода взаимного обращения AM Leo и третьего тела по орбите, составляющее 45 лет, получена оценка массы третьего тела $M_3 = 0.18 M_{\odot}$.

Следует отметить, что исследование изменения периода AM Leo частотным методом, проведенное в начале 2000 годов Ли и др. [210], показало наличие двух максимумов на кривой спектра мощности, соответствующих периодам порядка 37 и 10 лет. Причем первый период, соответствующий максимуму, по мощности значительно превосходящему второй максимум, можно смело отнести к орбитальному периоду третьего тела. Второй, существенно меньший максимум спектра мощности, возможно, сответствует небольшим изменениям периода системы, природа которых связана с магнитным полем конвективных компонентов (магнитное торможение, эффект Эплгейта), или с периодическим переносом вещества от компонента к компоненту (тепловые осциляции).

4.2. Спектрофотометрия АМ Leo

4.2.1. Наблюдения и предварительная обработка

Спектральные наблюдения AM Leo были проведены в течение трех периодов (апрель 2013г., январь - март 2014г. и январь - апрель 2015г.) на оптоволоконном эшелле-спектрометре высокого разрешения $R = 30\,000$ альт-азимутального телескопа (D = 1.21 м, F = 12.0 м) Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (см. раздел 2.2). Следует отметить, что получение на данной аппаратуре спектральных данных высокого разрешения короткопериодической затменной переменной AM Leo с достаточно высоким отношением сигнал-шум связано с определенными трудностями. С одной стороны, звезда имеет яркость менее 9^m, поэтому для получения спектральных данных с отношением сигнал-шум более 20 необходимы экспозиции порядка 20-30 минут. С другой стороны, время накопления сигнала более 15-20 минут приводит к значительному смещению спектральных линий вследствие эффекта Доплера из-за движения компонентов по взаимной орбите с периодом порядка 9 часов ($p = 0.^{d}3658$).

Поэтому в данном случае был выбран вариант получения спектров звезды с минимально возможными экспозициями, но в моменты времени, соответствующие одинаковым фотометрическим фазам. Последующее суммирование спектральных данных, полученных на одних и тех же фотометрических фазах, позволяет получить отдельные спектры с высоким отношением сигнал-шум. Конечно, при реализации такой методики накопление большого числа кадров спектра звезды, соответствующих одной и той же фотометрической фазе, удается не для всех значений фаз. Этому препятствует, например, плохая погода в нужный промежуток времени, низкое положение звезды над горизонтом, а также малое угловое расстояние между звездой и лунным диском. Есть и другие причины, например, непредвиденный сбой аппаратуры.

Первоначально методика была апробирована в 2013г. Тогда удалось получить только для одного значения фотометрической фазы три спектра AM Leo , а также по два спектра для нескольких значений фаз и несколько спектров для отдельных фаз. Для увеличения отношения сигнал-шум в отдельном спектре применялось бинирование отсчетов пикселов вдоль линии дисперсии (вдоль строк ПЗС-матрицы) на аппаратном уровне. Таким образом, результирующее разрешение составляло R = 15000.

Наблюдения 2014-2015гг. проводились с использованием оптоволокна большего диаметра, обеспечивающего разрешение $R = 15\,000$ без бинирования. Во время экспозиции гидирование осуществлялось в автоматическом режиме по программе посредством движения телескопа на малых скоростях. Все кадры спектра AM Leo были получены со временем накопления сигнала 20 минут.

Общая схема наблюдений была следующей. В начале каждого периода наблюдений производилось получение первичного ряда спектров AM Leo. Затем по мере возможности в другие ночи получались кадры спектров в моменты времени, соответствующие фазам первичного ряда. Если по каким то причинам не удавалось получить спектры в необходимые моменты времени, съемка производилась в произвольный момент времени с целью в дальнейшем получить дополнительные кадры спектров и для данной фотометрической фазы. Время начала экспозиции кадра, соответствующее определенной фотометрической фазе, выдерживалось с точностью ±5с, что соответствовало ошибке в значении фазы не более ±0.001 доли периода.

Всего за весь период наблюдений было получено 92 спектра AM Leo из них 18 спектров в 2013г., 4 - в 2014г. и 70 - в 2015г. Полный список полученных спектров приведен в работе автора [225].

В полученных порядках отдельного спектра AM Leo наиболее сильными являлись две линии бальмеровской серии водорода H_{α} и H_{β} . Остальные линии имели меньшие глубины и практически терялись на уровне шума. Среднее отношение сигнал/шум в отдельном спектре варьировалось в пределах 10-30 в зависимости от порядка. Окончательно для дальнейшей обработки было решено использовать только бленды линии H_{α} , расположенной в районе середины соответствующего порядка. В свою очередь, линия H_{β} располагалась на краях двух соседних порядков эшелле-спектра, где интенсивность спектра из-за инструментального эффекта понижена в 2.5-3 раза по сравнению с ее значением в середине порядка, соответствено, в этой области и значение отношения сигнал/шум было существенно меньше.

4.2.2. Кривые лучевых скоростей

Спектральные данные порядка эшелле спектра, содержащего линию H_{α} , полученные на одинаковых фотометрических фазах, суммировались с целью увеличения отношения сигнал/шум. При этом в шкалу длин волн каждого спектра вносилась поправка, соответствующая доплеровскому сдвигу шкалы в момент наблюдений из-за движения наблюдателя относительно Солнца. В результате из 92 отдельных спектральных порядков, содержащих линию H_{α} , были сформированы 22 суммарных спектра, объединенных из 2, 3, 4, 5 и 6 отдельных спектров. Для 12 спектров фазы оказались уникальны. Данные о полученных спектрах представлены в табл. 4.1, где во втором столбце находятся усредненные значения фотометрических фаз, а в предпоследнем и последнем столбцах - количество отдельных спектров, объединенных в один суммарный, и значение отношения сигнал/шум, соответствующее этому спектру. Вычисление фотометрических фаз производилось по эфемеридной формуле, приведенной ниже, в разделе 4.3.

Разделение бленд линии H_{α} проводилось классическим методом аппроксимации их суммой гауссиан с применением нелинейного метода наименьших квадратов Марквардта. На рис.4.1 приведены примеры разделения линии H_{α} в спектрах разных степеней суммирования в фазах, близких к квадратуре (слева), и в фазах, близких к затмению (справа), когда профилии линий отдельных компонентов AM Leo значительно перекрывались. После разделения профилей были определены лучевые скорости обоих компонентов. Значения лучевых скоростей компонентов и формальные оценки их погрешностей, полученные в процессе апроксимации профилей методом Марквардта, приведены в 3 – 6 столбцах табл. 4.1.

Аппроксимация полученных значений лучевых скоростей компонен-

Год	Фаза,	V_{r1}	σ_1	V_{r2}	σ_2	n	S/N
	φ	$\mathrm{KM} \cdot c^{-1}$	$\mathrm{KM} \cdot c^{-1}$	$\mathrm{KM} \cdot c^{-1}$	$\mathrm{KM} \cdot c^{-1}$		
2013	0.8354	-117.5	9.8	188.2	12.2	3	42
	0.2186	82.5	9.4	-238.5	10.2	2	33
	0.6587	-109.5	23.2	192.1	23.1	2	32
	0.7196	-114.0	10.6	228.9	13.1	2	35
	0.7602	-127.3	11.7	224.5	16.2	2	37
	0.8899	-95.1	16.0	126.5	22.7	1	28
	0.1676	68.3	8.8	-228.3	6.3	1	24
	0.6974	-111.1	15.9	201.8	22.8	1	27
	0.3773	65.6	8.7	-190.5	7.2	1	23
	0.9291	-72.3	25.1	74.0	29.1	1	23
	0.2571	89.6	12.3	-246.9	10.3	1	30
2014	0.5698	-61.7	17.4	102.8	16.9	1	22
	0.2147	90.8	10.0	-243.1	15.5	1	21
	0.8441	-88.0	11.9	184.0	17.4	1	24
	0.9071	-67.2	16.0	139.3	16.4	1	17
2015	0.2891	85.0	2.7	-257.1	2.5	6	82
	0.3287	80.4	2.6	-242.1	2.7	6	97
	0.3701	64.5	4.6	-200.5	4.4	5	61
	0.2496	94.0	2.8	-260.0	2.5	5	74
	0.4094	56.5	7.1	-155.5	9.8	5	64
	0.4410	29.7	8.4	-98.2	9.4	5	63
	0.1169	48.0	4.6	-196.4	5.5	4	74
	0.1565	77.8	2.7	-226.6	3.2	4	74
	0.8302	-98.1	4.5	224.4	6.5	4	54
	0.1961	86.4	2.7	-242.4	2.7	4	63
	0.7662	-111.0	4.3	236.2	5.3	4	44
	0.8696	-79.9	6.2	180.4	9.1	3	48
	0.7256	-109.6	4.1	250.0	4.6	3	49
	0.6859	-104.6	4.0	232.2	5.2	3	44
	0.8164	-103.0	4.1	223.0	5.4	2	38
	0.8559	-97.1	7.1	198.2	9.3	2	39
	0.7739	-107.7	5.5	242.7	6.1	2	38
	0.1479	70.8	15.5	-230.7	15.5	1	18
	0.6769	-105.1	8.7	216.9	9.6	1	23
	0.9081	-58.1	14.2	150.4	11.0	1	28

Таблица 4.1. Значения фаз суммарных спектров и лучевые скорости компонентов AM Leo



Рис. 4.1. Примеры аппроксимации профилей линии H_{α} суммой гауссиан. Сплошная линия - суммарный профиль, штриховая - профиль главного менее массивного компонента, штрих-пунктирная - профиль вторичного более массивного компонента. Числа в правом верхнем углу графиков количество отдельных спектров, объединенных в суммарный спектр.



Рис. 4.2. Кривые лучевых скоростей компонентов AM Leo (сплошная линия - более массивный компонент, пунктирная - менее массивный), полученные по данным ПЗС-наблюдений автора. Кружками показаны лучевые скорости вторичного (более массивного) компонента, ромбами – главного (менее массивного)

тов с целью определения параметров кривых лучевых скоростей осуществлялась функцией синус, т.к. тесная двойная AM Leo является контактной системой с круговыми орбитами компонентов. Полученные кривые лучевых скоростей компонентов приведены на рис. 4.2, а соответствующие им значения параметров V₀, K₁, K₂ — в четвертом столбце табл.4.2.

Для сравнения во втором и третьем столбцах приведены значения тех же параметров, полученные ранее Хривнаком [223] и Прибуллой и др. [224]. При этом значения параметров во втором столбце таблицы, промаркированные знаком «~», являются оценочной оцифровкой, полученной со шкал рисунка, приведенного в работе Хривнака [223], поскольку данные в цифровом виде в его работе не приведены.



Рис. 4.3. Кривые лучевых скоростей компонентов AM Leo, полученные по данным ПЗС-наблюдений (сплошная линия - более массивный компонент, пунктирная - менее массивный. Заполненные значки - данные автора, незаполненные - данные из работы [224]. Кружками показаны лучевые скорости вторичного (более массивного) компонента, ромбами - главного (менее массивного)

Следует отметить, что полученное на основе спектральных данных автора значение q = 0.412 оказалось несколько меньше определений Хривнака [223] и Прибуллы и др. [224], но хорошо укладывается в интервал значений, полученных из решений кривых блеска автора методом синтеза (см.ниже).

Причина некоторого расхождения полученного автором значения q со значениями двух других спектральных исследований заключается в уменьшенном почти на 10 км/с значении полуамплитуды кривой лучевых скоростей K_1 массивного компонента AM Leo (см. табл. 4.3). Для выяснения причины заниженного значения K_1 наши значения лучевых скоростей были объединены с данными из работы Прибуллы и др. [224]. На рис. 4.3, где приведены графики лучевых скоростей, построенные по объединенным данным, можно видеть, что для компонента малой массы значения лучевых скоростей, полученные по тем и другим данным, практически совпадают. Для более массивного компонента значения лучевых скоростей на фазах после второго минимума ($\varphi = 0.6 - 0.9$), полученные автором и приведенные в работе Прибуллы и др. [224], также совпадают. В то же время на фазах в районе первой квадратуры ($\varphi = 0.1 - 0.4$) значения лучевых скоростей более массивного компонента АМ Leo, полученные автором, систематически ниже на ~ 10 – 15 км/с значений лучевых скоростей из работы Прибуллы и др. [224]. Немного заниженные значения измеренной нами лучевой скорости массивного компонента в фазах первой квадратуры относительно ранее опубликованных данных можно объяснить смещением центра эффективной яркости компонента относительно его видимого геометрического центра, совпадающего с центром масс, из-за возможного наличия на его поверхности темных или светлых областей (пятен) во время наших или наблюдений Прибуллы и др. [224]. Как отмечего выше, наличие пятен на поверхности компонентов звезд типа W UMa - это вполне обоснованное предположение. Более значительное влияние пятенной структуры, вероятно присутствовавшей на поверхности компонента, на определение его лучевой скорости по данным автора, чем по данным из работ [223, 224] можно объяснить тем фактом, что автор определял скорости по профилям линии H_{α} ($\lambda = 6563 A^{o}$), в которой эффекты хромосферно-фотосферной активности проявляются в наиболее заметной форме, в то время как лучевые скорости, приведенные в работе [224], определялись по области спектра в районе $\lambda = 5180 \, A^o$.

Поскольку кривые лучевых скоростей, полученные из наблюдений автора и данных работы [224] практически совпадают, были найдены еще и параметры кривых лучевых скоростей по объединенным данным. На

Таблица 4.2. Параметры кривых лучевых скоростей и компонентов AM Leo. Обозначения: ПЗС(ПЗ) — матрица прямой засветки (Front Illumination), ПЗС(ОЗ) — матрица обратной засветки (Back Illumination).

	Ретикон	ПЗС(ПЗ)	ПЗС(ОЗ)	ПЗС	
	Hrivnak [223]	Pribulla [224]	Gorda [225]	[224] + [225]	
$V_0\left(\mathrm{KM}{\cdot}c^{-1} ight)$	~ 5	-7.25 ± 0.62	-12.1 ± 1.5	-9.4 ± 1.0	
$K_1 \left(\kappa_M \cdot c^{-1} \right)$	~ 115	115.56 ± 0.97	103.9 ± 1.5	110.2 ± 1.2	
$K_2 \left(\kappa_M \cdot c^{-1} \right)$	~ 255	251.98 ± 1.17	252.0 ± 2.5	250.3 ± 1.2	
Р(сутки)	0.365	0.3658	0.3658	0.3658	
$\sigma_1 \left({ m Km} {\cdot} c^{-1} ight)$	~ 25	7.0	9.2	8.9	
$\sigma_2 \left(\mathrm{KM} \cdot c^{-1} ight)$	~ 25	4.3	15.0	9.4	
$M_{1}\sin^{3}i\left(M_{\odot} ight)$	1.38	1.29 ± 0.04	1.21 ± 0.08	1.24	
$M_2 \sin^3 i \left(M_\odot ight)$	0.62	0.59 ± 0.02	0.50 ± 0.10	0.54	
$(a_1 + a_2)\sin i \left(R_\odot\right)$	~ 2.7	2.68 ± 0.06	2.59 ± 0.08	2.64 ± 0.06	
$q = M_2/M_1$	0.45 ± 0.01	0.459 ± 0.004	0.412 ± 0.008	0.439 ± 0.005	

рис.4.3 показан результат аппроксимации в графическом виде, а в последнем столбце табл. 4.2 приведены значения найденных параметров. Полученное в данном случае значение q = 0.439 в пределах ошибок мало отличается от значений этого параметра из работ [223, 224].

4.3. Параметры системы AM Leo, найденные по фотометрическим наблюдениям 2015г

Фотометрические ПЗС-наблюдения AM Leo проводятся автором с марта 2007 года на телескопе-рефлекторе A3T-3 (D = 0.45 м, $F_{\text{Newton}} = 2.0$ м), оснащенным ПЗС-камерой A230 FLI с чипом E2V, CCD230-42 Back Illuminated (2048 × 2048, 15мкм). Поскольку основная масса спектров AM Leo была получена весной 2015 г. и параллельно в течение 6-ти ночей февраля - марта 2015 года были проведены фотометрические наблюдения AM Leo, представляло интерес сравнить результаты фотометрического и спектрального исследований.

Наблюдения выполнялись в фильтрах BVR, реализующих систему, близкую к системе Джонсона-Кузинса. После предварительной калибровки кадров (вычитания темнового кадра и деления на кадр плоского поля) проводилась апертурная фотометрия всех полученных кадров с использованием программы *Muniwin* (http://c-munipack.sourceforge.net). Разности блеска определялись относительно звезды BD +10°2235, которая тоже является визуально-двойной с разделением 13.3″ и практически во всех исследованиях AM Leo использовалась как звезда сравнения. При проведении фотометрии измерялся суммарный блеск обех звезд пары, как при измерении блеска AM Leo (ADS 8024), так и при измерении блеска звезды сравнения. Таким образом, в апертуру одновременно помещались обе звезды этих визуальных пар. Всего было получено 623, 624 и 625 величин разности блеска в B, V и R фильтрах, соответственно.

В каждую из ночей наблюдался хотя бы один из минимумов блеска AM Leo. Значения всех полученных моментов минимумов, а также дат наблюдений и граничные значения фотометрических фаз, в пределах которых были произведены наблюдения в эти ночи, приведены в табл. 4.3. На основе полученных моментов минимумов была вычислена следующая эфемеридная формула:

$$JD_{\odot}Imin = 2457079.20661 + 0.^{d}3658005 \cdot E.$$

$$\pm 30 \qquad \pm 44$$

Значения фотометрических фаз, как для фотометрических наблюдений, так и для спектральных были вычислены на основе данной эфемеридной формулы, полученной на эпоху этих наблюдений.

Построенные на основе этих данных кривые блеска AM Leo в трех фильтрах приведены на рис. 4.3 (верхняя панель). Можно заметить, что имеется заметный разброс значений разностей блеска, полученных в различные даты. Причем величина разброса максимальна при наблюдении в

Дата	Фильтр	Тип	JD_{\odot} min	$\overline{JD_{\odot}}$ min
$(\Delta arphi)$		минимума	2457000 +	2457000 +
25.02.2015	В	II	79.39007	
(0.26 - 0.57)	V	II	79.38963	$79.38972\ {\pm}0.00031$
	R	II	79.38946	
17.03.2015	В	Ι	99.32562	
(0.84 - 0.25)	V	Ι	99.32589	99.32576 ± 0.00014
	R	Ι	99.32576	
18.03.2015	В	II	100.23981	
(0.30 - 0.83)	V	II	100.24002	100.23994 ± 0.00011
	R	II	100.23999	
19.03.2015	В	II	101.33655	
(0.12 - 0.82)	V	II	101.33713	101.33706 ± 0.00048
	R	II	101.33751	
26.03.2015	В	II	108.28772	
(0.21 - 0.95)	V	II	108.28795	$108.28768\ {\pm}0.00029$
	R	II	108.28737	
31.03.2015	В	Ι	113.22644	
(0.93 - 0.58)	V	Ι	113.22706	113.22655 ± 0.00047
	R	Ι	113.22614	
	В	II	113.40868	
	V	II	113.40867	113.40889 ± 0.00037
	R	II	113.40931	

Таблица 4.3. Даты наблюдений, интервалы фотометрических фаз и моменты минимумов AM Leo
синей области спектра - фильтр В. В длинноволновой области (фильтр R) разброс от даты к дате минимален. Особенно это заметно на фазах второй квадратуры. Такое поведение кривых блеска свидетельствует об изменении поверхностной яркости одного или обоих компонентов. Причиной такого изменения может быть наличие ярких или темных пятен на поверхности компонентов. Это предположение высказывалось ранее в предыдущем параграфе для объяснения заниженного значения полуамплитуды изменения лучевой скорости массивного компонента относительно данных других авторов.

Кривые блеска, полученные в две последовательные даты JD = 2457099 (17.03.2015) и JD = 2457100 (18.03.2015), смещены по отношению к кривым блеска других дат на одну и ту же величину, т.е. звезда в эти даты имела несколько больший блеск, чем в другие, по крайней мере на зарегистрированных значениях фотометрических фаз. Причем смещение больше в синем фильтре и минимально в красном. В эти ночи в фильтре В звезда была в среднем ярче на 0.020^m , в фильтре V на 0.015^m , в фильтре R на 0.008^m . В тоже время в последующую дату JD = 2457101 (19.03.2015) увеличение блеска наблюдалось только на фазах вблизи второй квадратуры ($\varphi = 0.60 - 0.80$). Разности блеска на других фазах ($\varphi = 0.12 - 0.60$) совпадали с данными других ночей.

Объяснение описанных выше явлений для звезд типа W UMa обычно производится в рамках пятенной модели. Увеличение площади темных пятен приводит к падению общего блеска системы и наоборот. Аналогично поярчание можно объяснить наличием горячих, ярких пятен. Так в работах [203,207,212] построением соответствующей пятенной модели объясняются небольшие искажения на кривых блеска звезд типа W UMa, а также поднятие или опускание общего блеска систем, выражающиеся в сдвигах кривых блеска по оси звездных величин.

Для определения параметров АМ Leo были сформированы кривые



Рис. 4.4. а) Кривые блеска AM Leo в трех фильтрах, полученные в течение 6 ночей 2015г.(верхняя панель); b) кривые блеска после проведения процедуры корректировки — заполненные кружки. Незаполненными кружками отмечены значения разностей блеска в интервале фаз 0.6—0.8, полученные в ночь на 19.03.15. Сплошными линиями показаны синтетические кривые блеска, аппроксимирующие данные этой ночи (нижняя панель).

блеска с использованием данных всех полученных ночей. Для этого в кривые блеска, полученные в даты JD = 2457099 (17.03.2015) и JD = 2457100(18.03.2015) были внесены аддитивные поправки, соответствующие значениям сдвигов этих кривых блеска относительно данных других ночей, приведенные выше. После проведения данной операции разброс точек на кривых блеска существенно уменьшился. Величина среднеквадратической ошибки разброса точек на кривых блеска во всех фильтрах составила не более $\pm 0.007^m$. Скорректированные кривые блеска приведены на рис. 4.3 (нижняя панель). Видно, что суммарные кривые блеска AM Leo достаточно гладкие, без резких выбросов, исключение составили разности блеска, полученные в дату JD = 2457101 (19.03.2015) на фазах $\varphi = 0.6 - 0.8$, они располагались систематически выше кривых блеска. При определении параметров компонентов AM Leo выскакивающие разности блеска в дату JD = 2457101 (19.03.2015) на фазах $\varphi = 0.6 - 0.8$ не учитывались.

Определение элементов орбиты и физических параметров компонентов затменной системы проводилось в пакете *PHOEBE* [111] с одновременным использованием данных, полученных во всех трех фильтрах. При этом отношение масс компонентов и расстояние между центрами компонент были взяты из данных обработки кривых лучевых скоростей, см. табл.4.2 предыдущего параграфа.

Параметры системы искались в классе решений для контактных систем типа W UMa. В качестве начальных значений искомых параметров были взяты данные решения кривых блеска AM Leo из работы Хиллера и др. [213]. При определении параметров системы вводился блеск т.н. третьего тела, поскольку при фотометрии AM Leo ее блеск измерялся совместно с блеском визуального компонента, начальное значение которого соответствовало измеренной разности блеска звезд пары, приведенного выше. Для учета небольшой разновысокости максимумов кривых блеска вводились параметры горячего пятна на более массивном компоненте на долготе,

параметр	значение	параметр	значение
i	$89^{\circ}.0 \pm 0^{\circ}.5$	q	0.44 ± 0.01
$a(R_{\odot})$	2.6	Ω	2.699 ± 0.027
r_1^{pole}	0.302 ± 0.009	$\Omega(L_1)$	2.760 ± 0.025
r_1^{side}	0.316 ± 0.008	$\Omega(L_2)$	2.493 ± 0.024
r_1^{back}	0.357 ± 0.010	f	22.5%
r_2^{pole}	0.436 ± 0.006	$T_1^{eff}(K)$	6273 ± 70
r_2^{side}	0.467 ± 0.007	$T_2^{eff}(K)$	5942 ± 80
r_2^{back}	0.499 ± 0.08	L_1	0.243
$R_1(R_\odot)$	0.85 ± 0.07	L_2	0.457
$R_2(R_\odot)$	1.22 ± 0.09	l_3	0.300
$M_1(M_{\odot})$	0.54 ± 0.07	M_1^{bol}	4.78 ± 0.05
$M_2(M_{\odot})$	1.23 ± 0.08	M_2^{bol}	4.23 ± 0.06

Таблица 4.4. Параметры фотометрической орбиты и компонентов АМ Leo

соответствующей фазе $\varphi = 0.75$.

Найденные в процессе решения параметры компонентов AM Leo приведены в табл. 4.4. Здесь индексом 1 отмечены параметры главного, менее массивного, компонента. Нилучшее решение получилось при задании значения q = 0.44, соответствующего параметрам кривых лучевых скоростей, полученным по объединенным спектральным данным, см. последний столбец табл. 4.2. Качество полученного решения получилось достаточно хорошее. Среднеквадратические значения разброса значений O - C равны $\pm 0.010^m$, $\pm 0.005^m$ и $\pm 0.007^m$ в B, V и R фильтрах, соответственно.

Параметры и местоположение горячего пятна на поверхности более массивного компонента, моделирующего разновысокость максимумов кривых блеска, приведены в первой строке табл. 4.5. Здесь φ – широта центра пятна, отсчитываемая от полюса звезды; λ – долгота центра пятна, отсчитываемая от полюса звезды; λ – долгота центра пятна, отсчитываемая от направления на центры компонентов против часовой стрелки; r – радиус пятна; T_s/T_f - отношение эффективных температур пятна и

N	$arphi^{\circ}$	λ°	r°	T_s/T_f
1	80	90	10	1.20
2	80	132	16	1.25

Таблица 4.5. Параметры пятенной структуры поверхности вторичного компонента.

поверхности звезды.

Для проведения моделирования кривой блеска, полученной в дату JD = 2457101 (19.03.2015), на которой присутствует заметное повышение блеска на фазах в районе второй квадратуры, параметры AM Leo, найденные по всем полученным кривым блеска, кроме параметров, описывающих пятно, были зафиксированы. Для моделирования повышенного блеска в данных этой ночи на соответствующих фазах были введены начальные параметры еще одного горячего пятна. Полученная в данном случае модель двух горячих пятен на поверхности более массивного компонента, параметры которой приведены в табл. 4.5, хорошо описывает наблюдательные данные, что можно видеть на рис. 4.3 (нижняя панель). Синтетические кривые блеска, показанные непрерывными линиями, проходят практически точно по наблюдательным точкам во всех фильтрах.

Таким образом, на кратковременных интервалах наблюдений изменения на кривых блеска AM Leo можно с успехом моделировать конкретной пятенной структурой, присутствующей на поверхности компонентов, как это делается для звезд данного типа, см., например, [203, 207, 212].

4.4. Изменение периода АМ Leo

Как отмечено выше (см. раздел 4.2.1) в работе Альбайрака и др. [216] 2005 года были впервые найдены элементы орбиты AM Leo относительно третьего тела. При вычислении этих значений использовались моменты минимумов, распределенные на интервале времени превышающем, найденное значение периода всего в 1.1 раза. В настоящий момент этот интервал составляет уже 1.4 значения периода и данные распределены по нему достаточно равномерно. Со времени выхода статьи [216] в литературе появилось большое число новых значений моментов минимумов AM Leo. Значения разностей O - C, вычисленные на основе новых значений минимумов уже не соответствуют световой кривой, полученной работе Альбайрака и др. [216].

Автором за период с 1996 по 2017гг. было получено 72 значения момента минимумов AM Leo. Данные были получены при наблюдениях в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ на телескопе рефлекторе (D = 0.45 м), оснащенном электрофотометром, размещенном в фокусе Кассегрена (F = 11.0 м), а также ПЗС-камерой, размещенной в фокусе Ньютона (F = 2.0 м) этого телескопа. Данные ПЗС-наблюдений обрабатывались в пакетах MaxImDL и Muniwin. Моменты минимумов AM Leo определялись посредством аппроксимации участков минимумов параболой. Значения моментов минимумов, найденных по нашим наблюдательным данным приведены в табл. 4.6. Здесь приведены значения, усредненные по всем фильтрам в которых проводились наблюдения в соответствующую ночь. Обозначения в колонках, названных как «Приемн.», соответствуют применявшемуся при наблюдениях приемнику излучения:

- РЕ Сканирующий электрофотометр (сейчас не используется);
- CCD1 ПЗС-камера Alta-U6 фирмы Apogee (ПЗС-матрица Kodak KAF-1001E, 1048х1048, 24-мкм);
- ССD2 ПЗС-камера PL230 фирмы FLI (ПЗС-матрица e2v CCD230-42-1-143, 2048х2048, 15-мкм).

Еще семь значений минимумов, полученных автором в 2015 году, опубликованы в работе [225].

Моменты мин.	σ	Тип	Фильтр	приемн.	Моменты	σ	Тип	Фильтр	Приемн.
HJD 2400000 $+$	±	мин.			HJD 2400000 $+$	±	мин.		
50106.54068	0.00061	II	BV	PE	55594.43435	0.00031	Ι	BVR	CCD1
50142.39120	0.00205	II	BV	PE	55617.48019	0.00005	Ι	BVR	CCD1
50156.29112	0.00041	II	BV	PE	55623.33233	0.00084	Ι	BVR	CCD1
50156.47572	0.00061	Ι	BV	PE	55625.34501	0.00033	II	BVR	CCD1
50157.38869	0.00054	II	BV	PE	55630.46622	0.00040	II	BVR	CCD1
50159.21672	0.00085	II	BV	PE	55659.36320	0.00114	II	BVR	CCD1
50159.40102	0.00050	Ι	BV	PE	55679.30038	0.00026	Ι	BVR	CCD1
50168.36193	0.00025	II	BV	\mathbf{PE}	55953.46636	0.00011	II	BVR	CCD1
50169.27776	0.00015	Ι	BV	\mathbf{PE}	55958.40439	0.00029	Ι	BVR	CCD1
53066.40291	0.00052	Ι	BV	\mathbf{PE}	55960.41672	0.00017	II	BVR	CCD1
53090.36297	0.00013	II	BV	\mathbf{PE}	55973.40238	0.00014	Ι	BVR	CCD1
53123.28460	0.00075	II	BV	\mathbf{PE}	55978.34052	0.00041	II	BVR	CCD1
54172.39374	0.00010	II	BVR	CCD1	56016.20116	0.00025	Ι	BVR	CCD1
54208.24196	0.00011	II	BVR	CCD1	56016.38267	0.00038	II	BVR	CCD1
54214.27804	0.00021	Ι	BVR	CCD1	56309.38667	0.00037	II	BVR	CCD1
54459.54551	0.00016	II	BVR	CCD1	56309.57155	0.00010	Ι	BVR	CCD
54475.45769	0.00021	Ι	BVR	CCD1	56365.35475	0.00035	II	BVR	CCD1
54497.40597	0.00012	Ι	BVR	CCD1	56366.26882	0.00012	Ι	BVR	CCD1
54537.46047	0.00005	II	BVR	CCD1	56385.29096	0.00026	Ι	BVR	CCD1
54552.27559	0.00043	Ι	BVR	CCD1	56386.38863	0.00093	Ι	BVR	CCD1
54571.29691	0.00025	Ι	BVR	CCD1	56400.28810	0.00008	Ι	BVR	CCD1
54578.24718	0.00033	Ι	BVR	CCD1	56412.36013	0.00015	Ι	BVR	CCD1
54586.29474	0.00027	Ι	BVR	CCD1	56710.30083	0.00005	II	BVR	CCD1
54825.52650	0.00015	Ι	BVR	CCD1	56710.48448	0.00030	Ι	BVR	CCD1
54882.40781	0.00027	II	BVR	CCD1	56770.29242	0.00032	II	BVR	CCD1
54887.52890	0.00031	II	BVR	CCD1	56742.30875	0.00016	Ι	BVR	CCD1
54888.44357	0.00011	Ι	BVR	CCD1	56751.27073	0.00046	II	BVR	CCD1
54909.29397	0.00041	Ι	BVR	CCD1	57458.35613	0.00020	II	BVR	CCD2
54923.19396	0.00026	Ι	BVR	CCD1	57459.27007	0.00009	Ι	BVR	CCD2
55217.47827	0.00013	II	BVR	CCD1	57463.29403	0.00008	Ι	BVR	CCD2
55218.57605	0.00023	II	BVR	CCD1	57463.47687	0.00018	II	BVR	CCD2
55223.51509	0.00016	Ι	BVR	CCD1	57822.32412	0.00014	II	BVR	CCD2
55246.37686	0.00021	II	BVR	CCD1	57827.26249	0.00008	Ι	BVR	CCD2
55281.31090	0.00013	II	BVR	CCD1	57828.36025	0.00015	Ι	BVR	CCD2
55288.26110	0.00034	II	BVR	CCD1	57829.27344	0.00010	II	BVR	CCD2
55570.47523	0.00105	II	BVR	CCD1	57835.31003	0.00015	Ι	BVR	CCD2

Таблица 4.6. Моменты минимумов АМ Leo, полученные автором.



Рис. 4.5. Световая кривая изменения периода ТДС АМ Leo (непрерывная линия); незаполненные кружки — величины O - C, вычисленные по значениям моментов минимумов из работы Альбайрака и др. [216]; незаполненные треугольники — значения O - C из статей IBVS [226]; незаполненные квадраты — величины O - C вычисленные из значений моментов минимумов, полученных автором (см. табл. 4.7)

Для вычисления разностей O-C и определения параметров световой кривой помимо данных автора были использованы данные из уже неоднократно упоминавшейся работы Альбайрака и др. [216], а также моменты минимумов AM Leo, опубликованные в IBVS за период с 2002 по 2017гг. (см. [226]). Значения параметров световой кривой были найдены методом аппроксимации, описанным в работе Горда и др. [106].

Апроксимационная световая кривая приведена на рис. 4.5. Значения параметров световых кривых, полученных Альбайраком и др. [216] и автором приведены в таб. 4.7. Обозначения в первой колонке таб. 4.7 соответствуют следующим параметрам: N — общее число использованных моментов минимумов; $\sum (O - C_{LTC})^2$ — значение минимума суммы квадратов разностей значений O - C и световой кривой; $JD_{\odot}I_{min}$ и P_{orb} — референс-

	Альбайрак :	и др. [216]	Горда и Мат	веева [226]
Параметр	Значение	$\pm \sigma$	Значение	$\pm \sigma$
Ν	103		243	
$\sum (O - C_{LTC})^2$	0.00020		0.00045	
$JD_{\odot}I_{min}$	2452397.35411	0.00006	2452397.35801	0.00009
P_{orb} (day)	0.365797425	0.000000007	0.365797590	0.000000008
$a\sin i$ (AU)	1.36	0.10	1.30	0.05
e	0.73	0.04	0.28	0.03
w (°)	22.0	3.0	20.6	2.8
T_0 (HJD)	2436346	70	2435320	50
P_{12} (year)	44.82	0.34	50.5	0.5
A (day)	0.0058	0.0003	0.0072	0.0008

Таблица 4.7. Параметры световой кривой AM Leo, по данным всех известных моментов минимумов.

ная эпоха главного минимума и истинный период затменной переменной AM Leo; $a \sin i$ — проекция большой полуоси орбиты AM Leo с третьим телом, i — угол наклона орбиты; e — эксцентриситет орбиты; w — долгота периастра; T_0 — эпоха прохождения периастра и P_{12} — период обращения AM Leo по взаимной орбите с третьим телом; A — полуамплитуда световой кривой.

Как можно видеть значения только трех параметров орбиты AM Leo и третьего тела, а именно, e, T_0 и P_{12} значительно отличаются от полученных Альбайраком и др. [216]. Найденные нами значения можно рассматривать, как более достоверные на настоящий момент, т.к. они получены на основе большего числа наблюдательных данных, чем использовалось в работе [216]) и на интервале времени превышающем значение периода P_{12} в полтора раза.

В процессе проведения фотометрического мониторинга АМ Leo ав-

Дата	Фильтры	Тип минимума	$JD_o(\min)$
20.03.2018	BVR	II	$2458198.36330 \pm 0.00010$
06.02.2019	BVR	Ι	$2458521.54593 \pm 0.00026$
16.03.2019	BVR	II	$2458559.40552 \pm 0.00028$
05.04.2019	BVR	Ι	$2458579.34403 \pm 0.00015$
05.03.2020	BVR	Ι	$2458914.21227 \pm 0.00024$
20.03.2020	BVR	Ι	$2458932.33753 \pm 0.00033$
27.03.2020	BVR	Ι	$2458936.36127 \pm 0.00030$

Таблица 4.8. Значения новых моментов минимумов AM Leo

тором был получен массив значений моментов минимумов. Данные, полученные до 2018 года, приведены в работе Горды и Матвеевой [226] и в табл. 4.6. За последние три года были получены еще 7 значений моментов минимумов, приведенные в табл. 4.8

Как указывалось выше, в настоящее время причиной изменения периода AM Leo считается обращение ее по взаимной орбите с третьим телом. Период обращения составляет порядка 50-ти лет. Однако, если обратить внимание на распределение разностей O - C моментов минимумов, полученных за последние 20 лет, относительно световой кривой, приведенной на рис. 4.5, можно заметить их циклический характер. Это еще лучше видно на графике разностей O - C и световой кривой $(O - C)_{obs} - (O - C)_{teor}$, приведенном на рис. 4.6(a). Существование возможного второго цикла изменений периода АМ Leo отмечалось в работе Ли и др. [210] 2002-го года. Причинами явного проявления в последние годы малоамплитудной цикличности изменений периода AM Leo на кривой разностей *О*-*С*, вероятно, можно считать: а) повсеместное применении компьютеров в процессе автоматизации наблюдений, существенно упрощающих трудоемкий процесс наблюдений и увеличивающих плотность получения данных во времени; б) унификация параметров применяемых высокоточных панорамных светоприемников - ПЗС-матриц; в) использование единой системы привязки



Рис. 4.6. Разности значений O - C и световой кривой из работы [226]; а) для всех известных значений моментов минимумов; b) для моментов минимумов позднее JD 2450000; пунктирная линия - аппроксимационная синусоида.

времени компьютеров через сеть интернет. Действительно, как видно из графика, приведенного на рис. 4.6(а), плотность точек моментов минимумов, полученных в последние годы, существенно выше, а их относительный разброс меньше, чем в более ранние периоды наблюдений. Вместе с тем нельзя исключить вероятность того, что какой-то физический процесс, приводящий к небольшому циклическому изменению периода AM Leo, в последние годы существенно активизировался.

Для определения возможного значения периода были использованы

разности *O* – *C* моментов минимумов и световой кривой, полученные позднее даты JD 2451000, по которым явно прослеживается цикличность изменений относительно световой кривой.

Проверка на периодичность полученного нами ряда данных проводилась с использованием программы В.П. Горанского WINEFK, реализующей алгоритм Лафлера - Кинмана. Параметр $1/\theta(\varphi)$, большое значение которого является индикатором наличия периода, показал заметный, но достаточно широкий пик на частоте, соответствующей периоду $2838^d = 7^y.8$. Поскольку в полученных данных явно прослеживается только один период, с целью его уточнения была произведена аппроксимация данных гармонической функцией синус. Полученное в результате аппроксимации значение периода практически не изменилось — $2847^d = 7^y.8$. На рис. 4.6(b) в графическом виде приведен результат апроксимации.

Вероятной причиной таких малоамплитудных изменений периода данной системы может быть эффект Эпплгейта [211], основанный на взаимодействии квадрупольного углового момента с изменениями магнитного поля компонентов.

4.5. Малоамплитудные внезатменные изменения блеска AM Leo на долговременном промежутке, как проявления изменений магнитного поля компонентов

4.5.1. Долговременные изменения общего блеска системы

Фотометрические наблюдения AM Leo проводились автором в период с марта 2007 года по март 2018 года на телескопе-рефлекторе A3T-3 (D = 0.45 м, $F_{\text{Newton}} = 2.0$ м) и с февраля 2019 года по март 2020 на телескопе рефлекторе системы Риччи-Кретьена AstroSib (D = 0.5 м, F = 4.0 м) астрономической обсерватории Уральского федерального университета. При наблюдениях использовались фильтры BVR, реализующих систему, близкую к системе Джонсона-Казинса, с использованием ПЗСкамер Alta U6 фирмы Apogee с чипом Kodak KAF-1001E (1024 × 1024, 24 мкм) и с 2015 года PL A230 фирмы FLI с чипом E2V CCD230-42 (2048×2048, 15 мкм). Размеры рабочих полей составляли $35' \times 35'$ и $24' \times 24'$ на первом и втором телескопе, соответственно.

Всего было получено 80, 94 и 95 участков кривых блеска AM Leo в B, V и R фильтрах, соответственно. Уже с самых первых ПЗС наблюдений AM Leo, проведенных в 2007 году, было отмечено изменение кривых блеска от ночи к ночи, что присуще звездам этого типа. Характер таких изменений был описан выше, в разделе 4.1.1.

Исследование изменений общего блеска системы AM Leo, не связанных с явлениями затмений и эффектами приливных деформаций компонентов, проводилось с использованием метода, суть которого заключается в вычислении значения средней за ночь разности блеска между кривой (участка кривой) блеска, полученной в данную ночь, и реперной, теоретической кривой, синтезированной на основе достоверно установленных значений параметров затменной двойной системы.

В качестве теоретической кривой блеска AM Leo использовалась кривая, построенная на основе параметров приведенных в табл. 4.4. Кривая была синтезирована с помощью программы PHOEBE [111]. Были использованы данные ночей JD 2457100.3 (18.03.2015), JD 2457108.3 (26.03.2015), JD 24571138.3 (31.03.2015) и JD 2457832.3 (19.03.2017), поскольку кривые блеска, построенные на их основе, имели равновысокие максимумы и не меняющиеся значения глубин минимумов. Полученные для трех фильтров теоретические кривые являлись своеобразными нуль - пунктами, относительно которых определялись изменения блеска системы. Выбор значения нуль пункта в данном случае особого значения не имеет, т.к. цель всей процедуры - зарегистрировать временные, возможно циклические, изменения блеска малой амплитуды.



Рис. 4.7. Кривые блеска AM Leo, полученные в 2010 и 2013 годах. Сплошная линия — реперная кривая блеска

Вид фотометрических кривых блеска, по которым вычислялись реперные кривые во всех трех фильтрах, приведен на рис. 4.3(b). Можно отметить «ниточный» характер полученных из наблюдений кривых блеска в эти ночи. Разброс точек относительно реперных кривых не превышал значения $\pm 0.005^m$. В тоже время в другие моменты наблюдений, как правило, кривые блеска значительно менялись от ночи к ночи относительно теоретических кривых, см., например, на том же рисунке кривую, аппроксимирующую данные ночи 19.03.2015, незаполненные кружки. На рис. 4.7 приведены положения кривых блеска АМ Leo относительно теоретических кривых для двух сезонов наблюдений 2010 (январь - март, декабрь) и 2013 (январь - апрель) годов. Можно заметить значительное изменение положения наблюдательных кривых относительно теоретических, полученных по данным 2015 года. Разброс точек на суммарных кривых блеска порядка $0.02^m - 0.03^m$ обусловлен изменением кривых блеска от ночи к ночи в течение общего времени наблюдений в указанные периоды. Следует отметить, что в сезоны наблюдений 2010 и 2013 годов кривые блеска менялись

194

относительно мало, в другие сезоны изменения индивидуальных кривых блеска одна относительно другой достигали значений 0.05^m.

Всего было получено 73, 93 и 89 значений разностей между данными наблюдений и теоретическими реперными кривыми блеска $\delta m =$ $\Delta m_{obs} - \Delta m_{teor}$, где $\Delta m = m_{var} - m_{com}$ в B, V и R фильтрах, соответственно. Использовались данные только тех ночей, когда разброс точек на кривых блеска не превышал значений $\pm 0.02^m$, а также наблюдения продолжительностью более 2 часов, что соответствует длине полученного участка кривой блеска 0.2 доли периода AM Leo. Эти ограничения исключали из рассмотрения слишком плохие фотометрические данные или слишком короткие участки наблюдений, т.к. оценки разностей, определенные по ним, были бы недостаточно надежны. Полученные зависимости усредненных за ночь значений разностей блеска наблюденных кривых блеска от теоретических кривых в течение всего времени мониторинга для всех трех фильтров приведены на рис. 4.8. Значительный разброс точек на полученных зависимостях обусловлен тем, что в каждую отдельную ночь наблюдался только отдельный участок кривой блеска АМ Leo, по которому и определялась величина разности в эту ночь. Это значение может отличаться от аналогичного значения, определенного по всей кривой блеска. Например из-за того, что мы в данную ночь наблюдали компоненты системы только с одной стороны, на которой, к примеру, было меньшее количество пятен, чем на другой, из-за чего блеск системы был переоценен либо недооценен в зависимости от природы пятен - холодные или горячие. Идеальным в данном случае, было бы каждый раз определять разности блеска по полной кривой блеска каждую ночь. Но это было невозможно, т.к. на широте Коуровской обсерватории AM Leo находилась на высоте превышающей 30 градусов над горизонтом ограниченное, иногда достаточно малое по сравнению с периодом звезды, время. Поэтому получить полную кривую блеска AM Leo за одну ночь было в принципе невозможно, т.к. период звезды составляет по-



Рис. 4.8. Измененения общего, внезатменного блеска AM Leo со временем, $\delta m = \Delta m_{obs} - \Delta m_{teor}$.

рядка 9-ти часов, а максимально возможное время наблюдений звезды при $h \ge 30^{\circ}$, согласно значению ее склонения, не превышает 6 - 7 часов.

Тем не менее на полученных кривых изменения блеска AM Leo относительно реперной, теоретической кривой δm , во всех трех фильтрах хорошо просматриваются участки повышения и убывания общего блеска системы явно периодического характера, см. рис. 4.8. Как можно видеть на кривой, полученной в фильтре B, наряду с небольшими изменениями в сторону увеличения или уменьшения блеска просматривается тренд со вре-

196

Ν	Данные	JD максимума синусоиды	Период, сутки	Период, годы
1	Общий блеск	2456642 ± 170	2796 ± 65	7.7 ± 0.2
2	Блеск в максимумах	2456513 ± 35	2588 ± 70	7.2 ± 0.2
3	Блеск в минимумах	2456758 ± 44	2726 ± 71	7.5 ± 0.2
4	$\Delta(O-C)$	2456302 ± 235	2847 ± 88	7.8 ± 0.2
5	Средние значения	2456554 ± 195	2739 ± 112	7.6 ± 0.3

Таблица 4.9. Параметры циклического изменения блеска и малоамплитудных изменений периода AM Leo.

менем в сторону общего уменьшения блеска. Значительно меньший тренд в сторону увеличения блеска просматривается и в фильтре V. После устранения небольших линейных трендов данные, полученные во всех трех фильтрах, были объединены в один массив.

Проверка на периодичность полученного нами ряда данных проводилась с использованием программы В.П. Горанского WINEFK, реализующей алгоритм Лафлера- Кинмана. Параметр $1/\theta(\varphi)$, большое значение которого является индикатором наличия периода, показал заметный, но достаточно широкий пик на частоте, соответствующей периоду $2776^d \simeq 7.6^y$.

Поскольку в полученных данных явно прослеживается только один период, с целью его уточнения была произведена аппроксимация данных гармонической функцией синус с использованием следующего соотношения:

$$\Delta m_{obs} - \Delta m_{teor} = a + b \sin(2\pi (JD/P + \varphi)), \qquad (4.1)$$

где *a* и *b* - масштабные коэффициенты; *P* - период; φ - фазовый коэффициент. Значения коэффициентов находились нелинейным методом наименьших квадратов. В результате было получено значение периода $P = 2796^d \pm 65^d \simeq 7.7^y$, лишь немного отличающееся от найденного с помощью программы WINEFK. Результат аппроксимации данных функцией синус приведен в верхней строке табл. 4.9 и на рис. 4.10, верхняя панель.

Здесь следует заметить, что изображенная на рис. 4.10 функция синус отражает лишь циклический характер изменений общего блеска системы и его период, но никак не форму изменения внезатменного блеска AM Leo.

4.5.2. Изменения блеска системы AM Leo в максимумах и минимумах кривой блеска

Для затменных систем важными областями на кривых блеска являются участки максимумов и минимумов. Изменения блеска в этих областях сигнализируют, как об изменении температуры того или иного компонента данной ТДС (изменения глубин минимумов), так и об изменении общей светимости, несимметричности распределения по поверхности компонентов пятен и вспышечных образований, выражающаяся в разновысокости максимумов блеска.

Поэтому, представляло интерес сравнить характер изменений общего блеска AM Leo с изменениями в максимумах и минимумах кривой блеска этой ТДС. Тем более, в данном случае имеется возможность регистрировать блеск только одного, главного компонента, поскольку в более глубоком минимуме наблюдается полное затмение.

За весь период наблюдений в каждом из V и R фильтров было получено по 86 значений разностей блеска AM Leo и звезды сравнения в максимумах (46 в первом максимуме $\varphi = 0.25$ и 40 во втором $\varphi = 0.75$) и по 92 значения в минимумах (48 в первом и 44 во втором). Несколько меньшее значение разностей блеска было получено в фильтре B. Результаты представлены на рис. 4.9. Можно заметить, что наряду с имеющимися трендами долговременные изменения блеска в максимумах и минимумах носят также циклический характер. Что и следовало ожидать, исходя из характера изменений общего блеска AM Leo. Причем не отмечается заметной относительной разницы изменений блеска в первом и втором максимумах или минимумах блеска. Проверка на периодичность полученных данных



Рис. 4.9. Измененения блеска AM Leo со временем, в максимумах (слева) и минимумах кривой блеска (справа); • — первый максимум ($\varphi = 0.25$) и главный минимум ($\varphi = 0.0$); • — второй максимум ($\varphi = 0.75$) и вторичный минимум ($\varphi = 0.5$).

методами, изложенными в предыдущем разделе, после исключения трендов показала наличие периодов, близких к полученному, при исследовании общего блеска AM Leo, см. табл. 4.9. Результаты аппроксимации данных функцией синус приведены на средней и нижней панелях рис. 4.10. Найденые значения периода в пределах ошибок оказалось практически идентичными периоду изменения общего блеска системы и малоамплитудным изменениям периода AM Leo, а сами колебания периода синфазны колебаниям изменения блеска.

Наличие трендов, зависящих от цвета, на кривых изменения блеска AM Leo не связанных с явлениями затмений и приливными деформациями компонентов подразумевает и изменения в показателях цвета на долговременном промежутке наблюдений. Действительно, как можно видеть на рис. 4.11 изменение разностей показателей цвета B - V и V - R AM Leo и звезды сравнения имеет место. Можно отметить, что изменения показателей цвета, наблюдаются в противофазе (увеличение значения показателя



Рис. 4.10. Изменение общего, внезатменного блеска AM Leo (верхняя панель), а также в максимумах (средняя панель) и минимумах (нижняя панель) кривой блеска после вычета линейных трендов; ▲ — фильтр В; • — фильтр V; • — фильтр R; пунктирная линия — апроксимационная синусоида.

B – V приводит к уменьшению значения V – R и наоборот). Наряду с изменениями показателей цвета имеет место изменение глубин минимумов кривой блеска AM Leo, см. рис. 4.12

4.5.3. Изменения внезатменного блеска системы AM Leo, как проявления активности магнитного поля компонентов

Доказательства того, что изменения разностей блеска AM Leo относительно звезды сравнения на долговременном интервале возникают из-за изменения блеска самой переменной приведены в работе Горды [227] и здесь

200

не рассматриваются.

Как отмечалось выше, изменения носят периодический характер, что проявляется, как в изменениях общего, внезатменного блеска системы, так и в изменениях максимумов и минимумов блеска AM Leo, см. рис. 4.10. Изменениям блеска соответствуют осциляции периода малой амплитуды. Причем найденные значения периодов и фаз колебаний практически совпадают, см. табл. 4.9. Вполне вероятно, что изменения блеска и периода вызваны одним процессом. Изменение магнитного поля конвективных оболочек компонентов этой ТДС вполне может быть таким процессом. В настоящее время, именно этим механизмом чаще всего объясняют изменения блеска и периода ТДС типа W UMa, относящихся к подклассу W. Магнитная активность на поверхности компонентов проявляется в увеличении или уменьшении числа холодных пятен или более ярких областей, например, факельных площадок на поверхности компонентов, что приводит к небольшим изменениям общей светимости звезды. В тоже время эффект Эпплгейта, обусловленный перераспределением углового момента при перемещении конвективных потоков в изменяемом магнитном поле компонентов, приводит к изменениям периода системы малой амплитуды. Процесс изменения магнитного поля звезд типа W UMa может носить периодический характер типа солнечного, на что указывал еще Маллан [30], оценивший диапазон периодов в 5 – 10 лет. Найденное автором среднее значение периода 7.6 лет вполне укладывается в этот интервал оценок. Для сравнения, у звезды АК Her, являющейся ТДС типа W UMa, Ли и др. [208] нашли три частоты изменения основного периода системы. Одна из частот, соответствующая периоду 7.6 лет, интерпретируется ими, как проявление магнитного цикла активности. Эти же авторы в другой своей работе [209] при исследовании изменений периода AP Leo, другой ТДС типа W UMa, нашли две частоты, соответствующие периодам 11.3 года и 9.2 года, также интерпретированные ими, как проявление магнитного цикла активности.



Рис. 4.11. Измененения показателей цвета AM Leo со временем: общий, внезатменный блеск (верхняя панель), максимумы кривой блеска (средняя панель) и минимумы кривой блеска (нижняя панель); заполненные значки — первый максимум ($\varphi = 0.25$) и главный минимум ($\varphi = 0.0$); незаполненные значки — второй максимум ($\varphi = 0.75$) и вторичный минимум ($\varphi = 0.5$).



Рис. 4.12. Измененения глубин минимумов кривых блеска AM Leo со временем в B, V и R фильтрах; • — главный минимум ($\varphi = 0.0$); • — вторичный минимум ($\varphi = 0.5$).

Наряду с периодическими изменениями блеска AM Leo имеют место долговременные тренды. Наиболее сильно падение блеска AM Leo за десятилетний период отмечается в фильтре B на величину $\delta B = 0.08^m$, см. рис. 4.10 и рис. 4.11. В рамках модели магнитной активности на поверхности компонентов это можно объяснить изменением пдощади, занимаемой яркими областями, например, факельными полями, что наиболее заметно проявляющейся в синей области спектра. В частности значимое уменьшение показателя цвета $\Delta(B-V)$ на ~ 0.1^m после 2015г. (JD 2457000) может свидетельствовать об уменьшении площади ярких областей на поверхности компонентов. При этом более красный показатель цвета $\Delta(V - R)$ наоборот немного увеличился, что может свидетельствовать об уменьшении и пятенной активности, имеются в виду темные пятна.

С другой стороны, чему автор отдает предпочтение, значимые изменения блеска звезды в фильтре B, а также показателя цвета B - V по сравнению с изменением блеска в фильтрах V и R и показателя цвета V-Rможно объяснить и другими причинами, не связанными с труднодоказуемым утверждением увеличения по какой-то причине площади факельных площадок. Поскольку спектральный класс AM Leo - F8 V, согласно Хиллу и др. [177], то температура поверхности компонентов находится в пределах 6300 К - 6600 К. В соответствии с законом смещения Вина, максимум распределения энергии непрерывного излучения, в области которого изменения вдоль оси длин волн наиболее значительны, приходится на значения $\lambda = 4400 - 4600 A^{\circ}$, т.е область спектра, регистрируемую в фильтре B, причем вблизи максимума полосы пропускания фильтра. Спектральные же области, регистрируемые в фильтрах V и R, приходятся на монотонно нисходящий участок распределения энергии непрерывного спектра звезды спектрального класса F8. Таким образом, небольшие изменения поверхностной температуры компонентов систем типа W UMa порядка 200-300 K [30] изза увеличения или уменьшения площади пятен, приводящие к небольшому сдвигу максимума распределения энергии непрерывного спектра вдоль оси длин волн, наболее значимо будут проявляться в изменении блеска звезды в фильтре B и показателя цвета B - V. Таким образом, в рамках данного предположения, уменьшение значения показателя цвета B - V и увеличение значения показателя цвета V - R могут свидетельствовать просто об уменьшении пятенной активности компонентов. В данном случае отпадает необходимость в предположении наличия горячих областей большой площади на поверхности компонентов.

Описанные выше долговременные изменения блеска и цвета системы AM Leo могут являться своеобразными индикаторами перехода звезды в более спокойную фазу активности, т.е. из подкласса W в подкласс A. На это может указывать и изменение глубин минимумов. Так, на графиках изменений глубин обоих минимумов, приведенных на рис. 4.12, видно, что до 2015 года (JD 2457000), по крайней мере в фильтрах V и R, более глубоким был первый минимум, соответствующий полному затмению вторичного компонента. Затем, по мере уменьшения значений, глубины минимумов сравнялись по величине, а в отдельные моменты времени второй минимум оказывался немного глубже первого, что присуще контактным ТДС типа W UMa подкласса A. Следует отметить, что эти изменения произошли за достаточно короткий промежуток времени после одного из зарегистрированных максимумов внезатменного блеска AM Leo. Такое достаточно резкое изменение величины показателя цвета $\Delta(B - V)$ и значений глубин минимумов можно охарактеризовать, как скачок.

Изменения глубин минимумов AM Leo регистрировались и ранее. Так в работе Демиркана и Дермана [228] приведены данные изменений глубин минимумов на протяжении 40 лет, с 1955г. по 1995г. За этот промежуток времени значения глубин первого и второго минимумов, как отмечено в работе Ли и др. [210], примерно раз в десятилетие менялись местами, изменяясь в противофазе. Подобные изменения, с периодом 23 года, разностей максимумов и глубин минимумов кривых блеска контактной ТДС ВВ Реg, являющейся затменной переменной типа W UMa с компонентами такого же спектрального класса, как и у AM Leo - F8 V, приведены в работе Ханны и Авадалла [229]. Правда, значения периода были найдены всего по шести сезонам наблюдений на интервале в 63 года.

Обнаруженные в данном исследовании синхронные изменения показателей цвета и глубин минимумов AM Leo, а также их вероятный периодический характер [210], наводит на мысль о существовании еще одного более длительного цикла активности, помимо найденного на основе изменений внезатменного блеска системы периода ~ 7.6 лет. Подобная ситуация наблюдается, например, в виде долгопериодического изменения степени активности 11-летнего солнечного цикла. По всей видимости более длительный период проявляется в переходе кривой блеска AM Leo между подклассами $A \rightleftharpoons W$. Пока не имеется достаточно данных, чтобы констатировать это наверняка.

4.6. Возможная периодичность пятенной активности новой затменной переменной типа W UMa GSC 3599-2569

4.6.1. Параметры системы GSC 3599-2569, найденные по наблюдениям 2009 - 2013 годов

Во время проведения автором фотометрического мониторинга молодой переменной звезды неправильного типа V645 Суд был получен большой ряд ПЗС-кадров окрестностей этой звезды. Наблюдения V645 Суд проводились с мая 2009 г. по июль 2018 г. на телескопе рефлекторе АЗТ-3 $(D = 0.45 \text{ м}, F_{Newton} = 2.0 \text{ м})$, а с декабря 2018 г. по октябрь 2022 г. на телескопе AstroSib-500RC системы Риччи-Кретьена (D = 0.5 м, F = 4.0 м)Коуровской астрономической обсерватории УрФУ. Сведения об используемых светоприемниках и фильтрах приведены в разделе 4.5.1. данной диссертации.

Переменность звезды GSC 3599-2569, была открыта случайно в 2013 году в процессе поиска звезд, обладающих переменностью неправильного типа и находящихся в ближайшей окрестности молодой массивной переменной V645 Cyg [230]. В качестве звезд сравнения и контрольной в непосредственной близости от переменной были выбраны две рядом расположенные звезды, обозначенные, как C и C1, соответственно. Данные о звездах приведены в табл. 4.10. Первые результаты полученные по наблюдениям 2009 — 2013 гг. были опубликованы в работе Горды и др. [231]. В результате фотометрической обработки ПЗС-кадров за этот период было получено 1233 разностей блеска переменной звезды и звезды сравнения в фильтре Vи 915—в R фильтре.

3UC	GSC	00	бозначение	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	m_V	m_R
281-202918	3599.2569	Var	переменная	$21^h 39^m 03^s .99$	$+50^{\circ}09'36''.8$	$13^{m}.26$	$12^{m}.39$
281-203149	_	С,	сравнения	$21^h 39^m 16^s.64$	$+50^{\circ}07'19''.7$	$13^{m}.02$	$12^{m}.21$
281-203195	3599.2386	C1 ,	контрольная	$21^h 39^m 19^s .55$	$+50^{\circ}07'39''.9$	$12^{m}.53$	$11^{m}.57$

Таблица 4.10. Обозначения и координаты звезд

Предварительный анализ этих данных показал, что изменение блеска звезды происходит периодически с характерной формой свойственной затменным переменным типа W UMa с коротким значением периода. За интервал наблюдений 2009 - 2013 гг. было получено 25 моментов минимумов, приведенных в табл. 4.11. Кривая блеска, полученная 8 октября 2010 г. (JD2455478), содержала оба минимума, что позволило получить достаточно уверенное значение периода $P = 0.^{d}4$ и вычислить значения E для каждого момента минимума, полученного в другие ночи. Точные значения периода, эпохи минимума и их погрешностей были получены методом наименьших квадратов путем аппроксимации значений моментов минимумов линейной зависимостью от E и приведены ниже:

$$JD_{\odot}Imin = 2454979.1586 + 0.4029112 \cdot E . \qquad (4.2)$$

$$\pm 4 \qquad \pm 2$$

Кривые блеска переменной звезды в фильтрах V и R, построенные по фазам, вычисленным на основе коэффициентов полученного эфемеридного уравнения (4.2), и с использованием данных всего интервала наблюдений приведены на рис. 4.13. В верхней части рисунка для сравнения помещены кривые разностей блеска звезды сравнения и контрольной звезды (C - C1) в фильтре V в тех же фазах. Как можно видеть на рис.4.13, разброс точек на кривых блеска переменной звезды заметно больше величины разброса точек разностей блеска звезды сравнения и контрольной. Причиной сильного разброса точек на суммарных кривых блеска по всей

JD	Е	O - C	JD	Е	O - C
2450000 +			2450000 +		
4979.3582	0.5	-0.0018	5478.1637	1238.5	-0.0004
5035.3654	139.5	0.0007	5478.3643	1239.0	-0.0012
5040.4000	152.0	-0.0011	5533.1606	1375.0	-0.0008
5089.3565	273.5	0.0017	5533.3620	1375.5	-0.0009
5092.3787	281.0	0.0021	5543.2347	1400.0	0.0005
5153.2173	432.0	0.0011	5570.2282	1467.0	-0.0011
5176.1815	489.0	-0.0006	5582.1153	1496.5	0.0001
5223.1225	605.5	0.0012	6205.2168	3043.0	-0.0005
5399.3940	1043.0	-0.0009	6212.2675	3060.5	-0.0007
5413.2958	1077.5	0.0004	6274.1149	3214.0	-0.0002
5414.3027	1080.0	0.0001	6281.1660	3231.5	-0.0001
5441.2971	1147.0	-0.0006	6517.2741	3817.5	0.0021
5442.3058	1149.5	0.0008			

Таблица 4.11. Моменты минимумов новой переменной



Рис. 4.13. Кривые блеска новой переменной в V и R фильтрах по данным 2009 - 2013 гг. В верхней части рисунка – кривая разностей блеска звезд сравнения и контрольной в фильтре V.

видимости являлся сдвиг участков кривых блеска, полученных в разные ночи, относительно друг друга вдоль оси звездых величин. Этот эффект еще заметнее на кривых блеска, полученных в отдельные ночи. На рис. 4.14 приведены кривые блеска переменной звезды, построенные для двух периодов наблюдений и показывающие максимально смещенные кривые блеска. Можно видеть, что величины смещений кривых блеска заметно превосходят величины случайного разброса точек на кривых блеска, полученных в отдельные ночи. В тоже время, как видно на рис. 4.14 значения разностей блеска звезд сравнения и контрольной (C-C1), полученные в эти же даты, не показывают каких-либо смещений.

Так же можно видеть, что глубины обоих минимумов кривых блеска $\delta m = \Delta m_{min} - \Delta m_{max}$ сравнимы по величине. Разности глубин главно-



Рис. 4.14. Кривые блеска новой переменной и разностей звезд сравнения и контрольной (C - C1), полученные в течении двух периодов: • - 8 октября 2010г; •, •, \triangle , \bigtriangledown , \Box , - октябрь-декабрь 2012г.

го, более глубокого и вторичного минимумов составляют всего $0.^{m}01$ в V - и $0.^{m}03$ в R - фильтрах, соответственно. Перечисленные выше характеристики кривых блеска, наряду с малой величиной периода, позволяют однозначно отнести данную переменную звезду к типу W UMa (KW по классификации ОКПЗ).

Амплитуда смещений кривых блеска, полученных в отдельные ночи, и величина изменения глубин минимумов больше в V фильтре. Амплитуды смещений составляют $0.^{m}08$ и $0.^{m}06$ в V - и R - фильтрах, соответственно. Глубины минимумов изменяются в меньшей степени. Амплитуды изменений составляли $0^{m}.055$ и $0^{m}.045$ в V - и R - фильтрах, соответственно. При этом разности блеска звезды сравнения и контрольной звезды, полученные в те же ночи, оставались практически неизменными в пределах разброса точек. Величина среднеквадратичного уклонения разброса точек этих разностей, характеризующая точность наблюдений, не превышала значения $\sigma_V = \pm 0^m.006$. Следует отметить, что значение среднеквадратичного уклонения разброса точек на участках кривых блеска переменной звезды, полученных в отдельные ночи, была сравнима по величине с этой оценкой.

Как уже было отмечено выше наиболее вероятной причиной изменения (смещения) кривых блеска ТДС типа W UMa принято считать появление горячих или холодных пятен [30], причиной которых является наличие магнитного поля, на поверхности компонентов этих контактных тесных двойных систем. Пятна так же являются причиной уменьшения или увеличения средней эффективной температуры компонентов, а следовательно, и регистрируемого в наблюдениях блеска звезды.

Как и при определении характера изменения внезатменного блеска AM Leo, то же являющейся ТДС типа W UMa, в данном случае необходимо было вычислить усредненные за ночь разности блеска между данными наблюдений и реперной кривой блеска GSC 3599-2569. В качестве реперной кривой естественно было использовать теоретическую кривую блеска, полученную в процессе аппроксимации кривой блеска. Следует отметить, что в хронологическом порядке эта методика первоначально была разработана и аппробирована при обработке данных именно этой звезды — GSC 3599-2569, а затем применена к данным AM Leo.

Поскольку на кривых блеска GSC 3599-2569 наблюдался значительный разброс точек, см. рис. 4.13, из-за смещения данных отдельных ночей, перед применением процедуры аппроксимации (определения параметров ТДС) было решено несколько уменьшить этот разброс. Для чего были построены нормальные (средние) кривые блеска в каждом из фильтров, которые использовались, как своеобразные нуль-пункты. Процесс усреднения значений фаз и разностей блеска не представял особых затруднений, поскольку количество наблюдательных точек было достаточно большим, и



Рис. 4.15. Скорректированные кривые блеска GSC 3599-2569 и разности O-C (зависимость O-C в фильтре V смещена на $-0^m.1$); о - наблюдательные точки; сплошные линии - синтетические кривые блеска.

они равномерно покрывали кривые блеска в обоих фильтрах. В среднем в одну нормальную точку усреднялось по 15 точек отдельных наблюдений, при этом интервал усреднения по фазе не превышал величины $0^p.012$, что практически не приводило к какому-либо заметному искажению кривых блеска. В результате было получено 68 нормальных точек в фильтре R и 91 в фильтре V.

Далее вычислялись средние величины смещений кривых блеска, полученных в отдельные ночи, согласно следующему соотношению:

$$\delta m = \sum (\Delta m_i - \Delta m_i^{norm})/N, \qquad (4.3)$$

где Δm_i — разность блеска (переменная минус звезда сравнения) отдельной точки на кривой блеска, Δm_i^{norm} — разность блеска соответствующей точки

нормальной кривой блеска, *N*- количество измерений за ночь.

Поскольку в основном наблюдался только сдвиг кривых блеска, полученных в отдельные ночи, логичным решением было уменьшить разброс точек на суммарных кривых блеска путем внесения полученных значений сдвигов в разности блеска с обратным знаком (своеобразное сжатие кривых блеска). В результате проведенной процедуры разброс точек на суммарных кривых блеска уменьшился в 2.5 – 3 раза. При этом форма кривых блеска не претерпела существенных изменений. Исправленные кривые блеска приведены на рис. 4.15. Именно эти кривые блеска были использованы для определения параметров этой тесной двойной системы.

Определение параметров ТДС GSC 3599-2569 было проведено с использованием пакета *PHOEBE* [111], реализующего метод синтеза кривых блеска на основе кода Вилсона -Девиннея [112].

Параметры системы находились в классе решений для контактных систем типа W UMa. Для получения в процессе решения реалистичных оценок значений масс и размеров компонентов, соответствующих маломассивным контактным системам, расстояние между центрами компонентов *a* принималось равным трем радиусам Солнца, что соответствует среднему значению для систем типа W UMa. Начальные значения поверхностных температур компонентов задавались в предположении спектральных классов F5–G0, наиболее характерных для звезд типа W UMa.

Определение элементов орбиты и физических параметров компонентов затменной системы проводилось с одновременным использованием данных, полученных в V и R фильтрах. Соответствующие полученному решению теоретические кривые блеска, а также разности O - C для обоих фильтров приведены на рис.4.15. Можно видеть, что приближение наблюдательных кривых блеска теоретическими кривыми достаточно хорошее. Зависимости O - C не показывают заметных систематических отклонений. Полученные значения параметров системы приведены в табл.4.12.

параметр	значение	параметр	значение
i	$85^{\circ}.8 \pm 0^{\circ}.5$	j_{1}/j_{2}	1.17
r_1	0.54 ± 0.05	f	24.7%
r_2	0.26 ± 0.06	Ω	2.152
k	0.47	$\Omega(L_1)$	2.181
q_{phot}	0.18 ± 0.01	$\Omega(L_2)$	2.066
T_1^{eff}	$(7029 \pm 10)K$	L_1	0.84
T_2^{eff}	$(6896 \pm 10)K$	L_2	0.16

Таблица 4.12. Параметры относительной орбиты новой переменной звезды

Здесь *i* - угол наклона плоскости орбиты системы к картинной плоскости; r_1 и r_2 - средние радиусы компонентов, выраженные в долях величины *a*; *k* - отношение радиусов компонентов; q_{phot} - отношение масс компонентов; T_1^{eff} и T_2^{eff} - эффективные температуры компонетов; j_1/j_2 - отношение поверхностных яркостей компонентов; *f* - степень сверхконтакта, см. ниже; Ω - относительный гравитационный потенциал Копала на поверхности компонентов; Ω_{L1} и Ω_{L2} - относительные гравитационные потенциалы первой и второй точек Лагранжа; L_1 и L_2 - относительные светимости компонентов ($L_1 + L_2 = 1$).

Приведенные в табл. 4.12 значения эффективных температур и их формальные погрешности соответствуют полученной в процессе решения модели системы. Реальные значения эффективных температур компонентов необходимо определить из спектральных или специально для этой цели проведенных фотометрических наблюдений. Значения температур компонентов приведены в таб. 4.12 исключительно для того, чтобы показать, что в результате решения кривых блеска более горячим оказался первый компонент.

На основе полученных данных можно сделать следующие заключения. Конфигурация системы является сверхконтактной, значение степени сверхконтакта $f = 100 \cdot (\Omega_{L1} - \Omega)/(\Omega_{L1} - \Omega_{L2}) = 24.7\%$. Вторичный, менее глубокий минимум теоретической кривой блеска имеет плоское дно (полное затмение), см. рис. 4.15. Главный, более горячий компонент $(T_1^{eff} > T_2^{eff})$ значительно массивнее вторичного $(q_{phot} = M_2/M_1 \sim 0.2)$. Перечисленные выше значения параметров этой W UMa системы, особенно малое значение отношения масс компонентов (q < 0.4), позволяют отнести данную W UMa систему к подклассу A. Для окончательного вердикта необходимы спектральные данные.

Как отмечено выше (см. рис. 4.14), в наблюдениях имеются данные, полученные в течение двух достаточно коротких интервалов времени, на основе которых можно построить две полные кривые блеска, причем заметно смещенные одна относительно другой. Кривая блеска (2010г.) была получена в период, когда общий блеск системы был ниже зарегистрированного среднего уровня. Вероятно в этот период пятенная активность компонентов затменной системы могла быть высокой. Данные, соответствующие кривой блеска (2012г.), относятся к периоду, когда зарегистрированный общий блеск затменной системы был максимальным. В этот период площадь поверхности компонентов, покрытая пятнами, должна быть минимальной, либо темные пятна должны отсутствовать совсем. Исходя из того, что параметры тесной двойной системы на коротком, в сравнении с временем жизни звезды, четырехлетнем интервале наблюдений должны оставаться практически неизменными, для аппроксимации этих кривых блеска были использованы синтетические кривые, вычисленные на основе параметров, найденных по всем полученным данным (табл. 4.12).

Поскольку кривая блеска 2012 года вероятно была получена в период максимума общего блеска системы, без наличия темных пятен на поверхности компонентов, либо при минимальном их количестве, аппроксимация ее синтетической кривой должна осуществляться простым смещением последней вдоль оси интенсивностей до максимально-возможной степени сов-



Рис. 4.16. Аппроксимация наблюдательных данных, полученных 8 октября 2010г, во время значимой пятенной активности (зачерненные кружки) и в период октябрь-декабрь 2012г, когда пятна, предположительно, отсутствовали (незаполненные кружки) теоретическими кривыми блеска (сплошные линии).

мещения. Иными словами, при выполнении процедуры аппроксимации варьированию подвергался только один параметр *luminosity*, ответственный за общий блеск системы. Полученное в результате аппроксимации новое значение параметра *luminosity* было принято за основной блеск системы.

При аппроксимации кривой блеска 2010г. все параметры, в том числе и новое значение параметра *luminosity*, фиксировались. Аппроксимационное соответствие достигалось исключительно варьированием параметров модели пятенной структуры. Наилучший результат был достигнут в модели наличия обширного темного пятна в районе одного из полюсов главного, более горячего компонента. Это обусловило снижение общего блеска систе-
N	$arphi^{\circ}$	λ°	r°	T_s/T_f
1	3	180	33	0.68
2	80	88	8	0.80

Таблица 4.13. Параметры пятенной структуры на поверхности главного компонента, полученные по наблюдательным данным за 8 октября 2010г.

мы, существенно не повлияв на форму кривой блеска. Небольшая разница в высоте максимумов кривой блеска 2010г. хорошо моделировалась введением небольшого темного пятна в экваториальной области главного компонента на долготе, направленной в сторону наблюдателя на фазе $\varphi = 0.75$. Все вычисления были проведены в пакете *PHOEBE* [111]. Результаты аппроксимации приведены на рис. 4.16, а параметры пятенной структуры в табл. 4.13.

Таким образом, как и в случае AM Leo изменения на кривых блеска новой переменной звезды GSC 3599-2569 можно вполне интерпретировать в рамках модели пятенной структуры на поверхности компонентов.

Далее, полученные в процессе устранения значительного разброса точек на кривых блеска в V и R фильтрах значения усредненных за ночь разностей между наблюдениями и реперной кривой δm , см. соотношение 4.3, были исследованы на наличие периодичности по времени. После применения процедуры, изложенной выше в разделе 4.5.1 были обнаружены циклические изменения блеска системы, не связанные с явлениями затмений и приливными деформациями компонентов, с периодом $P_{spot} = 940 \pm 130$ суток. Поскольку временной интервал в течение которого были получены все имевшиеся в наличии на тот момент данные едва покрывали один цикл периода, к найденному значению периода следовало относиться с осторожностью. Тем не менее регистрация изменения пятенной активности, а значит и магнитного поля компонентов этой новой короткопериодической ТДС типа W UMa не вызывает сомнений.

4.6.2. Изменение внезатменного блеска GSC 3599-2569 за весь период наблюдений

Фотометрические наблюдения автором переменной V645 Cyg были продолжены и после 2013 г., правда не так часто, как в период 2009—2013 гг. Тем не менее, было получено достаточно большое количество ПЗС-кадров окрестностей V645 Cyg, на которых присутствовали изображения звезды GSC 3599-2569. В 2021 г. автором, с целью исследования формы изменения и уточнения периода внезатменных колебаний блеска данной звезды, было продолжено данное исследование на основе новых данных.

После проведения стандартной фотометрической обработки ПЗСкадров и определения разностей блеска переменной и звезды сравнения за период с 2013 г. по апрель 2021 г. было получено 11 новых значений минимумов GSC 3599-2569. Значения всех моментов минимумов, полученных в период с 2009 г. по 2021 г. приведены в первом столбце табл. 4.14. Новые моменты минимумов отделены горизонтальной чертой и находятся в последних строках табл. 4.14.

Вычисление моментов минимумов GSC 3599-2569 на эпоху после 2014 г. по линейной эфемеридной формуле (4.2) показало значительные расхождения вычисленных значений и полученных в результате наблюдений. Значение разностей O-C порой превышало величину $0.^d01$. Поэтому была вычислена новая линейная эфемеридная формула с использованием всех значений моментов минимумов. Во второй колонке табл. 4.14 находятся значения разностей O-C, вычисленные с использованием новой линейной эфемеридной формулы, приведенной на рис. 4.17.

На рис. 4.17 показано распределение разностей O - C со временем и новая линейная эфемеридная формула для вычисления моментов минимумов. Как можно видеть, разности O - C имеют достаточно большие значения и изменяются со временем по близкой к параболе зависимости. Такое поведение разностей O - C указывает на изменение периода затмен-

Таблица 4.14. Моменты минимумов новой переменной GSC 3599-2569 полученные за весь период наблюдений с 2009 г. по 2022 г.; (O - C)I -вычислены с использованием линейной эфемеридной формулы; (O - C)II -вычислены с использованием квадратичной эфемеридной формулы.

HJD	ТИП	Е	(O-C)I	(O-C)II
2450000 +	минимума			
4979.35820	II	0.5	$0.^{d}00246$	$-0.^{d}00265$
5035.36540	II	139.5	0.00458	0.00010
5040.40000	Ι	152.0	0.00275	-0.00167
5089.35650	II	273.5	0.00517	0.00129
5092.37870	Ι	281.0	0.00552	0.00167
5153.21730	Ι	432.0	0.00407	0.00087
5176.18150	Ι	489.0	0.00216	-0.00080
5223.12250	II	605.5	0.00365	0.00117
5399.39400	Ι	1043.0	0.00017	-0.00061
5413.29580	II	1077.5	0.00143	0.00077
5414.30270	Ι	1080.0	0.00105	0.00040
5441.29710	Ι	1147.0	0.00019	-0.00021
5442.30580	II	1149.5	0.00161	0.00121
5478.16370	II	1238.5	0.00014	0.00006
5478.36430	Ι	1239.0	-0.00071	-0.00080
5533.16060	Ι	1375.0	-0.00075	-0.00036
5533.36200	II	1375.5	-0.00081	-0.00042
5543.23470	Ι	1400.0	0.00049	0.00097
5570.22820	Ι	1467.0	-0.00126	-0.00056
5582.11530	II	1496.5	-0.00013	0.00066
6205.21680	Ι	3043.0	-0.00548	-0.00071
6212.26750	II	3060.5	-0.00578	-0.00098
6274.11490	Ι	3214.0	-0.00572	-0.00063
6281.16600	II	3231.5	-0.00561	-0.00050
6517.27410	II	3817.5	-0.00525	0.00071
6853.30450	II	4651.5	-0.00532	0.00131
6912.33110	Ι	4798.0	-0.00565	0.00103
7281.19800	II	5713.5	-0.00673	-0.00015
8125.10350	Ι	7808.0	-0.00508	-0.00157
8131.14890	Ι	7823.0	-0.00339	0.00008
8225.42940	Ι	8057.0	-0.00482	-0.00194
8817.32030	Ι	9526.0	0.00508	0.00312
9119.30670	II	10275.5	0.00726	0.00209
9151.33580	Ι	10355.0	0.00468	-0.00086
9194.24780	II	10461.5	0.00632	0.00026
9195.25250	Ι	10464.0	0.00373	-0.00233



Рис. 4.17. Распределение значений O - C от времени при использовании новой линейной формулы для вычисления моментов минимумов; точки — O - C; непрерывная линия — аппроксимационная парабола.



Рис. 4.18. Распределение значений O-C при использовании квадратичной эфемеридной формулы для вычисления моментов минимумов; точки -O-C; непрерывная линия — аппроксимационная парабола.

ной системы GSC 3599-2569. Использование квадратичной формулы для вычисления моментов минимумов позволяет уменьшить значения O - C почти на порядок (см. последнюю колонку табл. 4.14). Как можно видеть на рис. 4.18 при использовании квадратичной формулы не наблюдается систематических изменения разностей O - C. Квадратичная формула, приведенная на рис. 4.18, может быть преобразована в более удобный вид для вычисления значений фотометрических фаз, а именно:

$$JD_{\odot}Imin = 2454979.^{d}15940 + P' \cdot E.$$

$$\pm 41$$
(4.4)

$$P' = 0.^{d}4029096 + 4.^{d}5 \cdot 10^{-10} \cdot E.$$

$$\pm 26 \qquad \pm 2.5 \cdot 10^{-11} \qquad (4.5)$$

Таким образом, в настоящий момент значение периода GSC 3599-2569 составляет $P' = 0.^{d}4029143$. О причинах изменения периода этой затменной двойной системы еще слишком рано говорить, т.к. наблюдения проводились всего 12 лет. Можно отметить, по крайней мере, три возможных причины: это перенос массы между компонентами, потеря массы системой и наличие третьего тела.

После вычисления фотометричеких фаз, как и ожидалось, участки кривых блеска, полученные в разные ночи, но на близких фотометрических фазах, были смещены по оси звездных величин один относительно другого. В тоже время разности блеска контрольной и звезды сравнения в эти же ночи оставались практически неизменными в пределах ошибок наблюдений $(\pm 0.^{m}004 - \pm 0.^{m}009)$ за весь период наблюдений.

Используя теоретическую (реперную) кривую блеска построенную на основе параметров системы, полученных на предыдущем этапе исследований (см. табл. 4.12), нами были вычислены значения средних за ночь разностей δm согласно соотношению (4.3). За период наблюдений с 2014 г. по 2021 г. было получено по 45 новых значений δm в фильтрах V и R, соответ-

ственно. В тоже время за весь период наблюдений с 2009 г. по 2021 г. было получено 74 значения δm в фильтре V и 78 в R фильтре.

Исследование на периодичность внезатменного блеска GSC 3599-2569 с использованием полной серии значений δm проводилось аналогично исследованиям блеска AM Leo и предыдущим GSC 3599-2569. А именно, с помощью программы Горанского В. П. WINEFK было найдено значение периода 1187^d $\simeq 3.3^{y}$. На рис. 4.19 приведена кривая изменения значений δm , свернутых с найденным периодом в один цикл. Фазы вычислены согласно эфемеридной формуле, вычисленной в программе WINEFK:

$$JD_{\delta m}min = 2459194^{d}2 + 1187.^{d}32 \cdot E_1. \tag{4.6}$$

Как можно видеть, периодичность изменений внезатменного блеска GSC 3599-2569 явно присутствует. Для уточнения значения периода данные были аппроксимированы гармонической функцией синус вида:

$$\delta m = a + b \cdot JD \cdot \sin(2\pi (JD/P + \varphi)), \qquad (4.7)$$

где *a* и *b* – масштабные коэффициенты, *P* – период, и *\varphi* – фазовый коэффициент. Значения коэффициентов были найдены нелинейным методом наименьших квадратов.

Поскольку точная форма изменения профиля δm неизвестна, аппроксимация функцией синус используется только для уточнения значения периода. В результате найденное значение периода $P = 1189^d \pm 14^d$ лишь немного отличается от значения, определенного с использованием программы WINEFK.

Результат аппроксимации приведен на рис. 4.20. Данные, полученные в период с 2009 г. по 2013 г. находятся в начале последовательности изменения δm , до JD = 2456500. Именно по ним было найдено первоначальное значение периода в 940^d . Как можно видеть, разброс значений и амплитуда изменения внезатменного блеска системы δm после 2013 г. (JD = 2456500)



Рис. 4.19. Кривая изменения внезатменного блеска GSC 3599-2569, свернутая с периодом 1187^d .



Рис. 4.20. Изменение внезатменного блеска (δm) GSC 3599-2569 со временем; кружки — фильтр V; незаполненные кружки — фильтр R; пунктирная линия — аппроксимационная синусоида.

значительно увеличились, а плотность наблюдений во времени уменьшилась. Это связано с тем, что время наблюдений V645 Суд в течение отдельной ночи было сокращено до 1.5 - 4 часов, т.к. было установлено, что ее блеск в течение ночи менялся мало. Поскольку период GSC 3599-2569 порядка 10-ти часов, только небольшие отрезки кривой блеска наблюдались в течение одной ночи, поэтому зачастую регистрировался блеск только от одной стороны запятненных поверхностей компонентов этой ТДС. Это приводило к переоценке или недооценке общего блеска системы, что сказалось на увеличении разброса значений δm . Следует, однако, отметить, что поскольку процесс наблюдений во времени в достаточной мере случаен, основной тренд изменения внезатменного блеска GSC 3599-2569 с течением времени, зарегистрированный в изменениях значений δm , в достаточной степени реален.

Следует также отметить, что в течение всего периода наблюдений постепенно увеличивалась амплитуда циклических вариаций внезатменного (не связанного с явлениями затмений и приливными деформациями компонентов) блеска системы (см. рис. 4.20). Вероятно, как и в случае с AM Leo, наблюдается наличие еще одного, более длинного периода изменения активности магнитного поля компонентов системы по аналогии с изменением степени активности 11-ти летнего солнечного цикла. Однако это предположение требует дальнейшего исследования системы GSC 3599-2569 на более длинном промежутке времени.

4.7. Обсуждение результатов и выводы

В результате проведения 14-летнего мониторинга тесной двойной системы AM Leo типа W UMa, на основе полученных автором оригинальных фотометрических даных, были обнаружены циклические изменения блеска малой амплитуды с периодом порядка 7.6 лет, не связанные с явлениями затмений и приливными деформациями компонентов. Исследование изме-

нения периода данной затменной переменной на основе полученных автором и взятых из литературы значений моментов минимумов позволило обнаружить малоамплитудные циклические изменения периода системы, не связанные с наличием третьего тела. Найденные значения периодов и фаз малоамплитудных колебаний внезатменного блеска и периода ТДС, оказавшиеся практически идентичными, позволили сделать вывод о наличии единого процесса, генерирущего такие колебания. Сделано предположение, что таким механизмом может являться процесс изменения магнитного поля конвективных оболочек компонентов, подобно Солнечному циклу активности, приводящий как к изменению площади холодных (темных) и горячих (светлых) пятен, влияющих на изменение общего блеска системы, так и к малоамплитудным изменениям периода системы (эффект Эпплгейта [211]). Показано, что изменения на кривых блеска АМ Leo обусловлены наличием пятен на поверхности компонентов. На основании зарегистрированного уменьшения значений глубин обоих минимумов кривых блеска и смены их относительных значений сделан вывод о возможном переходе системы из подкласса W в подкласс A в настоящее время.

Открытая автором в ближайшей окрестности молодой переменной звезды V645 Суд в процессе ее многолетнего мониторинга новая переменная звезда GSC 3599-2569 по виду кривой блеска и короткому значению периода была классифицирована, как затменная переменная типа W UMa. На основе значений параметров компонентов и системы в целом, полученных в процессе решения кривой блеска, было установлено, что эта сверхконтактная, маломассивная, затменная система типа W UMa принадлежит к подклассу *A*. Обнаруженные первоначально на интервале наблюдений в 4 года малоамплитудные циклические флуктуации общего внезатменного блеска системы были подтверждены в процессе дальнейших, в общей сложности 12-летних, наблюдений [232]. Найденное уточненное значение периода малоамплитудных флуктуаций блеска этой новой затменной переменной звезды оказалось почти в два раза меньше ($P_{mgn} \sim 3$ года), чем у звезды такого же типа — АМ Leo. Обнаружено также увеличение с течением времени амплитуды малоамплитудных флуктуаций блеска. Причиной таких колебаний блеска, также как и у АМ Leo, могут быть циклические изменения пятенной активности компонентов. Тем более, как показано в работе Горды и др. [231], изменения кривых блеска вполне объясняются в рамках простой пятенной модели. Анализ наблюдений, проведенных в течение 12-ти лет, показал также наличие изменений периода самой тесной двойной звезды. Точная причина изменения периода пока не может быть установлена из-за небольшого интервала наблюдений. Возможно, как и вслучае с АМ Leo, причиной этого может быть наличие третьего тела в системе.

Вклад соискателя:

В работах с соавторами по теме данной главы автору принадлежит постановка задачи, получение и обработка наблюдательных данных, обсуждение результатов в равной степени с соавторами.

4.8. Положения, выносимые на защиту

По результатам четвертой главы на защиту выносятся следующие положения:

 На основе оригинальных многолетних наблюдений автора обнаружены малоамплитудные циклические колебания внезатменного блеска и малоамплитудные колебания периода маломассивной, короткопериодической затменной переменной звезды AM Leo, относящейся к типу W UMa систем. Предложена интерпретация этих изменений в рамках модели периодического изменения магнитного поля конвективных оболочек компонентов системы, проявляющегося в изменении общего блеска системы из-за наличия пятен на поверхности компонентов, а также в изменении периода системы вследствие взаимодействия квадрупольного момента с изменяющимся магнитным полем (эффект Эпплгейта).

 Открыта новая затменная переменная звезда типа W UMa GSC 3599-2569. На основе оригинальных многолетних наблюдений автора обнаружены малоамплитудные циклические колебания ее внезатменного блеска. Предложена интерпретация этих колебаний блеска в рамках модели изменения магнитной активности компонентов этой короткопериодической системы.

Глава 5. Фотометрический мониторинг V645 Суд и новых переменных звезд в ее окрестности

В данной главе приведены результаты долговременного фотометрического исследования молодой массивной звезды типа Ae/Be Xepбига V645 Cyg, находящейся в области звездообразования. Следует отметить, что на момент начала исследования автором этой переменной звезды фотометрические данные в оптическом диапазоне с использованием фотоэлектронного приемника излучения были получены только однажды. Поэтому представляло несомненный интерес провести это исследование с целью проверки выводов сделанных на основе предыдущего фотометрического исследования V645 Cyg.

В результате проведения долговременного фотометрического мониторинга был получен обширный массив ПЗС-кадров ближайших окрестностей V645 Cyg, на основе исследования которого были открыты ряд переменных звезд, результаты исследования которых приведены в данной главе.

В разделе 5.1 приводятся сведения о звезде V645 Суg, а также результаты 13-летнего исследования блеска данного объекта в оптическом диапазоне спектра. Обнаружению пяти новых переменных звезд в ближайшей окрестности V645 Суg, возможно являющихся молодыми объектами, посвящен раздел 5.2. В разделе 5.3 приводятся результаты фотометрического исследования новой затменно-переменной звезды, открытой автором. Обсуждение основных результатов данной главы и выводы приведены в разделе 5.4.

• Gorda S. Yu., Sobolev A. M. First solution of the light curve of the new

variable star 3UC 281-20371. // Information Bulletin on Variable Stars. - 2012. - $N^{\rm o}$ 6036. - Pp. 1-5.

- Sobolev A. M., Gorda S. Yu. and Davydova O. A. Discovery of irregular variability of five stars in the vicinity of the young stellar object V645 Cygni. // Information Bulletin on Variable Stars. 2013. Nº 6061. Pp. 1-6.
- Gorda S. Yu, Bisyarina A. P., Sobolev A. M. and Parfenov S. Yu. Long-term brightness and color variations of the young variable star V645 Cyg.
 // Peremennye Zvezdy (Variable Stars). 2022. V. 42 N 11. Pp. 87-105.

5.1. Долговременное изменение блеска и цвета звезды Ae/Be Xepбига - молодой переменной звезды неправильного типа V645 Cyg

Переменность V645 Суд была открыта Хоффмейстером, Рольфс и Анертом в 1950 году [233]. В 1977 году Коэн [234] обнаружил, что положение V645 Суд в пределах 5" совпало с отражательной туманностью и представил по данным спектрофотометрии и спектрополяриметрии три конденсации (NO, N1 и N2 в его обозначениях). Коэн пришел к выводу, что сама звезда, излучение которой отражается конденсациями, является молодой звездой спектрального класса O и, наиболее вероятно, лежит между звездчатым узлом N0 и узлом N1, частично находясь в газовопылевом коконе. Дальнейшие исследования объекта V645 Суд главным образом в инфракрасной области и радиодиапазоне [235–239] обнаружили биполярные газовые потоки, предположительное наличие молекулярного протопланетного диска, наблюдаемого в инфракрасной области и на частототах мазерного излучения NH_3 и H_2O [240]. Зарегистрировано также излучение мазеров на молекулах OH [237]. Различные наблюдения показывают, что V645 Суд — очень сложный и интересный для исследования объект, являющийся областью звездообразования.

Более поздние исследования V645 Суд в средней инфракрасной области показали, что объект, отмеченный как N0, является точечным источником, т.е. молодой звездой, а туманное образование N1, расположенное в пяти угловых секундах северо-западнее его, - это дифузная туманность, тем более, что компонент N0 в 200 раз ярче, чем компонент N1 [241]. Таким образом, стало очевидным, что компонент N0 — это сама звезда V645 Суд, а не просто узел отражающей туманности, такой как N1, как считалось ранее.

Несмотря на общее мнение, что V645 Cyg — молодой звездный объект, до сих пор нет единого мнения о его физических параметрах. Некоторые авторы предпочитают классификацию звезды О-типа (например, Тести и др. [242]), в то время как другие считают его сверхгигантом спектрального класса А (например, Боуи и др. [243]). Расстояние до объекта также оценивается неоднозначно от 3 до 6 килопарсек [241].

Согласно одному из недавних исследований, V645 Cyg [244] - это молодая массивная звезда главной последовательности В-типа, которая недавно вышла из своего газопылевого кокона и уже прошла стадию протозвездной аккреции. Эти молодые звездные объекты редки, потому что они довольно массивны и быстро эволюционируют. Они обычно глубоко погружены в пылевую оболочку и их излучение проявляет себя лишь в инфракрасном (ИК) диапазоне [31]. V645 Cyg – один из немногих объектов такого класса, видимый в оптике. Одной из причин этого является ориентация плоскости околозвездного диска, практически совпадающая с картинной плоскостью [240,244]. Оптические и ИК изображения звезды содержат два поярчания, которые интерпретируются как излучение диска и оболочки [234,239]. Угловой размер ИК изображения увеличивается с длиной волны в ближнем и среднем ИК и уменьшается к миллиметровому диапазону [245]. На основе данных спектроскопии среднего разрешения, Хаманн и Перссон [246] предположили, что эти поярчания могут представлять из себя отраженный свет диска и биполярных потоков.

Исследование изменений блеска V645 Суд проводилось в основном в инфракрасном диапазоне. Имеются только два ряда наблюдений в оптическом диапазоне, это самые первые фотографические наблюдения Хофмейстера и др. [233] 50-х годов прошлого века и Шевченко и др. [247] 1985 — 2000 гг. В работе Мирошниченко и др. [244] на основе анализа фотометрических данных Шевченко и др. [247], полученых в UBVRфильтрах на Майданакской обсерватории, указывается на возможное наличие 8-летнего периода переменности блеска звезды в оптическом диапазоне со средней амплитудой в цвете $V \sim 0.6^m$ и снижение блеска в инфракрасном диапазоне на временах порядка 20 лет. Интерпретируя данные спекл–интерферометрии, авторы [244] разделили изображение звезды в полосе К на две компоненты. Яркая, маленькая кольцевая компонента с радиусом $r \sim 25$ а.е., вероятно, представляет из себя излучение диска вблизи сублимационного фронта. Вторая компонента ($r \sim 250$ a.e.) может соответствовать излучению внутренней части оболочки, но, как подчеркнули авторы, нельзя исключить и, например, свечение отраженного света на границе области каверны, образованной биполярными потоками.

Поскольку фотометрические наблюдения V645 Суд в оптическом диапазоне проводились очень редко, а последние из них датируются 2000 годом, то проведение новых наблюдений было крайне полезно, хотя бы в плане подтверждения периодического изменения блеска, обнаруженного Мирошниченко и др. [244].

Оптические фотометрические наблюдения переменной V645 Cyg, проводились в течение 111 ночей с апреля 2009 по декабрь 2018 года на телескопе-рефлекторе A3T-3 (D = 0.45 м, F = 2.0 м), а с декабря 2018 по апрель 2022 года на телескопе AstroSib 500RC (D = 0.5 м, F = 4.0 м) Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального универ-



Рис. 5.1. Кривая изменения блеска V645 Суд в фильтре V — кружки и разностей блеска звезд сравнения и контрольной — треугольники. В верхней части рисунка приведено усредненное за весь период наблюдений значение разностей блеска звезды сравнения и контрольной звезды, а также значение средней квадратичной ошибки.



Рис. 5.2. Кривая изменения блеска V645 Суд в фильтре R. Обозначения теже, что и на Рис. 5.1.



Рис. 5.3. Кривая изменения блеска V645 Суд в фильтре I. Обозначения теже, что и на Рис. 5.1.

ситета. Наблюдения проводились в фильтрах VRI, реализующих систему, близкую к системе Джонсона-Казинса, с использованием ПЗС-камер Alta U6 фирмы Apogee с чипом Kodak KAF-1001E (1024 × 1024, 24 мкм) и с 2015 года PL A230 фирмы FLI с чипом E2V CCD230-42 (2048 × 2048, 15 мкм) В качестве звезд сравнения и контрольной звезды в непосредственной близости от переменной были выбраны две звезды, данные о которых приведены во второй и третьей строках табл.5.4, которая приведена в разделе 5.3 данной главы. После проведения фотометрической обработки, включающей в себя операции вычитания темновых кадров, деления на кадры плоского поля и определения блеска звезд методом апертурной фотометрии, было получено 111 усредненных за ночь значений разностей блеска V645 Суд и звезды сравнения в фильтре V, 96 значений в фильтре R и 58 значений в фильтре I. Апертура выбиралась таким образом, чтобы включать в себя все изображения звезды в данном фильтре (структуры N0 и N1).

Полученные за 13-летний период наблюдений кривые изменения блес-



Рис. 5.4. Кривая изменения разностей показателей цвета V - R V645 Суд и звезды сравнения. — кружки и разностей показателей цвета звезд сравнения и контрольной — треугольники. В верхней части рисунка приведено усредненное за весь период наблюдений значение разностей показателей цвета звезды сравнения и контрольной звезды, а также значение средней квадратичной ошибки.



Рис. 5.5. Кривая изменения разностей показателей цвета R - I V645 Cyg и звезды сравнения. Обозначения те же, что и на Рис. 5.4.

ка V645 Суд приведены на рис. 5.1, рис. 5.2 и рис. 5.3. Таблицы данных приведены в Приложении 2 и Приложении 3, а также их можно найти в работе Горды и др. [248]. Как можно видеть, наряду с изменениями блеска V645 Суд с амплитудами от нескольких сотых до десятых долей звездной величины на интервалах времени от суток до нескольких месяцев, на всем протяжении наших наблюдений, порядка 13 лет, наблюдался систематический рост блеска звезды. В тоже время блеск звезды сравнения, как можно видеть на рис. 5.1, рис. 5.2 и рис. 5.3, оставался практически неизменным в пределах погрешностей наблюдений. В то время как среднее значение блеска V645 Суд в фильтре V выросло за 13 лет на $\sim 1.0^m$, в фильтре R на $\sim 1.4^m$ и в фильтре I на $\sim 2.0^m$. Можно отметить, что наряду с увеличением блеска наблюдается и покраснение звезды, что отчетливо видно на графиках изменения показателей цвета V - R и R - I со временем, см. рис. 5.4 и рис. 5.5, соответственно. За весь период наблюдений значение показателя цвета V - R увеличилось на $\sim 0.3^m$, а R - I на $\sim 0.6^m$.

Изменение блеска в оптическом диапазоне в пределах ~ 0.5^m наблюдалось и ранее в данных, полученных Шевченко и др. [247] (см. работу Мирошниченко и др. [244]). Однако в той же работе отмечается, что показатели цвета V - R, а также B - V и U - B оставались стабильным в пределах 0.1^m , что существенно меньше амплитуды изменения значений, полученных по наблюдениям автора в Коуровской обсерватории. Также не было обнаружено какой-либо цикличности в изменениях блеска V645 Суg, тем более с периодом 8 лет, которая найдена Мирошниченко и др. [244] в наблюдениях Шевченко и др. [247]. По всей видимости, циклическое изменение оптического блеска этой звезды возникает только в течение определенного интервала времени и не является постоянным явлением.

5.2. Новые переменные звезды с большим инфракрасным избытком в ближайшей окрестности V645 Суд

В процессе выполнения полуторагодичного фотометрического мониторинга молодой аккрецирующей переменной V645 Суд, проведенном автором в Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета, был получен большой массив ПЗС-кадров в фильтрах V и R_c окрестностей этой звезды. Все снимки были получены на телескоперефлекторе АЗТ-3 (D = 0.45 м, F = 2.0 м) с использованием ПЗС-камеры U6 Apogee (1024х1024, 24 мкм) и содержат участки неба размером 40' × 40' с центрами приблизительно в районе звезды V645 Суд, включающие область звездообразования, содержащую ряд малоисследованных IR-источников.

Целью данного исследования был поиск других молодых звездных объектов (YSO) в окрестности V645 Cyg, которые образовались одновременно с этой массивной молодой звездой, которая недавно «выбралась» из своего прародительского газо-пылевого кокона. В настоящее время нет сведений о наличии молодых звездных объектов в окрестности V645 Cyg. Это вызывает удивление, поскольку в настоящее время считается, что массивные звезды редко образуются по одиночке [31].

В данном исследовании рассматривались молодые объекты, расположенные в поле не далее 15' от V645 Суg. Как известно, молодые звездные объекты характеризуются повышенным значением блеска в инфракрасной области по сравнению со звездами Главной Последовательности. Объекты для исследования отбирались по ряду критериев. Во-первых, это звезды, имеющие инфракрасный показатель цвета $H - K_s > 0^m.3$ по каталогу 2MASS. Далее, поскольку в данной области много звезд, более далеких, чем V645 Суg, отбирались объекты не слабее $K_s < 11^m$. Только один объект (2MASS 21385638+5012061) был исключен из этого правила и был включен в список, поскольку имел большой красный показатель цвета $V - R = 1^m.98$ по данным каталога NOMAD1. Мы не вводили каких-либо строгих критериев для инфракрасных индексов цвета, чтобы избежать возможного устранения Орионовых переменных типа IN и др. Некоторые молодые переменные звезды этого типа имеют цвета 2MASS, близкие к звездам главной последовательности, и имеют хорошие шансы быть связанными с массивной молодой переменной V645 Cyg. Еше одним критерием отбора кандидатов было ограничение на блеск в цвете $R < 14^m$. Последний критерий был необходим для получения точности оптической фотометрии выбранных объектов не хуже $\pm 0^m.01$, поскольку ПЗС-кадры были получены со временем экспозиции, необходимым для получения хорошей фотометрии V645 Cyg, имеющей блеск $m_R \sim 13^m$. Тем не менее, в список были включены 3 более слабых объекта, фотометрическая точность которых оказалась достаточно хорошей.

Всего для исследования были отобраны 14 звезд. Звезда V645 Суд также была включена в этот список, поскольку удовлетворяет всем критериям отбора. Кроме V645 Суд в список входят еще две звезды из каталога точечных источников IRAS, остальные звезды имеют значительные избытки красного показателя цвета.

Один из IRAS источников (IRAS 21377+4955, 2MASS 21392977+5009286) был идентифицирован как углеродная звезда в книге Алкснисов [251], с подозрением на переменность блеска (NSV 25721). Список IRAS источников и звезд в порядке возрастания прямого восхождения приведен в табл. 5.1. Обозначения звезд приведены по каталогу 2MASS. Для каждой исследуемой звезды в ближайших окрестностях (r < 5') подбирались три звезды сравнения, см. табл. 5.1.

Значения разностей блеска исследуемых звезд относительно звезд сравнения определялись в программе Muniwin:

(http://c-munipack.sourceforge.net). Затем были вычислены усредненные за ночь значения разностей блеска каждой звезды относительно трех звезд

	Объекты	Объекты			Звезды сравнения (2MASS)		
N	2MASS	m_V	m_R	C_1	C_2	C_3	
1	$21395825 {+} 5014209$	$\sim \! 13$	$\sim \! 12$	21401743 + 5013545	21395248 + 5015526	$21393905 {+} 5012016$	
	(V645 Cyg)						
2	$21392977 {+} 5009286$	14.31	12.36	$21393905 {+} 5012016$	21394305 + 5010491	$21393643 {+} 5008273$	
	(IRAS 21377+4955)						
3	21404646 + 5016489	12.61	10.72	$21403765 {+} 5016258$	$21405102 {+} 5017094$	$21394758 {+} 5017008$	
	(IRAS 21389+5003)						
4	$21385638 {+} 5012061$	15.53	13.55	21391128 + 5011193	$21385214 {+} 5011225$	$21384244 {+} 5012131$	
5	$21390639 {+} 5004544$	13.01	11.15	$21384996 {+} 5007368$	21391834 + 5003325	$21390691 {+} 5003206$	
6	$21393188 {+} 5006596$	16.00	14.75	$21394160 {+} 5009340$	$21393870 {+} 5006470$	$21391935 {+} 5008547$	
7	$21402043 {+} 5020007$	15.04	13.84	21403180 + 5019153	$21403029 {+} 5017160$	$21401798 {+} 5022063$	
8	$21403143 {+} 5021300$	15.73	14.51	$21401858 {+} 5022036$	21403180 + 5019153	$21405252 {+} 5022075$	
9	$21403966 {\pm} 5010088$	16.04	14.29	$21404627 {+} 5010344$	$21404549 {+} 5007301$	$21403186 {+} 5009173$	
10	$21404091 {+} 5013584$	13.24	11.33	$21410979 {+} 5012361$	$21403765 {+} 5016258$	$21404271 {+} 5010334$	
11	$21410408 {+} 5010083$	12.90	11.60	$21410979 {+} 5012361$	$21410818 {+} 5008461$	$21404271 {+} 5010334$	
12	$21410428 {+} 5014152$	14.41	12.88	$21411409 {+} 5016534$	$21405102 {+} 5017094$	$21410979 {+} 5012361$	
13	21410943 + 5018008	11.38	10.51	$21411409 {+} 5016534$	21410645 + 5017483	$21412779 {+} 5018164$	
14	$21411121 {+} 5010380$	13.91	12.83	$21410818 {+} 5008461$	$21410979 {+} 5012361$	$21412626 {+} 5009326$	

Таблица 5.1. Список выбранных объектов и звезд сравнения. Звездные величины взяты из каталога NOMAD1.

сравнения. Полученные для каждой звезды разности блеска усреднялись. Перед этим в усредняемые разности блеска вносились аддитивные добавки, соответствующие разностям блеска звезд сравнения, для приведения их значений к блеску одной звезды сравнения (звезда C1 в табл. 5.1).

Для определения степени переменности блеска исследуемых звезд мы использовали простой критерий, аналогичный по смыслу индексу Стетсона [252]. А именно, рассматривали отношение средней квадратичной ошибки (rms) разброса разностей блеска исследуемых звезд и rms разностей блеска звезд сравнения за весь период наблюдений. В данном случае rms разностей блеска звезд сравнения характеризовала точность определения блеска исследуемых звезд. За критерий наличия переменности блеска мы приняли стандартный критерий 3σ , т.е. если rms разностей блеска исследуемой звезды больше утроенного значения rms разностей блеска звезд сравнения в обоих фильтрах, переменность блеска звезды можно считать зарегистрированной. Результаты приведены в табл. 5.2 и табл. 5.3. Для до-

					V		R	V	R
Ν	2MASS	IRAS	NSV	σ_{var}	σ_{com}	σ_{var}	σ_{com}	$\sigma_{var}/\sigma_{com}$	$\sigma_{var}/\sigma_{com}$
1	$21392977 {+} 5009286$	$21377 {+} 4955$	25721	0.104	0.009	0.093	0.006	11.2	16.0
2	$21404646 {+} 5016489$	21389 + 5003		0.265	0.015	0.190	0.008	17.5	23.8
5	$21390639 {+} 5004544$			0.217	0.013	0.237	0.010	16.5	23.7
8	$21395825 {+} 5014209$			0.097	0.011	0.077	0.009	8.8	8.6
9	$21400943 {+} 5018008$			0.047	0.008	0.063	0.004	5.8	15.2
12	$21403966 {+} 5010088$			0.187	0.007	0.090	0.006	25.9	15.6

Таблица 5.2. Переменные звезды.

Таблица 5.3. Не переменные звезды.

		V		R		V	R
Ν	2MASS	σ_{var}	σ_{com}	σ_{var}	σ_{com}	$\sigma_{var}/\sigma_{com}$	$\sigma_{var}/\sigma_{com}$
3	$21360711 {+} 5006209$	0.008	0.018	0.006	0.009	0.5	0.6
4	$21385675 {+} 5012030$	0.042	0.022	0.013	0.010	1.9	1.3
6	$21393188 {+} 5006596$	0.028	0.017	0.023	0.011	1.7	2.1
7	$21394004 {+} 5013585$	0.015	0.011	0.007	0.009	1.4	0.8
10	$21402043 {+} 5020007$	0.039	0.013	0.056	0.011	3.0	5.1
11	$21403143 {+} 5021300$	0.028	0.010	0.014	0.008	2.7	1.8
13	$21404091 {+} 5013584$	0.008	0.009	0.015	0.006	0.9	2.4
14	$21410408 {+} 5010083$	0.016	0.010	0.013	0.007	1.5	1.9
15	$21410428 {+} 5014152$	0.018	0.011	0.016	0.008	1.6	2.0
16	$21411121 {+} 5010380$	0.016	0.012	0.014	0.009	1.3	1.6

казательства того, что выбранные звезды сравнения не являются переменными, в таблицах наряду со значениями отношений rms приведены значения rms, как для исследуемых звезд (σ_{var}), так и для звезд сравнения(σ_{com}). Можно заметить, что σ_{com} в среднем не превышает величины 0^m.01. Можно заметить, что для нескольких исследуемых звезд точность определения блеска в фильтре V почти в два раза хуже, чем в фильтре R. Это связано с тем, что блеск этих красных звезд больше в фильтре R.

Как можно видеть (см. табл. 5.2 и 5.3), критерию 3σ удовлетворили только 6 звезд,включая V645 Cyg, остальные за одним исключением значимой переменности блеска не показали. Для звезды 2MASS 21402043+5020007 (N7) критерий на переменность выполняется только в одном фильтре R_c , поэтому переменность ее блеска находится под сомнением. Анализ изменений блеска в течение отдельных ночей этих новых переменных звезд и V645 Cyg показал, как хаотические колебания, так и монотонные повышения или ослабления блеска. Наблюдались пиковые изменения небольшой амплитуды. Полученные данные изменений блеска этих шести звезд были проверены на периодичность. Как и ранее (см. более ранние разделы), применялся метод Лафлера - Кинмана, реализованный в программе Горанского WINEFK (http://variablestars.ru/FILES/winefk.rar). Изменения блеска всех обнаруженных переменных звезд оказались апериодическими.

Для двух источников IRAS 21377+4955 и IRAS 21389+5003 была обнаружена переменность блеска неправильного типа с амплитудами до $0^m.8$. Причем для источника IRAS 21389+5003 переменность блеска обнаружена впервые, а для источника IRAS 21377+4955 впервые получены оценки блеска на интервале времени в 1.5 года, с применением фотоэлектронного приемника излучения – ПЗС матрицы в двух фильтрах V и R_c. Ранее были получены только фотографические оценки блеска этой звезды [251]. Показатели цвета IRAS 21377+4955 и IRAS 21389+5003 в далекой инфракрасной области характерны для объектов YSO. Их яркость, как точечных источников, согласно обзору WISE увеличивается с длиной волны ($\lambda_{max} = 22$ мкм). Тем не менее, значения показателей цвета и переменность неправильного типа не могут быть доказательством того, что они точно являются объектами YSO. Например, источник IRAS 21377+4955 был идентифицирован Алкснисами [251], как углеродная звезда на основе фотографического спектра в красной области, однако других углеродных звезд в этой обласи они не нашли. Поэтому для определения природы источника необходимо проведение дополнительного спектрального исследования. В данном исследовании была обнаружена фотометрическая переменность неправильного типа IRAS источников.

Изменение блеска такого же типа было обнаружено и у других трех



Рис. 5.6. Кривые блеска переменных IRAS источников. Барами обозначены величины среднеквадратического разброса значений блеска за ночь.

звезд, идентифицированных как новые переменные, а так же у V645 Cyg. Амплитуды изменения блеска $\Delta m = |m_{max} - m_{min}|$ приведены ниже:

- $\Delta m \sim 1^m . 0 2$ MASS 21390639+5004544 (N 5),
- $\Delta m \sim 0^m . 9 2$ MASS 21403966+5010088 (N 9),
- $\Delta m \sim 0^m .3 2$ MASS 21410943+5018008 (N 13),
- $\Delta m \sim 0^m.4 2$ MASS 21395825+5014209 (V645 Cyg).

Кривые блеска 5-ти новых переменых звезд и V645 Суд в фильтрах V и R_c приведены на рис. 5.6, рис. 5.7 и рис. 5.8.

Таким образом, в ходе настоящего исследования было обнаружено 4 новых переменных звезды в 15' окрестности молодой массивной переменной звезды V645 Cyg и подтверждена переменность одной звезды, заподозренной в переменности блеска. Все эти звезды проявляют переменность неправильного типа и имеют большие значения показателей цвета в инфракрасной области, характерные для молодых звездных объектов. Ам-



Рис. 5.7. Кривые блеска звезд 2MASS 21410943+5018008 (N13, слева) и 2MASS 21403966+5010088 (N9, справа). Барами обозначены величины среднеквадратического разброса значений блеска за ночь.



Рис. 5.8. Кривые блеска звезд 2MASS 21390639+5004544 (N 5, слева) и V645 Суд (справа). Барами обозначены величины среднеквадратического разброса значений блеска за ночь.

плитуды изменения блеска вновь обнаруженных переменных аналогичны амплитудам Орионовых переменных типа IN. Согласно данным Общего Каталога Переменных Звезд (ОКПЗ), изменения блеска этого типа переменных в диапазоне от 0.5 до 1-2 звездных величин происходят на шкале времени от нескольких десятков до сотен дней. Окончательный вывод о природе вновь открытых переменных звезд можно сделать только после получения высококачественных спектров этих объектов.

5.3. Параметры и эволюционный статус новой затменной переменной звезды 3UC 281-203711 (V3157 Cyg)

В процессе поиска звезд сравнения во время проведения фотометрического мониторинга молодой массивной переменной звезды неправильного типа V645 Cyg автором была открыта новая переменная звезда 3UC 281-20371 [253] $V = 12.^{m}4$. Наблюдения проводились в V и R_c фильтрах. Характеристики телескопа и приемной аппаратуры указаны в предыдущем параграфе. Первый раз уменьшение блеска 3UC 281-203711 на $0.^{m}08$ было зарегистрировано в ночь на JD 2454966.30. Поисковая карта и таблица данных кривых блеска приведены в работе Горды и Соболева [253]. Координаты новой переменной звезды и звезд сравнения даны в табл. 5.4.

Обработка ПЗС-кадров производилась в программе Muniwin. Точность оценки блеска, найденная по разностям блеска звезды сравнения и контрольной в течение отдельной ночи за весь период наблюдений, была в пределах $\pm 0.^{m}003 - \pm 0.^{m}007$.

За время наблюдений с 2009 г. по 2011 г. был зарегистрирован один момент минимума $HJDI_{min} = 2455543.1338$, найденный по наблюдениям одной ночи, состоящий из: нисходящей ветви кривой блеска, всего нижнего плато и значительной части восходящей ветви. Предварительная оценка периода, приведенная в [253], основывалась на данных наблюдений, охватывающих части главного минимума: четыре нисходящие ветви, дополнен-

Название звезды	$\alpha(2000)$	$\delta(2000)$	m_V
3UC 281-203711 (переменная)	21 39 52.4	+50 18 27	12.40
3UC 281-203713 (сравнения)	21 39 52.4	+50 15 55	12.60
3UC 281-203646 (контрольная)	21 39 47.6	+50 17 03	12.22

Таблица 5.4. Координаты новой переменной звезды и звезд сравнения.

ные небольшими участками нижнего плато (уменьшение яркости на $0.^{m}08$) и две части нижнего плато, дополненные восходящими ветвями (увеличение яркости на такую же величину).

Звезда 3UC 281-203711 оказалась затменной системой. Форма кривой блеска относится к типу Алголя, но с ярко выраженными эффектами эллипсоидальности. По форме кривой блеска переменную можно отнести и к типу β Лиры. Главный минимум, значительно глубже вторичного минимума. Значения глубин минимумов примерно одинаковы в обоих цветах и равны 0.^m103 и 0.^m030 для главного и вторичного минимумов, соответственно. В нижней части главного минимума наблюдается плато, указывающее на то, что одно из затмений полное (см. рис.).

Решение кривой блеска проводилось с помощью уже упоминавшегося в предыдущих главах пакета PHOEBE с графическим интерфейсом для Windows. Поскольку о физической природе компонентов этой новой затменно-двойной системы ничего не было известно, начальные значения физических параметров выбирались, исходя из данных , полученных из анализа кривых блеска, а именно, значений периода, отношения поверхностных яркостей компонентов, отношения радиусов компонентов и их относительных размеров. Эти величины определялись по форме, глубине и продолжительности главного минимума в рамках гипотезы полного затмения. Начальные значения температур соответствующие спектральному классу F0. Оценка спектрального класса основана на значениях блеска 3UC 281-203711 в оптическом и инфракрасном диапазонах, взятых из каталога NOMAD. Начальные значения отношения масс компонентов и большой полуоси орбиты выбирались из предположения, что оба компонента принадлежат главной последовательности.

Определение элементов орбит и физических параметров компонентов проводилось с одновременным использованием данных как V, так и Rфильтров. В результате предварительного решения было установлено, что полное затмение происходит во вторичном, неглубоком минимуме. Во время главного минимума меньшая по размеру и более холодная звезда проходит перед большим и более горячим компонентом, полностью проецируясь на его поверхность в моменты времени, близкие к середине затмения.

Для вычисления физических параметров системы в пакете PHOEBE необходимо знать значение большой полуоси взаимной орбиты, (расстояние между центрами масс компонентов). Эта величина не влияет на кривую блеска и поэтому не может быть оценена по нашим данным. Ее значение было принято равным $a = 9R_{\odot}$ (обсуждение этого значения см. ниже).

Для вычисления физических параметров системы требуется также знание значения еще одного параметра - отношения масс компонентов q. Этот параметр слабо влияет на форму кривой блеска и требуются некоторые усилия для его определения. Поэтому был получен ряд решений для ряда фиксированных значений q = 0.2, 0.3, ...0.8. При этом, остальные параметры оставлись свободными. Как и ожидалось, не наблюдалось значительных систематических отклонений теоретических кривых блеска (т.е. превышающих погрешности наблюдений) от точек наблюдений из-за варьирования значения q в интервале 0.3 - 0.6. Вычисления с освобожденным параметром q показали, что значения $q \sim 0.5$ обеспечивают наилучшую аппроксимацию данных наблюдений теоретической кривой блеска.

Для выбора допустимых значений большой полуоси затменной системы применялся критерий близости значений эффективных температур, масс и радиусов компонентов к значениям соответствующих параметров звезд главной последовательности. Было найдено, что при значениях a из диапазона $8R_{\odot} - 10R_{\odot}$ найденные параметры вторичной компоненты (масса, радиус, эффективная температура) соответствуют звезде главной последовательности спектрального класса K0 - K3. Поэтому было выбрано значение большой полуоси затменно-двойной системы 3UC 281-203711 равное $a = 9R_{\odot}$.

В то же время принятое значение параметра *a* не приводит к общему соответствию физических параметров главного, более массивного и яркого компонента звезде Главной Последовательности. Если выбирать оценки спектрального класса из диапазона $A0 \div F0$, значения радиуса звезды для заданной массы и температуры во всех случаях оказываются завышены. Скорее всего, это отражает тот факт, что звезда не принадлежит Главной Последовательности. Возможно, она является субгигантом или начинает уход с Главной Последовательности в сторону субгиганта.

Значения фотометрических параметров и абсолютные значения параметров компонентов 3UC 281-203646 с принятым значением $a = 9R_{\odot}$ приведены в табл. 5.5 и табл. 5.6, соответственно. Точность оценок параметров решений кривых блеска отражает разброс значений a и q в диапазонах $8R_{\odot} - 10R_{\odot}$ и 0.4 – 0.6, соответственно. Более точное значение периода для этой затменной системы было получено в процессе решения кривых блеска. Новая эфемеридная формула приведена ниже:

$$JD_{\odot}I_{min} = 2454966.4565 + 1.948234 \cdot E. \\ \pm 8 \qquad \pm 11$$

Аппроксимация кривых блеска в V и R фильтрах, построенных по данным наблюдений, теоретическими кривыми приведена на рис. 5.9, а на рис. 5.10 приведены разности O - C и показателя цвета V - R в зависимости от фотометрической фазы. Как можно видеть, аппроксимация наблюдений теоретическими кривыми блеска хорошая. На кривых O - Cне замечается систематических отклонений от соответствующих прямых в

Таблица 5.5. Относительные параметры новой затменной переменной звезды 3UC 281-203711 (V3157 Cyg).

k	0.257 ± 0.010	i	$81^{\circ}.2\pm0^{\circ}.5$
r_1	0.294 ± 0.008	q_{phot}	0.49 ± 0.11
$r_{1(pole)}$	0.289	j_{1}/j_{2}	15.8 ± 1.4
$r_{1(point)}$	0.302	L_1	0.996 ± 0.001
$r_{1(side)}$	0.294	L_2	0.004 ± 0.001
$r_{1(back)}$	0.299		
r_2	0.076 ± 0.002		

Таблица 5.6. Оценки абсолютных параметров новой затменной переменной звезды 3UC 281-203711 (V3157 Cyg)

a/R_{\odot}	9.0 ± 1.0	R_1/R_{\odot}	2.65 ± 0.30
$T_{eff1}(K)$	9800 ± 100	R_2/R_{\odot}	0.68 ± 0.08
$T_{eff2}(K)$	4900 ± 80	L_1/L_{\odot}	21.85 ± 0.08
M_1/M_{\odot}	1.74 ± 0.57	L_2/L_{\odot}	0.09 ± 0.02
M_2/M_{\odot}	0.85 ± 0.28		

пределах разброса точек. Это показывает, что значения параметров этой новой затменной переменной системы были найдены с достаточной степенью точности.

Хорошо выраженные на кривых блеска максимумы яркости на фазах $\varphi = 0.25$ и $\varphi = 0.75$ свидетельствуют о том, что более массивный, крупный и яркий главный компонент немного искажен приливными деформациями от гравитационного влияния соседа. Это может быть связано с достаточно большим значением его радиуса и относительно большим отношением масс компонентов q = 0.5. На рис. 5.10 (нижняя кривая) видно, что показатель цвета системы не меняется с фазой в пределах точности наблюдений. Это находит естественное объяснение в том, что, поскольку отношение радиусов и поверхностных яркостей главного и вторичного компонентов доста-



Рис. 5.9. Кривые блеска новой переменной звезды 3UC 281-203711 (V3157 Cyg) в V и R фильтрах; кружки - наблюдения; непрерывная линия - теоретическая кривая блеска.

точно высоки $(r_1/r_2 \sim 4$ и $j_1/j_2 \sim 16$, см. табл. 5.5), светимость главного компонента превышает светимость вторичного компонента более чем в 200 раз. Поэтому вклад блеска вторичного компонента в общий блеск системы минимален.

Качество наблюдательных данных и наличие полного затмения в системе позволили получить оценки относительных фотометрических элементов с небольшими погрешностями. При этом абсолютные параметры системы были найдены с относительно низкой точностью. Причиной этого является большая неопределенность в значении большой полуоси относительной орбиты *a*, которую можно определить только из данных спектральных наблюдений этой звезды.

На рис. 5.11 показана конфигурация системы, соответствующая полученному решению. Видно, что ни один из компонентов 3UC 281-203711 не заполняет свою полость Роша. Следовательно, эта система представляет



Рис. 5.10. Разности O - C между полученными из наблюдений и теоретическими кривыми блеска и показатель цвета V - R новой затменной переменной 3UC 281-203711 (V3157 Cyg).



Рис. 5.11. Конфигурация системы 3UC 281-203711 (V3157 Cyg) в полярной плоскости. Значками плюс показаны центры масс компонентов; непрерывной линией - поверхности звезд; пунктирными линиями - поверхности Роша; жирная точка - первая точка Лагранжа L_1 ; ромб - центр масс системы.

собой разделенную тесную двойную систему. Главный компонент, вероятно, является субгигантом. В будущем он заполнит свою полость Роша. В этом случае после начала фазы обмена массой, т.е. перетекания массы с поверхности главного компонента на менее массивный компонент значение *q* увеличится и система может стать классическим Алголем. Обновленные фотометрические данные 3UC 281-203711 по сравнению с данными из статьи [123] приведены в работе [254].

5.4. Обсуждение результатов и выводы

Данные, полученные автором во время проведения тринадцатилетних фотометрических наблюдений молодой переменной звезды неправильного типа V645 Cyg, по существу, являются вторым мониторинговым рядом, полученным в оптическом диапазоне в процессе исследования данной звезды на основе применения современных приемников излучения. В данный период наблюдений в отличие от результатов ранее проведенного оптического мониторинга V645 Cyg (см. Шевченко и др. [247]), наряду с изменениями блеска наблюдалось и существенное изменение показателей цвета в сторону увеличения покраснения звезды.

На основе результатов данного ряда наблюдений, а также данных, полученных в это же время в инфракрасной области излучения [249], можно сделать ряд заключений о причинах таких изменений блеска и цвета V645 Cyg, которые более подробно изложены в совместной с соавторами работе [248]. Так, наблюдаемые изменения излучения и цвета могут быть обусловлены изменением угла наклона плоскости диска за счет прецессионного вращения, в процессе которого горячие структуры во внутренней области диска оказываются в большей степени видны наблюдателю. Другой возможный сценарий, объясняющий переменность в оптике и ИК, может быть аналогичен приведенному в работе [250], а именно, во внутренней области диска до радиуса сублимационного фронта может распространяться спиральная волна плотности, образование которой может быть связано с кратностью системы. Вблизи поверхности звезды на конце спиральной волны существует слой горячего газа. В процессе вращения этот нагретый слой оказывается на луче зрения, горячее вещество может приближаться к газопылевым неоднородностям на внутренней границе диска и нагревать их. И наконец, третьей причиной проявления наблюдаемых изменений блеска и цвета V645 Cyg в наблюдаемый период может быть дальнейшее рассеивание газо-пылевого кокона, окружающего звезду, в результате которого излучение из внутренних, нагретых излучением звезды, областей пылевой оболочки становится в большей степени видно.

В процессе исследования V645 Суд в ближайшей ее окрестности автором совместно с соавторами было открыто несколько новых переменных звезд, в частности пять переменных звезд неправильного типа переменности, имеющих значительные избытки цвета в инфракрасной области. Они были предположительно интерпретированы, как молодые звездные объекты. Точный тип этих объектов может быть установлен только после исследования их спектров. Поэтому, причислять их к типу молодых объектов можно с очень большой осторожностью.

Открытая автором в процессе выбора звезд сравнения для исследования V645 Cyg новая переменная звезда, оказавшаяся затменной переменной типа Алголя (по форме кривой блеска), была достаточно подробно исследована на основе полученного обширного наблюдательного материала - ПЗС-кадров области V645 Cyg. Наличие в изменении блеска этой тесной двойной системы участка полного затмения позволило с достаточной степенью точности оценить отношение радиусов компонентов, а также и отношение их масс, в предположении, что оба компонента находятся на или вблизи Главной Последовательности. Как оказалось, система не является классическим Алголем, поскольку менее массивный и более холодный компонент имеет и меньшие размеры, т.е. не является субгигантом, как в классических Алголях. Сделан вывод о том, что в процессе эволюционного развития система станет классическим Алголем.

Вклад соискателя:

В работах с соавторами по теме данной главы раздела 5.3 автору принадлежит постановка задачи, в остальных, в том числе и в разделе 5.3, получение и обработка наблюдательных данных, обсуждение результатов в равной степени с соавторами.

5.5. Положения, выносимые на защиту

По результатам пятой главы на защиту выносятся следующие положения:

- Сделан вывод об увеличении потока излучения от нагретых областей пылевых структур, окружающих молодую массивную звезду типа Ae/Be Xepбига V645 Cyg, например, уменьшении плотности остатков пылевого кокона, сделанный на основе увеличения блеска и покраснения данного объекта, обнаруженных по результатам многолетних фотометрических наблюдений данной звезды автором.
- Обнаружены в ближайшей окрестности молодой массивной звезды типа Ae/Be Xepбига V645 Cyg пять новых переменных звезд с неправильным типом переменности, имеющими большие инфракрасные избытки цвета и, возможно, являющиеся молодыми объектами.
- Обнаружена новая переменная звезда ЗUC 281-20371. Установлено на основе анализа кривых блеска и определения физических параметров, что звезда является тесной двойной системой, вероятно, относящейся к типу пред-Алголей. В 2021 году она была занесена в Общий Каталог Переменных Звезд под обозначением V3157 Суд.
Заключение

На основе новых фотометрических, спектральных и спеклинтерферометрических данных, полученных автором либо с его участием, проведено комплексное исследование ряда тесных двойных систем, в результате которого были получены новые данные о физических параметрах, эволюционном статусе и структуре этих ТДС.

В частности, на основе спектральных данных, полученных автором, найдены новые значения масс компонентов тесной двойной системы с массивными компонентами ранних спектральных классов UU Cas. Сделан вывод о новом эволюционном статусе системы. Подтверждено наличие газовых структур из-за перетекания вещества с одного компонента на другой, в частности существование плотного газового диска вокруг более массивного компонента.

На основе оригинальных многолетних наблюдений автора обнаружены малоамплитудные циклические колебания внезатменного блеска и малоамплитудные колебания периода маломассивной, короткопериодической затменной переменной звезды AM Leo и новой переменной GSC 3599–2569, относящихся к типу W UMa систем, причиной которых является пятенная активность на поверхности компонентов и вызванные циклическими изменениями магнитного поля системы, аналогично процессу Солнечной активности.

Построены эмпирические зависимости между фундаментальными параметрами звезд по данным РГП систем, которые используются в исследованиях звезд различных типов уже более 20-ти лет.

В дальнейшем автор предполагает продолжить исследования тесных двойных систем, в частности, получить спектральный наблюдательный ма-

териал для ряда широких тесных двойных систем, компоненты которых не находятся в синхронном вращении с орбитальным периодом и эволюционируют практически независимо друг от друга, с целью определения физических параметров компонентов масс, радиусов, температур и др. для построения эмпирических зависимостей между ними. Данная работа будет проводиться по предложению и совместно с сотрудником ИНАСАН О. Ю. Малковым.

Также предполагается продолжить исследование тесных двойных систем с массивными компонентами ранних спектральных классов, находящихся на конечной стадии первоначального обмена масс с целью определения структуры газовых потоков методом допплеровской томографии. Данная работа будет прводиться совместно с сотрудником ИНАСАН Д .А. Кононовым и сотрудником Коуровской обсерватории С. Ю. Парфеновым.

По предложению сотрудника Белградской астрономической обсерватории Гойко Джурасевича предполагается провести совместное исследование ТДС UU Cas на базе имеющихся кривых блеска, в том числе и кривой блеска, полученной автором на основе собственных наблюдений, с целью определения временных закономерностей в изменении блеска этой системы.

Предполагается также продолжить по инициативе сотрудника Коуровской обсерватории А. М. Соболева спектральное исследование ряда молодых звездных объектов типа V645 Суд.

Приложение 1

Таблица 1.1. Лучевые скорости компонентов SZ Cam. Телескоп Цейсс 1000, САО РАН.

		HeI	4922	HeI	5016	HeI 5	5876
JD	фаза	$V_r~(\kappa{ m m/c})$	$V_r~(m \kappam/c)$	$V_r~(m \kappam/c)$	$V_r~(m \kappam/c)$	$V_r~(\kappa{ m m/c})$	$V_r~(\kappa{ m m/c})$
2451880 +		Гл. комп.	Втор. комп.	Гл. комп.	Втор. комп.	Гл. комп.	Втор. комп.
6.3710	0.736	183.1 ± 7.7	-273.9 ± 11.6	234.1 ± 14.1	-314.0 ± 12.4	180.5 ± 6.2	_
6.3929	0.744	184.9 ± 6.5	-300.4 ± 5.3	183.9 ± 16.5	-295.4 ± 8.7	188.7 ± 5.8	-
6.4148	0.752	200.8 ± 4.1	-292.7 ± 7.4	158.5 ± 13.5	-199.7 ± 7.7	180.2 ± 6.3	_
6.4370	0.760	171.4 ± 5.9	-282.4 ± 4.6	165.6 ± 8.6	-266.8 ± 13.9	171.6 ± 5.8	-
6.4596	0.769	178.0 ± 5.6	-316.5 ± 4.2	187.7 ± 19.6	-258.6 ± 15.1	177.9 ± 6.3	_
6.4814	0.777	201.1 ± 5.7	-312.2 ± 6.8	104.5 ± 9.8	-279.3 ± 6.7	179.1 ± 5.9	_
6.5033	0.785	174.4 ± 5.2	-301.8 ± 8.0	110.9 ± 7.2	-277.9 ± 5.3	176.0 ± 6.6	-
6.5255	0.793	167.2 ± 8.2	-264.3 ± 8.8	196.3 ± 14.7	-281.8 ± 8.0	175.4 ± 7.7	_
6.5470	0.802	181.1 ± 9.3	-261.7 ± 11.6	170.0 ± 15.5	-291.1 ± 11.6	175.6 ± 9.3	-
7.4971	0.153	-152.2 ± 12.4	173.8 ± 4.6	-157.9 ± 17.8	180.2 ± 9.0	-139.2 ± 12.4	203.3 ± 10.0
7.5193	0.162	-166.9 ± 8.6	184.8 ± 5.6	-154.9 ± 18.1	186.5 ± 12.2	-131.9 ± 16.2	212.4 ± 8.9
7.5415	0.170	-181.4 ± 7.2	185.0 ± 10.0	-168.5 ± 14.8	198.6 ± 8.3	-150.3 ± 16.6	220.1 ± 8.9
7.5641	0.178	-147.2 ± 13.1	198.2 ± 9.9	-191.1 ± 14.2	179.9 ± 9.5	-135.9 ± 20.1	219.1 ± 11.2
7.5860	0.180	-164.4 ± 10.0	170.7 ± 16.2	-204.8 ± 20.1	204.2 ± 16.2	-155.3 ± 7.7	224.2 ± 9.7
9.1752	0.775	195.5 ± 3.9	-308.2 ± 4.1	186.4 ± 6.0	-259.5 ± 5.2	171.4 ± 4.2	-
9.1967	0.783	187.0 ± 3.0	-321.7 ± 2.3	178.4 ± 6.2	-288.6 ± 4.3	_	-
9.2183	0.791	179.7 ± 4.8	-314.7 ± 2.8	174.0 ± 3.6	-300.7 ± 4.6	182.5 ± 4.6	-
9.2398	0.799	205.8 ± 4.4	-299.0 ± 3.0	161.7 ± 3.9	-310.2 ± 3.9	_	-
9.2613	0.807	211.9 ± 4.8	-282.6 ± 3.1	156.7 ± 6.3	-292.9 ± 5.3	178.0 ± 5.4	_
9.2828	0.815	212.4 ± 2.7	-280.7 ± 2.2	167.6 ± 5.8	-282.4 ± 5.4	_	-
9.3044	0.823	211.4 ± 3.1	-273.3 ± 3.2	167.6 ± 4.4	-260.8 ± 3.9	172.1 ± 4.2	-
9.3250	0.831	203.8 ± 2.9	-270.2 ± 3.3	175.2 ± 9.3	-265.4 ± 6.6	168.3 ± 5.8	-

линия	JD_{\odot}	фаза	$V_r~(m \kappam/c)$	$V_r~(m km/c)$	фаза	$V_r~(m km/c)$
HeI	2452950.0 +	SZ Cam	Гл. комп.	Втор. комп.	3-е тело	3-е тело
4009	9.3160	0.358	-147.0 ± 7.2	226.9 ± 3.2	0.764	-19.9 ± 1.7
4026	8.6347	0.106	-131.6 ± 13.3	150.0 ± 5.9	0.520	-7.6 ± 2.3
	9.3160	0.358	-144.1 ± 5.9	202.1 ± 4.1	0.764	-29.0 ± 1.2
	9.5903	0.460	-74.6 ± 15.9	52.6 ± 10.9	0.862	-13.0 ± 4.5
4144	9.3160	0.358	-163.2 ± 3.7	169.3 ± 2.6	0.764	-21.4 ± 1.1
	9.5903	0.460	-76.5 ± 13.4	89.9 ± 5.1	0.862	-15.8 ± 2.3
4388	9.3160	0.358	-168.5 ± 6.0	227.8 ± 1.6	0.764	-28.2 ± 1.0
	9.5903	0.460	-76.7 ± 11.9	59.4 ± 5.1	0.862	-8.9 ± 2.7
4472	8.6347	0.106	-128.0 ± 7.2	135.2 ± 7.5	0.520	0.7 ± 1.8
	9.3160	0.358	-141.9 ± 3.9	207.4 ± 2.8	0.764	-20.8 ± 1.1
	9.5903	0.460	-78.4 ± 8.7	68.9 ± 8.2	0.862	-8.7 ± 2.0
4713	7.3646	0.635	143.4 ± 5.7	-206.5 ± 2.1	0.066	16.1 ± 1.0
	8.6347	0.106	-160.4 ± 3.1	144.9 ± 5.3	0.520	-9.9 ± 1.4
	9.3160	0.358	-97.5 ± 1.5	208.8 ± 2.9	0.764	-29.1 ± 0.8
4922	5.1806	0.825	168.7 ± 2.4	-263.4 ± 2.8	0.285	29.5 ± 1.1
	7.3646	0.635	144.5 ± 2.9	-214.5 ± 5.8	0.066	12.6 ± 0.9
	8.6347	0.106	-124.1 ± 8.6	144.9 ± 2.7	0.520	-3.9 ± 1.4
	9.3160	0.358	-158.5 ± 4.8	176.5 ± 2.8	0.764	-27.5 ± 0.7
	9.5903	0.460	-70.5 ± 5.9	95.8 ± 1.7	0.862	-8.9 ± 1.6
5016	5.1806	0.825	181.9 ± 1.7	-243.5 ± 2.8	0.285	33.5 ± 1.1
	7.3646	0.635	164.5 ± 2.6	-215.3 ± 2.7	0.066	15.9 ± 0.9
5876	7.3646	0.635	146.9 ± 2.6	-207.8 ± 2.1	0.066	37.5 ± 0.7

Таблица 1.2. Лучевые скорости компонентов SZ Cam и третьего тела. 6-м телескоп CAO PAH.

JD_{\odot}	линия	$V_r~(m km/c)$	$V_r~(m \kappam/c)$	$V_r~({ m km/c})$
$(\phi a з a^a)$	HeI	Гл. комп.	Втор. комп.	3-е тело
2456605.5582	4471	125.2 ± 21.3	-109.5 ± 23.8	21.3 ± 6.5
(0.596/0.326)	5015	131.4 ± 14.7	-90.5 ± 24.6	23.0 ± 3.6
	4922	159.1 ± 5.6	-123.9 ± 13.6	26.7 ± 2.4
	5876	123.7 ± 12.6	-103.4 ± 14.9	24.2 ± 2.5
2456618.1964	4388	-167.5 ± 23.2	269.8 ± 6.7	-7.6 ± 4.5
(0.279/0.844)	4471	-170.9 ± 25.0	254.8 ± 10.8	-7.3 ± 8.4
	4922	-179.6 ± 11.8	210.7 ± 10.9	-7.4 ± 5.3
	5015	-185.3 ± 11.0	231.9 ± 8.3	-8.3 ± 4.4
	5876	-179.3 ± 6.3	264.6 ± 8.4	-8.4 ± 2.5
	6678	-198.9 ± 7.5	250.1 ± 8.9	-10.3 ± 3.7
2456687.4423	4922	100.8 ± 9.2	-118.5 ± 19.0	-24.1 ± 4.4
(0.941/0.666)	5015	101.5 ± 12.2	-119.6 ± 19.6	-24.0 ± 7.1
	5876	97.1 ± 8.6	-117.2 ± 15.6	-23.5 ± 5.6
	6678	86.3 ± 14.2	-106.7 ± 25.0	-28.2 ± 14.2
2456710.3476	4922	-106.7 ± 15.5	124.8 ± 17.5	-18.3 ± 3.6
(0.429/0.855)	5015	-117.0 ± 12	144.2 ± 9.3	-20.2 ± 2.1
	5876	-133.8 ± 10.1	124.2 ± 9.3	-20.2 ± 1.7
	6678	-110.1 ± 13.1	125.5 ± 16.4	-20.4 ± 2.7
2456751.3147	4922	157.6 ± 4.5	-154.7 ± 13.6	5.4 ± 2.7
(0.611/0.503)	5015	149.7 ± 6.7	-196.9 ± 11.5	4.1 ± 3.1
	5876	139.2 ± 5.0	-173.9 ± 8.1	-0.3 ± 1.7
	6678	127.5 ± 10.1	-155.3 ± 6.8	-2.7 ± 4.8
2456770.2215	4922	169.4 ± 4.7	-157.1 ± 8.6	33.8 ± 3.0
(0.618/0.262)	5015	171.3 ± 7.1	-182.0 ± 15.5	29.6 ± 3.3
	5876	149.6 ± 10.2	-187.7 ± 8.6	27.1 ± 3.4
	6678	154.9 ± 10.5	-157.06 ± 8.6	31.7 ± 6.1

Таблица 1.3. Лучевые скорости компонентов SZ Cam. 1.2 м телескоп AO Ур
ФУ.

a- SZ Cam/3-е тело

Приложение 2

Таблица 2.1: Усредненные за ночь разности блеска V645 Суд (ΔV) и контрольной звезды (ΔC) относительно звезды сравнения в фильтре V.

Дата	JD-240000	ΔV	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	Ν	
15.04.2009	4937.42857	0.683	0.005	0.001	0.194	0.003	0.001	10	
06.05.2009	4958.33519	0.688	0.009	0.003	0.196	0.007	0.002	9	
13.05.2009	4965.35769	0.790	0.008	0.002	0.201	0.006	0.001	25	
14.05.2009	4966.32331	0.759	0.010	0.002	0.202	0.004	0.001	25	
19.05.2009	4971.35191	0.766	0.006	0.001	0.190	0.005	0.001	25	
20.05.2009	4972.30408	0.795	0.023	0.008	0.204	0.006	0.002	6	
27.05.2009	4979.33769	0.716	0.015	0.003	0.191	0.008	0.002	22	
22.07.2009	5035.34787	0.751	0.009	0.002	0.199	0.004	0.001	30	
23.07.2009	5036.33920	0.682	0.028	0.006	0.198	0.006	0.002	19	
27.07.2009	5040.34753	0.726	0.012	0.002	0.201	0.004	0.001	47	
14.09.2009	5089.28315	0.684	0.012	0.002	0.201	0.003	0.001	43	
15.09.2009	5090.30562	0.739	0.023	0.007	0.206	0.002	0.001	10	
17.09.2009	5092.42973	0.717	0.015	0.003	0.202	0.005	0.001	26	
22.10.2009	5127.31837	0.688	0.009	0.001	0.207	0.007	0.001	42	
16.11.2009	5152.31745	0.726	0.008	0.002	0.201	0.004	0.001	24	
17.11.2009	5153.19977	0.654	0.017	0.003	0.196	0.006	0.001	43	
10.12.2009	5176.25266	0.641	0.017	0.002	0.201	0.005	0.001	30	
21.01.2010	5218.16453	0.736	0.008	0.001	0.196	0.005	0.001	30	
26.01.2010	5223.12589	0.708	0.011	0.002	0.194	0.014	0.001	22	
02.02.2010	5230.13721	0.625	0.015	0.003	0.198	0.006	0.001	24	
06.03.2010	5262.52940	0.810	0.006	0.002	0.198	0.003	0.001	13	
18.03.2010	5274.49065	0.937	0.011	0.004	0.195	0.002	0.001	7	
25.03.2010	5281.47928	0.987	0.009	0.002	0.199	0.005	0.001	13	
продолжение таблицы далее									

	продолжение таблицы 2.1									
Дата	JD-240000	ΔV	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	Ν		
08.04.2010	5295.43740	1.035	0.017	0.004	0.204	0.007	0.002	15		
12.05.2010	5329.36131	0.947	0.009	0.002	0.206	0.017	0.004	19		
13.05.2010	5330.36267	0.875	0.025	0.006	0.208	0.005	0.001	15		
21.07.2010	5399.33910	0.820	0.014	0.002	0.204	0.006	0.001	32		
22.07.2010	5400.33782	0.813	0.015	0.002	0.206	0.004	0.001	43		
04.08.2010	5413.33688	0.763	0.015	0.002	0.211	0.006	0.001	36		
05.08.2010	5414.33714	0.714	0.014	0.002	0.209	0.006	0.001	44		
01.09.2010	5441.31360	0.796	0.009	0.002	0.201	0.004	0.001	43		
02.09.2010	5442.36225	0.812	0.014	0.002	0.201	0.004	0.001	66		
22.09.2010	5462.23904	0.738	0.022	0.004	0.199	0.008	0.002	25		
08.10.2010 5478.29459 0.941 0.010 0.001 0.204 0.005 0.001 79										
20.10.2010	5490.14572	0.873	0.013	0.003	0.214	0.006	0.002	25		
02.12.2010	5533.23815	0.882	0.013	0.002	0.199	0.005	0.001	64		
12.12.2010	5543.19488	0.859	0.018	0.002	0.201	0.004	0.001	70		
13.12.2010	5544.19371	0.801	0.014	0.002	0.199	0.006	0.001	76		
08.01.2011	5570.21433	0.799	0.011	0.002	0.200	0.006	0.001	41		
20.01.2011	5582.13821	0.758	0.013	0.002	0.197	0.006	0.001	31		
27.04.2011	5679.41057	0.625	0.009	0.002	0.200	0.004	0.001	17		
28.04.2011	5680.40164	0.633	0.010	0.002	0.197	0.005	0.001	14		
16.05.2012	6064.39120	0.824	0.015	0.004	0.197	0.008	0.002	11		
26.09.2012	6197.38419	0.639	0.014	0.004	0.205	0.006	0.002	11		
27.09.2012	6198.23936	0.628	0.022	0.005	0.201	0.009	0.003	8		
04.10.2012	6205.24359	0.610	0.008	0.004	0.208	0.004	0.001	28		
10.10.2012	6211.13611	0.654	0.018	0.005	0.209	0.005	0.001	13		
11.10.2012	6212.28667	0.626	0.010	0.001	0.213	0.004	0.001	60		
06.12.2012	6268.19165	0.584	0.008	0.002	0.208	0.004	0.001	22		
07.12.2012	6269.14436	0.590	0.008	0.002	0.208	0.003	0.001	25		
12.12.2012	6274.15618	0.551	0.011	0.002	0.205	0.004	0.001	25		
19.12.2012	6281.12896	0.539	0.011	0.002	0.206	0.005	0.001	25		
17.01.2013	6310.07494	0.516	0.008	0.003	0.205	0.015	0.007	5		
14.02.2013	6338.12007	0.484	0.003	0.001	0.206	0.003	0.001	5		
12.08.2013	6517.32602	0.656	0.010	0.001	0.204	0.004	0.001	55		
10.10.2013	6576.28931	0.711	0.008	0.001	0.208	0.006	0.001	39		
14.07.2014	6853.34689	0.314	0.013	0.002	0.212	0.008	0.001	39		
	П]	родолже	ние таб	лицы да	алее					

продолжение таблицы 2.1										
Дата	JD-240000	ΔV	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	Ν		
11.09.2014	6912.38557	0.451	0.011	0.001	0.189	0.006	0.001	62		
15.09.2015	7281.25513	0.485	0.007	0.001	0.168	0.005	0.001	38		
26.04.2017	7870.44585	0.447	0.012	0.004	0.161	0.004	0.001	7		
11.10.2017	8038.17950	0.324	0.008	0.002	0.181	0.006	0.001	25		
05.01.2018	8124.17500	0.285	0.004	0.001	0.178	0.005	0.001	20		
06.01.2018	8125.11670	0.308	0.006	0.001	0.170	0.005	0.001	40		
12.01.2018	8131.14580	0.341	0.006	0.001	0.176	0.004	0.001	20		
16.02.2018	8166.10420	0.224	0.004	0.001	0.188	0.006	0.002	10		
03.04.2018	8212.45700	0.415	0.007	0.001	0.178	0.007	0.002	9		
16.04.2018	8225.42570	0.400	0.011	0.003	0.178	0.006	0.001	20		
26.04.2018 8235.39240 0.310 0.008 0.002 0.186 0.005 0.001 20										
22.05.2018	8261.34380	0.263	0.006	0.001	0.188	0.007	0.002	20		
24.07.2018	8324.32700	0.151	0.007	0.002	0.183	0.003	0.001	13		
19.12.2018	8472.22850	0.129	0.012	0.003	0.202	0.005	0.001	20		
28.01.2019	8512.18820	0.090	0.012	0.003	0.195	0.004	0.001	13		
06.02.2019	8521.14650	0.177	0.007	0.002	0.199	0.007	0.002	10		
12.02.2019	8527.20200	0.145	0.009	0.003	0.199	0.007	0.002	15		
20.02.2019	8535.12500	0.119	0.005	0.002	0.203	0.008	0.004	5		
15.03.2019	8558.49310	0.126	0.005	0.002	0.193	0.004	0.001	10		
06.04.2019	8580.40970	0.179	0.003	0.001	0.204	0.003	0.001	10		
01.04.2019	8575.47010	0.162	0.003	0.001	0.208	0.003	0.001	10		
25.07.2019	8690.30330	0.296	0.012	0.003	0.202	0.005	0.001	20		
19.10.2019	8776.34880	0.126	0.004	0.001	0.164	0.012	0.004	10		
29.11.2019	8817.27748	0.077	0.004	0.001	0.175	0.017	0.003	30		
14.12.2019	8832.20632	0.030	0.014	0.004	0.175	0.004	0.001	15		
29.12.2019	8847.18480	-0.078	0.004	0.001	0.195	0.003	0.001	15		
12.02.2020	8891.15382	-0.067	0.005	0.002	0.186	0.007	0.003	5		
05.03.2020	8914.54355	-0.117	0.004	0.001	0.159	0.006	0.002	11		
23.03.2020	8932.47483	-0.064	0.006	0.002	0.155	0.005	0.001	15		
27.03.2020	8936.44622	-0.054	0.005	0.001	0.168	0.004	0.001	18		
19.04.2020	8959.38451	-0.003	0.015	0.002	0.172	0.010	0.003	10		
13.05.2020	8983.35573	0.019	0.005	0.001	0.167	0.005	0.001	20		
26.09.2020	9119.30094	-0.070	0.007	0.001	0.163	0.003	0.001	29		
02.10.2020	9125.37666	-0.125	0.013	0.003	0.161	0.010	0.002	20		
	продолжение таблицы далее									

продолжение таблицы 2.1									
Дата	JD-240000	ΔV	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	N	
28.10.2020	9151.33432	-0.193	0.009	0.002	0.152	0.008	0.002	23	
03.11.2020	9157.40251	-0.205	0.006	0.001	0.158	0.006	0.002	16	
10.12.2020	9194.22652	-0.211	0.005	0.001	0.159	0.003	0.001	25	
11.12.2020	9195.22465	-0.200	0.004	0.001	0.157	0.004	0.001	23	
19.12.2020	9203.16506	-0.215	0.004	0.001	0.156	0.005	0.001	20	
18.01.2021	9233.18459	-0.230	0.005	0.001	0.158	0.006	0.001	12	
10.02.2021	9256.12148	-0.143	0.007	0.001	0.135	0.005	0.001	15	
12.04.2021	9317.43391	-0.112	0.005	0.001	0.174	0.003	0.001	25	
16.04.2021	9321.43617	-0.125	0.003	0.001	0.165	0.003	0.001	17	
17.04.2021	9322.38562	-0.072	0.005	0.001	0.171	0.004	0.001	39	
18.04.2021	9323.40756	-0.078	0.004	0.001	0.173	0.003	0.001	34	
13.10.2021	9501.26582	-0.223	0.003	0.001	0.166	0.003	0.001	18	
14.10.2021	9502.35009	-0.252	0.004	0.001	0.159	0.005	0.001	30	
25.12.2021	9574.17410	-0.204	0.008	0.001	0.153	0.004	0.001	41	
12.01.2022	9592.12339	-0.237	0.006	0.001	0.161	0.007	0.001	20	
26.01.2022	9606.13106	-0.257	0.008	0.002	0.168	0.009	0.002	20	
25.03.2022	9664.45067	-0.185	0.004	0.001	0.174	0.004	0.001	35	
11.04.2022	9681.40484	-0.270	0.005	0.001	0.163	0.006	0.001	20	
21.04.2022	9691.39852	-0.166	0.004	0.001	0.176	0.004	0.001	33	
22.04.2022	9692.39289	-0.195	0.006	0.001	-0.169	0.003	0.001	30	

Таблица 2.2: Усредненные за ночь разности блеска V645 Суд (ΔR) и контрольной звезды (ΔC) относительно звезды сравнения в фильтре R.

Дата	JD-240000	ΔR	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	Ν	
15 04 2009	4937 43140	0 198	0.004	0.001	0 510	0.004	0.002	10	
17.11.2009	5153.21515	0.212	0.013	0.001	0.510 0.501	0.010	0.001	46	
21.01.2010	5218.16560	0.271	0.008	0.002	0.499	0.004	0.001	29	
26.01.2010	5223.13941	0.260	0.012	0.002	0.500	0.004	0.001	28	
02.02.2010	5230.14237	0.199	0.017	0.004	0.506	0.005	0.001	18	
06.03.2010	5262.53163	0.353	0.006	0.002	0.507	0.005	0.001	13	
18.03.2010	5274.50131	0.448	0.005	0.001	0.508	0.005	0.001	10	
25.03.2010	5281.48204	0.467	0.006	0.002	0.513	0.003	0.001	12	
08.04.2010	5295.44222	0.484	0.009	0.002	0.518	0.012	0.003	18	
12.05.2010	5329.37148	0.463	0.007	0.002	0.516	0.010	0.003	12	
13.05.2010	5330.36559	0.408	0.016	0.004	0.517	0.008	0.002	12	
21.07.2010	5399.34054	0.364	0.007	0.001	0.515	0.004	0.001	32	
22.07.2010	5400.33931	0.358	0.008	0.001	0.513	0.005	0.001	43	
04.08.2010	5413.33720	0.313	0.009	0.001	0.525	0.005	0.001	40	
05.08.2010	5414.33911	0.271	0.010	0.002	0.524	0.008	0.001	44	
01.09.2010	5441.34618	0.341	0.015	0.002	0.507	0.008	0.001	41	
02.09.2010	5442.36419	0.349	0.006	0.001	0.515	0.004	0.001	66	
22.09.2010	5462.24106	0.317	0.014	0.003	0.505	0.010	0.002	22	
08.10.2010	5478.29670	0.449	0.009	0.001	0.513	0.004	0.001	78	
20.10.2010	5490.15031	0.403	0.009	0.002	0.507	0.006	0.001	26	
02.12.2010	5533.24075	0.425	0.013	0.002	0.500	0.007	0.001	65	
12.12.2010	5543.20149	0.398	0.017	0.002	0.506	0.006	0.001	68	
13.12.2010	5544.19296	0.351	0.013	0.002	0.503	0.007	0.001	73	
08.01.2011	5570.21428	0.343	0.011	0.002	0.505	0.007	0.001	40	
20.01.2011	5582.14021	0.320	0.013	0.002	0.503	0.007	0.001	32	
27.04.2011	5679.41259	0.208	0.005	0.001	0.509	0.005	0.001	17	
28.04.2011	5680.40578	0.216	0.005	0.001	0.506	0.005	0.002	16	
16.05.2012	6064.39120	0.248	0.014	0.004	0.504	0.008	0.002	12	
26.09.2012	6197.38655	0.120	0.016	0.006	0.516	0.008	0.002	11	
27.09.2012	6198.23906	0.127	0.015	0.005	0.511	0.007	0.002	8	
продолжение таблицы далее									

	продолжение таблицы 2.2									
Дата	JD-240000	ΔR	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	Ν		
04.10.2012	6205.24509	0.104	0.005	0.001	0.520	0.003	0.001	27		
10.10.2012	6211.13493	0.160	0.011	0.003	0.525	0.005	0.001	13		
11.10.2012	6212.28589	0.139	0.008	0.001	0.522	0.005	0.001	61		
06.12.2012	6268.19709	0.080	0.007	0.001	0.518	0.006	0.001	23		
07.12.2012	6269.14649	0.097	0.009	0.002	0.516	0.003	0.001	25		
12.12.2012	6274.15831	0.055	0.006	0.001	0.515	0.005	0.001	25		
19.12.2012	6281.12896	0.043	0.010	0.002	0.513	0.006	0.001	25		
17.01.2013	6310.07528	0.028	0.021	0.010	0.504	0.015	0.006	6		
14.02.2013	6338.11821	-0.001	0.007	0.003	0.527	0.004	0.001	6		
12.08.2013	6517.32602	0.109	0.006	0.001	0.514	0.006	0.001	55		
10.10.2013 6576.28931 0.198 0.005 0.001 0.519 0.009 0.001 39										
14.07.2014	6853.34795	-0.293	0.011	0.002	0.517	0.006	0.001	45		
11.09.2014	6912.38674	-0.227	0.005	0.001	0.493	0.006	0.001	70		
15.09.2015	7281.26488	-0.178	0.005	0.001	0.472	0.007	0.001	42		
26.04.2017	7870.44698	-0.305	0.005	0.002	0.464	0.006	0.002	8		
11.10.2017	8038.17950	-0.378	0.008	0.002	0.500	0.009	0.002	24		
05.01.2018	8124.17500	-0.376	0.005	0.001	0.496	0.003	0.001	20		
06.01.2018	8125.11670	-0.332	0.006	0.001	0.490	0.005	0.001	40		
12.01.2018	8131.14580	-0.313	0.006	0.001	0.481	0.005	0.001	20		
16.02.2018	8166.10420	-0.401	0.007	0.001	0.499	0.006	0.002	10		
03.04.2018	8212.45700	-0.175	0.005	0.001	0.487	0.004	0.001	10		
16.04.2018	8225.42570	-0.205	0.009	0.003	0.491	0.006	0.001	20		
26.04.2018	8235.39240	-0.287	0.007	0.002	0.490	0.006	0.001	20		
22.05.2018	8261.34380	-0.350	0.010	0.001	0.502	0.007	0.002	19		
24.07.2018	8324.32700	-0.477	0.006	0.002	0.499	0.005	0.001	13		
19.12.2018	8472.22850	-0.533	0.007	0.003	0.505	0.008	0.002	20		
28.01.2019	8512.18820	-0.603	0.010	0.003	0.497	0.006	0.001	16		
06.02.2019	8521.14650	-0.504	0.007	0.002	0.494	0.006	0.002	10		
12.02.2019	8527.20200	-0.524	0.007	0.003	0.502	0.005	0.001	15		
20.02.2019	8535.12500	-0.546	0.003	0.002	0.507	0.003	0.001	5		
15.03.2019	8558.49310	-0.548	0.004	0.002	0.495	0.004	0.001	10		
06.04.2019	8580.40970	-0.518	0.007	0.001	0.501	0.007	0.002	10		
01.04.2019	8575.47010	-0.501	0.004	0.001	0.504	0.004	0.001	10		
25.07.2019	8690.30330	-0.379	0.004	0.003	0.499	0.004	0.001	18		
	п	оодолже	ние таб.	лицы да	ллее					

		продолж	ение та	блицы 2	2.2			
Дата	JD-240000	ΔR	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	Ν
19.10.2019	8776.34880	-0.546	0.005	0.001	0.465	0.005	0.002	10
29.11.2019	8817.27748	-0.628	0.006	0.001	0.477	0.006	0.001	30
14.12.2019	8832.20632	-0.653	0.009	0.002	0.473	0.004	0.001	15
29.12.2019	8847.18596	-0.784	0.007	0.002	0.498	0.004	0.001	15
12.02.2020	8891.15380	-0.774	0.007	0.003	0.473	0.007	0.003	5
05.03.2020	8914.54356	-0.835	0.003	0.001	0.473	0.004	0.001	10
23.03.2020	8932.47486	-0.768	0.007	0.002	0.482	0.007	0.002	15
27.03.2020	8936.44622	-0.765	0.005	0.001	0.497	0.005	0.001	18
19.04.2020	8959.38451	-0.729	0.011	0.004	0.489	0.006	0.002	10
13.05.2020	8983.35573	-0.676	0.005	0.001	0.493	0.007	0.001	20
26.09.2020	9119.30094	-0.817	0.011	0.002	0.488	0.007	0.001	31
02.10.2020	9125.38042	-0.850	0.015	0.004	0.492	0.015	0.003	20
28.10.2020	9151.33478	-0.918	0.011	0.002	0.479	0.010	0.002	23
03.11.2020	9157.40251	-0.940	0.009	0.002	0.488	0.012	0.003	16
10.12.2020	9194.22652	-0.927	0.007	0.001	0.478	0.004	0.001	25
11.12.2020	9195.22465	-0.892	0.007	0.001	0.485	0.004	0.001	23
19.12.2020	9203.16506	-0.913	0.004	0.001	0.477	0.005	0.001	20
18.01.2021	9233.18459	-0.956	0.004	0.001	0.483	0.009	0.002	12
10.02.2021	9256.12148	-0.900	0.006	0.001	0.456	0.007	0.001	15
12.04.2021	9317.43391	-0.886	0.004	0.001	0.494	0.003	0.001	25
16.04.2021	9321.43617	-0.890	0.004	0.001	0.486	0.005	0.001	17
17.04.2021	9322.38562	-0.821	0.005	0.001	0.490	0.005	0.001	39
18.04.2021	9323.40756	-0.849	0.005	0.001	0.493	0.003	0.001	35
13.10.2021	9501.27132	-0.964	0.004	0.001	0.488	0.005	0.001	18
14.10.2021	9502.31430	-0.997	0.011	0.002	0.477	0.006	0.001	30
25.12.2021	9574.17410	-0.934	0.006	0.001	0.471	0.009	0.001	41
12.01.2022	9592.12339	-0.972	0.006	0.001	0.479	0.005	0.001	20
26.01.2022	9606.13106	-0.971	0.016	0.004	0.494	0.010	0.002	20
25.03.2022	9664.45067	-0.918	0.005	0.001	0.493	0.006	0.001	35
11.04.2022	9681.40484	-1.016	0.006	0.001	0.487	0.005	0.001	20
21.04.2022	9691.39852	-0.903	0.005	0.001	0.501	0.005	0.001	33
22.04.2022	9692.39289	-0.929	0.005	0.001	0.491	0.004	0.001	30

Таблица 2.3: Усредненные за ночь разности блеска V645 Суд (ΔI) и контрольной звезды (ΔC) относительно звезды сравнения в фильтре I.

Дата	JD-240000	ΔI	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	Ν		
16 05 2012	6064 39120	-0.328	0.006	0.002	0.832	0 009	0.003	12		
26.09.2012	6197.38655	-0.544	0.014	0.002	0.847	0.006	0.002	8		
27.09.2012	6198.23906	-0.548	0.014	0.005	0.848	0.014	0.005	9		
04.10.2012	6205.24509	-0.585	0.007	0.001	0.864	0.005	0.001	25		
10.10.2012	6211.13493	-0.500	0.008	0.002	0.862	0.007	0.002	11		
11.10.2012	6212.28589	-0.509	0.008	0.001	0.861	0.006	0.001	61		
06.12.2012	6268.19709	-0.607	0.006	0.001	0.857	0.006	0.001	23		
07.12.2012	6269.14649	-0.573	0.005	0.001	0.857	0.005	0.001	25		
12.12.2012	6274.15831	-0.611	0.006	0.001	0.854	0.005	0.001	24		
19.12.2012	6281.12896	-0.635	0.007	0.001	0.854	0.007	0.001	25		
17.01.2013	6310.07528	-0.635	0.009	0.004	0.832	0.007	0.003	5		
14.02.2013	6338.11821	-0.629	0.004	0.002	0.855	0.005	0.002	6		
06.01.2018	8125.11670	-1.211	0.008	0.001	0.837	0.005	0.001	40		
12.01.2018	8131.14580	-1.178	0.006	0.001	0.837	0.008	0.002	20		
16.02.2018	8166.10420	-1.285	0.005	0.002	0.851	0.007	0.002	10		
03.04.2018	8212.45700	-0.932	0.007	0.002	0.822	0.004	0.001	9		
16.04.2018	8225.42570	-0.998	0.006	0.001	0.834	0.006	0.001	20		
26.04.2018	8235.39240	-1.044	0.006	0.001	0.854	0.006	0.001	20		
22.05.2018	8261.34380	-1.134	0.010	0.002	0.850	0.008	0.002	19		
24.07.2018	8324.32700	-1.254	0.004	0.001	0.845	0.003	0.001	13		
19.12.2018	8472.22850	-1.540	0.006	0.001	0.847	0.009	0.002	20		
28.01.2019	8512.18820	-1.631	0.014	0.003	0.840	0.009	0.002	16		
06.02.2019	8521.14650	-1.511	0.010	0.003	0.844	0.007	0.002	10		
12.02.2019	8527.20200	-1.509	0.008	0.002	0.834	0.008	0.002	15		
20.02.2019	8535.12500	-1.543	0.008	0.003	0.848	0.005	0.002	5		
15.03.2019	8558.49310	-1.567	0.007	0.002	0.830	0.005	0.002	10		
01.04.2019	8575.47010	-1.472	0.005	0.002	0.843	0.004	0.001	10		
06.04.2019	8580.40970	-1.504	0.007	0.002	0.830	0.008	0.003	10		
25.07.2019	8690.30330	-1.362	0.008	0.002	0.833	0.004	0.001	16		
19.10.2019	8776.34880	-1.577	0.008	0.002	0.791	0.002	0.001	10		
	продолжение таблицы далее									

продолжение таблицы 2.3									
Дата	JD-240000	ΔI	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	ΔC	$\pm \sigma$	$\pm \overline{\sigma}$	Ν	
29.11.2019	8817.27750	-1.661	0.007	0.001	0.813	0.007	0.001	30	
14.12.2019	8832.20630	-1.658	0.006	0.001	0.808	0.005	0.001	15	
29.12.2019	8847.18683	-1.789	0.010	0.003	0.839	0.007	0.002	15	
12.02.2020	8891.15580	-1.763	0.006	0.003	0.820	0.009	0.004	5	
05.03.2020	8914.54357	-1.848	0.015	0.004	0.822	0.006	0.002	9	
23.03.2020	8932.47486	-1.742	0.009	0.002	0.830	0.006	0.002	15	
27.03.2020	8936.44622	-1.753	0.017	0.003	0.846	0.006	0.001	18	
19.04.2020	8959.38451	-1.699	0.010	0.004	0.828	0.013	0.004	10	
13.05.2020	8983.35573	-1.601	0.015	0.002	0.836	0.006	0.001	20	
26.09.2020	9119.29258	-1.864	0.017	0.003	0.830	0.013	0.002	31	
03.11.2020	9157.40251	-1.937	0.012	0.003	0.834	0.009	0.002	16	
10.12.2020	9194.22652	-1.948	0.006	0.001	0.825	0.006	0.001	25	
11.12.2020	9195.22465	-1.904	0.009	0.002	0.827	0.010	0.002	23	
19.12.2020	9203.16506	-1.927	0.008	0.002	0.828	0.009	0.002	20	
18.01.2021	9233.18459	-1.974	0.012	0.004	0.825	0.013	0.004	10	
10.02.2021	9256.12148	-1.931	0.011	0.002	0.802	0.014	0.003	15	
12.04.2021	9317.43391	-1.926	0.007	0.001	0.845	0.005	0.001	25	
16.04.2021	9321.43617	-1.924	0.006	0.001	0.833	0.007	0.001	17	
17.04.2021	9322.38562	-1.848	0.008	0.001	0.838	0.008	0.001	39	
18.04.2021	9323.40756	-1.892	0.007	0.001	0.842	0.005	0.001	34	
13.10.2021	9501.26722	-1.966	0.008	0.001	0.842	0.010	0.002	18	
25.12.2021	9574.17410	-1.941	0.008	0.001	0.813	0.013	0.002	41	
12.01.2022	9592.12339	-2.003	0.009	0.002	0.827	0.008	0.002	20	
26.01.2022	9606.13106	-1.976	0.012	0.003	0.849	0.014	0.003	20	
25.03.2022	9664.45067	-1.917	0.006	0.001	0.847	0.006	0.001	35	
11.04.2022	9681.40484	-2.009	0.007	0.002	0.833	0.008	0.002	20	
21.04.2022	9691.39852	-1.883	0.007	0.002	0.848	0.007	0.001	33	
22.04.2022	9692.39289	-1.908	0.006	0.001	0.838	0.006	0.001	30	

Приложение 3

Таблица 3.1: Усредненные за ночь разности показателей цвета V645 Суд и контрольной звезды ($\Delta(V-R)$, $\Delta(V-R)_C$) относительно звезды сравнения.

Дата	JD-240000	$\Delta(V-R)$	$\Delta (V-R)_C$	Ν
15.04.2009	4937.43140	0.485	-0.316	10
17.11.2009	5153.21515	0.442	-0.305	46
21.01.2010	5218.16560	0.465	-0.303	29
26.01.2010	5223.13941	0.448	-0.306	28
02.02.2010	5230.14237	0.426	-0.308	18
06.03.2010	5262.53163	0.457	-0.309	13
18.03.2010	5274.50131	0.489	-0.313	10
25.03.2010	5281.48204	0.520	-0.314	12
08.04.2010	5295.44222	0.551	-0.314	18
12.05.2010	5329.37148	0.484	-0.310	12
13.05.2010	5330.36559	0.467	-0.309	12
21.07.2010	5399.34054	0.456	-0.311	32
22.07.2010	5400.33931	0.455	-0.307	43
04.08.2010	5413.33720	0.450	-0.314	40
05.08.2010	5414.33911	0.443	-0.315	44
01.09.2010	5441.34618	0.455	-0.306	41
02.09.2010	5442.36419	0.463	-0.314	66
22.09.2010	5462.24106	0.421	-0.306	22
08.10.2010	5478.29670	0.492	-0.309	78
20.10.2010	5490.15031	0.470	-0.293	26
02.12.2010	5533.24075	0.457	-0.301	65
12.12.2010	5543.20149	0.461	-0.305	68
13.12.2010	5544.19296	0.450	-0.304	73
продолжение таблицы далее				

продолжение таблицы 3.1				
Дата	JD-240000	$\Delta(V-R)$	$\Delta (V-R)_C$	Ν
08.01.2011	5570.21428	0.456	-0.305	40
20.01.2011	5582.14021	0.438	-0.306	32
27.04.2011	5679.41259	0.417	-0.309	17
28.04.2011	5680.40578	0.417	-0.309	16
16.05.2012	6064.39120	0.576	-0.307	12
26.09.2012	6197.38655	0.519	-0.311	11
27.09.2012	6198.23906	0.501	-0.310	8
04.10.2012	6205.24509	0.506	-0.312	27
10.10.2012	6211.13493	0.494	-0.316	13
11.10.2012	6212.28589	0.487	-0.309	61
06.12.2012	6268.19709	0.504	-0.310	23
07.12.2012	6269.14649	0.493	-0.308	25
12.12.2012	6274.15831	0.496	-0.310	25
19.12.2012	6281.12896	0.496	-0.307	25
17.01.2013	6310.07528	0.488	-0.299	6
14.02.2013	6338.11821	0.485	-0.321	6
12.08.2013	6517.32602	0.547	-0.310	55
10.10.2013	6576.28931	0.513	-0.311	39
14.07.2014	6853.34795	0.607	-0.305	45
11.09.2014	6912.38674	0.678	-0.304	70
15.09.2015	7281.26488	0.663	-0.304	42
26.04.2017	7870.44698	0.752	-0.303	8
11.10.2017	8038.17950	0.702	-0.319	24
05.01.2018	8124.17500	0.661	-0.318	20
06.01.2018	8125.11670	0.640	-0.320	40
12.01.2018	8131.14580	0.654	-0.305	20
16.02.2018	8166.10420	0.625	-0.311	10
03.04.2018	8212.45700	0.590	-0.309	10
16.04.2018	8225.42570	0.605	-0.313	20
26.04.2018	8235.39240	0.597	-0.304	20
22.05.2018	8261.34380	0.613	-0.314	19
24.07.2018	8324.32700	0.628	-0.316	13
19.12.2018	8472.22850	0.662	-0.303	20
28.01.2019	8512.18820	0.693	-0.302	16
продолжение таблицы далее				

продолжение таблицы 3.1				
Дата	JD-240000	$\Delta(V-R)$	$\Delta (V-R)_C$	N
06.02.2019	8521.14650	0.681	-0.295	10
12.02.2019	8527.20200	0.669	-0.303	15
20.02.2019	8535.12500	0.665	-0.304	5
15.03.2019	8558.49310	0.674	-0.302	10
06.04.2019	8580.40970	0.697	-0.297	10
01.04.2019	8575.47010	0.663	-0.296	10
25.07.2019	8690.30330	0.675	-0.297	18
19.10.2019	8776.34880	0.672	-0.301	10
29.11.2019	8817.27748	0.705	-0.302	30
14.12.2019	8832.20632	0.683	-0.298	15
29.12.2019	8847.18596	0.706	-0.303	15
12.02.2020	8891.15380	0.707	-0.307	5
05.03.2020	8914.54356	0.718	-0.314	10
23.03.2020	8932.47486	0.704	-0.327	15
27.03.2020	8936.44622	0.711	-0.329	18
19.04.2020	8959.38451	0.726	-0.319	10
13.05.2020	8983.35573	0.695	-0.327	20
26.09.2020	9119.30094	0.747	-0.326	31
02.10.2020	9125.38042	0.725	-0.331	20
28.10.2020	9151.33478	0.725	-0.327	23
03.11.2020	9157.40251	0.735	-0.330	16
10.12.2020	9194.22652	0.716	-0.319	25
11.12.2020	9195.22465	0.692	-0.328	23
19.12.2020	9203.16506	0.698	-0.321	20
18.01.2021	9233.18459	0.726	-0.325	12
10.02.2021	9256.12148	0.757	-0.321	15
12.04.2021	9317.43391	0.774	-0.320	25
16.04.2021	9321.43617	0.765	-0.321	17
17.04.2021	9322.38562	0.749	-0.319	39
18.04.2021	9323.40756	0.771	-0.320	35
13.10.2021	9501.27132	0.741	-0.322	18
14.10.2021	9502.31430	0.745	-0.318	30
25.12.2021	9574.17410	0.730	-0.318	41
12.01.2022	9592.12339	0.735	-0.318	20
продолжение таблицы далее				

продолжение таблицы 3.1				
Дата	JD-240000	$\Delta(V-R)$	$\Delta (V-R)_C$	Ν
26.01.2022	9606.13106	0.714	-0.326	20
25.03.2022	9664.45067	0.733	-0.319	35
11.04.2022	9681.40484	0.746	-0.324	20
21.04.2022	9691.39852	0.737	-0.332	33
22.04.2022	9692.39289	0.734	-0.322	30

Таблица 3.2: Усредненные за ночь разности показателей цвета V645 Суд и контрольной звезды ($\Delta(R-I)$, $\Delta(R-I)_C$) относительно звезды сравнения.

				r
Дата	JD-240000	$\Delta(R-I)$	$\Delta (R-I)_C$	Ν
16.05.2012	6064 39120	0.576	-0.328	12
26.09.2012	6197 38655	0.664	-0.331	8
27.09.2012	6198 23906	0.675	-0.337	9
04 10 2012	$6205\ 24509$	0.689	-0.344	25
10 10 20012	6211 13493	0.660	-0.337	11
11 10 2012	6212 28589	0.648	-0.339	61
$06\ 12\ 2012$	6268 19709	0.687	-0.339	23
07 12 2012	6269 14649	0.670	-0.341	25
12.12.2012 12.12.2012	$6274\ 15831$	0.666	-0.339	$\frac{20}{24}$
19 12 2012	6281 12896	0.678	-0.341	25
17.01.2012	6310 07528	0.663	-0.328	5
1/.01.2010 1/.02.2013	6338 11821	0.000	-0.328	6
14.02.2013 06 01 2018	8125 11670	0.028	-0.320	40
$12\ 01\ 2018$	8131 1/580	0.865	-0.321	20
12.01.2010 16.02.2018	8166 10420	0.884	-0.330	10
03 04 2018	8212 45700	0.004 0.757	-0.332	0
16 04 2018	8225 42570	0.703	-0.313	20
26.04.2018	8235 30240	0.757	-0.323	20
20.04.2010 22.05.2018	8261 34380	0.757	-0.344	10
22.05.2018 24.07.2018	8224 22700	0.764	-0.326	19
24.07.2010 10.19.2019	8479 99850	1.007	-0.320	10
19.12.2010	0472.22000	1.007	-0.342	20 16
20.01.2019	0012.10020 0501 14650	1.020	-0.343	10
10.02.2019	8521.14050	1.007	-0.300	10
12.02.2019	8527.20200	0.985	-0.332	15
20.02.2019	8535.12500	0.997	-0.341	$\frac{1}{10}$
15.03.2019	8558.49310	1.019	-0.335	10
01.04.2019	8575.47010	0.971	-0.342	10
06.04.2019	8580.40970	0.986	-0.326	10
25.07.2019	8690.30330	0.983	-0.334	16
19.10.2019	8776.34880	1.031	-0.326	10
продолжение таблицы далее				

продолжение таблицы 3.2				
Дата	JD-240000	$\Delta(R-I)$	$\Delta (R-I)_C$	Ν
29.11.2019	8817.27750	1.033	-0.336	30
14.12.2019	8832.20630	1.005	-0.335	15
29.12.2019	8847.18683	1.005	-0.341	15
12.02.2020	8891.15580	0.989	-0.347	5
05.03.2020	8914.54357	1.013	-0.349	9
23.03.2020	8932.47486	0.974	-0.348	15
27.03.2020	8936.44622	0.988	-0.349	18
19.04.2020	8959.38451	0.969	-0.338	10
13.05.2020	8983.35573	0.924	-0.342	20
26.09.2020	9119.29258	1.046	-0.341	31
03.11.2020	9157.40251	0.997	-0.345	16
10.12.2020	9194.22652	1.031	-0.347	25
11.12.2020	9195.22465	1.012	-0.342	23
19.12.2020	9203.16506	1.014	-0.351	20
18.01.2021	9233.18459	1.018	-0.342	10
10.02.2021	9256.12148	1.031	-0.346	15
12.04.2021	9317.43391	1.044	-0.352	25
16.04.2021	9321.43617	1.034	-0.347	17
17.04.2021	9322.38562	1.027	-0.348	39
18.04.2021	9323.40756	1.043	-0.349	34
13.10.2021	9501.26722	1.002	-0.354	18
25.12.2021	9574.17410	1.007	-0.342	41
12.01.2022	9592.12339	1.031	-0.348	20
26.01.2022	9606.13106	1.005	-0.355	20
25.03.2022	9664.45067	0.999	-0.350	35
11.04.2022	9681.40484	0.993	-0.346	20
21.04.2022	9691.39852	0.980	-0.347	33
22.04.2022	9692.39289	0.979	-0.347	30

Благодарности

Соискатель выражает благодарность своим коллегам и соавторам М. А. Свечникову, П. Е. Захаровой, А. М. Соболеву, Д. А. Кононову, С. Ю. Парфенову, Ю. Ю. Балеге, А. Ф. Селезневу, Т. С. Полушиной за помощь, плодотворное сотрудничество, техническую и научную поддержку. Соискатель благодарит национальный комитет по тематике российских телескопов за предоставление наблюдательного времени на телескопах САО РАН, а также сотрудников САО РАН за помощь в получении и обработке наблюдательного материала. Отдельную благодарность автор выражает П. Хадраве за приглашение принять участие в составе его группы для совместной работы по спектральному исследованию UU Cas.

Литература

- Бэттен А. Двойные и кратные звезды. // Изд. Мир : Москва. 1976. — 322 с.
- Tokovinin A. A. MSC a catalogue of physical multiple stars.// Astronomy and Astrophysics Supplement series. — 1997. — V. 124. — Pp. 75-84.
- Paczynski B. Evolutionary aspects of Wolf-Rayet stars. IAU Symposium N 49 on Wolf-Rayet and high-temperature stars (Edited by M. K. V. Bappu and Jorge Sahade) Dordrecht, D. Reidel Pub. Co. - 1973. - N.49. -Pp. 143-162.
- Масевич А. Г. и Тутуков А. В. Эволюция звезд: теория и наблюдения.
 // Изд. Наука: Москва. 1988. 82 с.
- Kopal Z. Dynamics of close binary systems. // Astrophysics and Space Science Library, Dordrecht: Reidel. - 1978. - V.68. - 513 p.
- Свечников М. А. и Снежко Л. И. Характеристики и эволюция тесных двойных систем. Явления нестационарности и звездная эволюция. // Изд. Наука, Главная редакция физико-математической литературы: Москва. — 1974. — С. 181-228.
- 7. Холопов П. Н., Самусь Н. Н., Горанский В. П. и др. Общий Каталог Переменных Звезд Т.1 // Изд. Наука: Москва. — 1985. — 376 с.
- Самусь Н. Н., Казаровец Е. В., Дурлевич О. В. и др. Общий каталог переменных звезд: версия ОКПЗ 5.1 //Астрономический Журнал. — 2017. — Т. 94. — С. 87–96.

- 9. Walker M. F. Nova DQ Herculis (1934): an eclipsing binary with very short period. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1954. V.66. Pp. 230-232.
- Greenstein J. L. and Kraft R. P. The binary system Nova DQ Herculis. I. The spectrum and radial velocity during the eclipse cycle. // Astrophysical Journal. - 1959. - V.130. - Pp. 99-109.
- Kraft R. P. Are all Novae binary stars? // Astronomical Society of the Pacific Leaflets. - 1964. - V.9. - Pp. 137-144.
- Starrfield S. G. The rate of mass exchange in DQ Herculis. // Astrophysical Journal. — 1970. — V.161. — Pp. 361-363.
- Riess A. G. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. // Astronomical Journal. — 1998. — V.116. — Pp. 1009-1038.
- 14. Perlmutter S. Measurements of Ω and Λ from 42 high redshift supernovae. // Astrophysical Journal. - 1999. - V.517. - Pp. 565-586.
- Масевич А. Г. Отв. ред. Двойные звезды. // Сб. науч. трудов. Изд. Космоинформ: Москва. — 1997. — 264 с.
- 16. Hertzprung E. Uber die Sterne der Unterabteilung c und ac nach der Spektralklassifikation von Antonia C. Maury. // Astronomische Nachrichten. – 1908. – V.179. – Pp. 373–380.
- Russell H. N. Relations between the spectra and other characteristics of the stars. // Popular Astronomy. - 1914. - V.22. - Pp. 275-294.
- Stromgren B. On the interpretation of the Hertzsprung-Russell-Diagram.
 // Astronomy and Astrophysics. 1933. V.7. Pp. 222-248.

- Hertzprung E. On the relation between mass and absolute brightness of components of double stars. // Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands. - 1923. - V.2. - Pp. 15-17.
- Russell H. N., Adams W. S. and Joy A. H. A comparison of spectroscopic and dynamical parallaxes. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. - 1923. - V.35. - Pp. 189-193.
- McLaughlin D. B. The masses and luminosities of eclipsing binaries (abstract). // Popular Astronomy. - 1927. - V.35. - P. 489.
- McLaughlin D. B. The masses and luminosities of the eclipsing binaries. // Astronomical Journal. - 1927. - V.38. - Pp. 21-26.
- Kuiper G. P. The empirical Mass-Luminosity relation. // Astrophycal Journal. - 1938. - V.88. - Pp. 472-507.
- 24. Griffiths S. C., Hicks R. B. and Milone E. F. A re-examination of mass-luminosity relations from binary-star data. // Journal of the Royal Astronomical Society of Canada. — 1988. — V.82. — Pp. 1-12.
- 25. Demircan O. and Kahraman G. Stellar Mass / Luminosity and Mass / Radius Relations. // Astrophysics and Space Science. - 1991. - V.181. -Pp. 313-322.
- 26. Черепащук А. М. Тесные Двойные Звезды. Часть І. // Изд. ФИЗМАТ-ЛИТ: Москва. — 2013. — 560 с.
- 27. Черепащук А. М. Тесные Двойные Звезды. Часть II. // Изд. ФИЗМАТ-ЛИТ: Москва. — 2013. — 572 с.
- Yor D G., Adelman J., Anderson, John E. and et al. The Sloan Digital Sky Survey: technical summary. // The Astronomical Journal. - 2000. -V.120. - Pp. 1579-1587.

- Paczynski B., Szczygiel D., Pilecki B. and Pojmanski G. Eclipsing binaries in the All Sky Automated Survey catalogue. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2006. - V.368. - Pp. 1311-1318.
- 30. Mullan D. J. On the possibility of magnetic starspots on the primary components of W Ursae Majoris type binaries. // Astrophysical Journal. - 1975. - V. 198. - Pp. 563-573.
- 31. Zinnecker H. and York H. W. Toward understanding massive star formation. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. - 2007. -V. 45. - Pp. 481-563.
- 32. Бисикало Д. В., Боярчук А. А., Жилкин А. Г. Газодинамика тесных двойных звезд. // Изд. ФИЗМАТЛИТ: Москва. — 2013. — 632 с.
- 33. Penny L. R., Bagnuolo W. G. and Gies D. R. Doppler tomography of Otype binaries: The physical properties of seven systems. // Space Science Reviews. - 1993. - V. 66. - Pp. 323-326.
- 34. Kaitchuck R. H., Schlegel E. M., Honeycutt R. K. and et al. Doppler emission line tomography of cataclysmic variables. // Astronomical Society of the Pacific Conference Series. - 1994. - V. 56. - Pp. 287-291.
- 35. Labeyrie A. Speckle interferometry observations at Mount Palomar. // Nouvelle Revue d'Optique. - 1974. - V. 5. - Pp. 141-151.
- McAlister H. A. Speckle interferometric measurements of binary stars. I.
 // Astrophysical Journal. 1977. V. 215. Pp. 159-165.
- McAlister H. A. Speckle interferometry of spectroscopic binaries . // Bulletin of the American Astronomical Society. - 1977. - V. 9. - Pp. 599-599.
- Свечников М. А., Перевозкина Е. Л. Каталог фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд Ч.1.(РГП и ~ КW

системы) // Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей затменных переменных звезд типа РГП и некоторые результаты его статистической обработки сб. тр. Изд. Уральского университета: Екатеринбург. — 1999. — С. 1-30.

- Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи // Изд. Наука, Главная редакция физико-математической литературы: Москва. — 1973. — 899 с.
- 40. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной репрессионный анализ к.1 // Изд. Финансы и Статистика : Москва. — 1986. — 366 с.
- 41. Форсайт Дж. Машинные методы математических вычислений // Изд. Наука, Главная редакция физико-математической литературы: Москва. 1980. 180 с.
- Свечников М.А. Классификация и физические характеристики затменных переменных звезд.// Дис.док.физ.-мат.наук. М: Гос.астрон. ин-т им. П.К.Штернберга.— 1985. — 292 с.
- 43. Кузнецова Э. Ф., Свечников М. А. The mass distribution of close binary systems with MS-components. // труды Тартусской обсерватории. 1990. N. 107. С. 26.
- 44. Свечников М. А. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд.//Изд.Иркутского университета: Иркутск. 1986. 225 с.
- 45. Свечников М. А. Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд. // Уч.записки УрГУ: Свердловск 1969. N 88 178 с.
- 46. Свечников М. А., Истомин Л. Ф., Грехова О. А. Разработка и применение простых критериев для массовой классификации затменных

переменных звезд. І. Разработка критериев для массовой классификации затменных переменных //Переменные звезды. — 1980. — Т. 21. С. 399-412.

- Andersen J. Accurate masses and radii of normal stars // Astronomy and Astrophysics. - 1991. - V. 118. - Pp. 225-260.
- Andersen J., Clausen J. V., Gimenez A. // Absolute dimensions of eclipsing binaries. XX. GG LUPI : young metal-deficient B stars. Astronomy and Astrophysics. - 1993. - V. 277. - Pp. 439-451.
- Popper D. M. Rediscussion of Eclipsing Binaries. XVI. The Detached Early A Type Binaries PV Cassiopeiae and WX Cephei // The Astrophysical Journal. - 1987. - V. 93. - Pp. 672-677.
- Popper D. M. VZ Canum Venaticorum and AI Hydrae, Detached F Type Binaries with Variable Components // The Astrophysical Journal. - 1988.
 - V. 95. - Pp. 190-198.
- Popper D. M. Main-Sequence G and K Stellar Masses // The Astrophysical Journal. - 1993. - V. 404. - pt. 2. L190.
- Popper D. M. Rediscussion of Eclipsing Binaries. XVIII. Faint Secondaries in the Spectra of Early B-Type Systems //Publications of the Astronomical Society of the Pacific. - 1993. - V. 105. - Pp. 721-730.
- 53. Popper D. M., Hill G. J. Rediscussion of Eclipsing Binaries. XVII. Spectroscopic Orbits of OB Systems with a Cross-Correlation Procedure // The Astronomical Journal. - 1991. - V. 101. - Pp. 600-615.
- 54. Stickland D., Koch R. H., Pfeiffer R. Spectroscopic binary orbits from ultraviolet radial velocities. Paper 10: CW Cephei (HD 218066) // Observatory. - 1992. - V. 112. - Pp. 277-281.

- 55. Gimenez A., Clausen J. V., Andersen J. Four-colour photometry of eclipsing binaries XXIA. Photometric analysis and apsidal motion study of V346 Centauri. // Astronomy and Astrophysics. - 1986. - V. 160. -Pp. 310-320.
- 56. Гершберг Р. Е. Вспыхивающие звезды малых масс. // Изд. Наука, Главная редакция физико-математической литературы: Москва. — 1978. — 128с.
- 57. Kitamura M., Nacamura J., Yamasaki A. The Am close binary system AN Andromedae. //Annals of the Tokyo Astronomical Observatory. - 1983.
 - V. 19. - Pp.361-373.
- Andersen J., Clausen J. V., Nordstrom N. Absolute dimensions of eclipsing binaries. XVI. V1031 Orionis. //Astronomy and Astrophysics. - 1990. -V. 228 - Pp.365-378.
- Leushin V. V., Snezhko L. I. Helium abundance in the atmosphere of V380-CYGNI - evolutionary status of the system. // Astrophysics. - 1981. --V. 17. - Pp.315-320.
- Raja T.// New spectroscopic orbital elements of the B-type binary HR
 7551. Astronomy and Astrophysics. 1994. V. 284 Pp.82-84.
- Hill G., Fisher W.A.// Studies of early-type variable stars. II. The orbit and masses of HR 7551. Astronomy and Astrophysics. - 1984. - V. 139 -Pp.123-131.
- Jorgensen H. E., Gronbech B. Four-colour photometry of eclipsing binaries.
 IXb. AI Hya, light curves and photometric elements. //Astronomy and Astrophysics. - 1978. - V. 66 - Pp.377-383.

- Martin B. E., Hube D. P., Lyder D. A. The ellipsoidal variable 42 Persei: observations and model. //Publications of the Astronomical Society of the Pacific. - 1990. - V.102. - Pp.1153-1160.
- 64. Свечников М. А., Кузнецова Э. Ф. Каталог приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменныхзвезд, Т.2. //Изд. Уральского университета: Свердловск. — 1990. — 230 с.
- Popper D. M. Six Main-Sequence eclipsing binaries of types A to F // Astrophysical Journal. — 1971. — V. 166. Pp.361-372.
- 66. Maeder A., Meynet G. Tables of evolutionary star models from 0.85 to 120 solar mass with overshooting and mass loss. // Astronomy and Astrophysics, Supl.Ser. - 1988. - V. 76. - Pp.411-425.
- 67. Горда С. Ю., Свечников М. А. Определение эмпирических зависимостей масса-светимость и масса-радиус для звезд главной последовательности - компонентов затменных двойных систем // Астрономический Журнал. — 1998. — Т. 75.— С. 896-902.
- Henry T. J., McCarthy D. W., Donald W. Jr. The Mass-Luminosity Relation for Stars of Mass 1.0 to 0.08 M (solar) //Astronomical Journal. -, 1993. - V .106. Pp. 773-789.
- Veeder G. J. Luminosities and temperatures of M dwarf stars from infrared photometry. //Astronomical Journal. — 1974. — V. 79. — Pp. 1056-1072.
- 70. Popper D. M. Stellar masses. //Annual Rev.Astron.Astrophys. 1980. V. 18. Pp. 115-164.
- 71. Chambrier G., Baraffe I. CM Draconis and YY Geminorum: Agreement Between Theory and Observation. //Astrophysical Journal. — 1995. — V. 451. — L29-L32.

- 72. Lacy C. H. Absolute dimensions and masses of the remarkable spotted dM4e eclipsing binary flare star CM Draconis. // Astrophysical Journal. – 1977. – V.218. – Pp. 444-460.
- 73. Metcalfe T. S., Mathieu R. D., Latham D. W., et al. The Low-Mass Doublelined Eclipsing Binary CM Draconis: A Test of the Primordial Helium Abundance and the Mass-Radius Relation near the Bottom of the Main Sequence // Astrophysical Journal. — 1996. — V. 456 — Pp. 356-364.
- 74. Горда С. Ю., Свечников М. А. Эмпирические зависисмости L M, R М и М – T_{eff} для звезд главной последовательности компонентов тесных двойных систем и звезд малых масс. // Астрономический Журнал. – 1999. – Т. 76 – С. 598-603.
- Kovaleva D. A. Studies of intermediate-mass stellar models using eclipsing binaries show affiliations. // Astronomy Reports - 2002. - V. 46. - Pp.233-245.
- 76. Ibanoglu C., Soydugan F., Soydugan E., Dervisoglu A. Angular momentum evolution of Algol binaries //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society - 2006. - V. 373. - Pp. 435-448.
- 77. Malkov O. Yu. Mass-luminosity relation of intermediate-mass stars.
 //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2007. V. 382. —
 Pp. 1073–1086.
- Torres G., Andersen J., Gimenez A. Accurate masses and radii of normal stars: modern results and applications // The Astronomy and Astrophysics Review - 2007. - V. 18. - Pp. 67-126.
- 79. Henry T. J. The Mass-Luminosity relation from end to end. // ASP Conference Series, San Francisco: Astronomical Society of the Pacific – 2004. – V.318. – Pp.159-165.

- 80. Eker Z., Soydugan F., Soydugan E., et.al. Main-Sequence effective temperatures from a revised Mass-Luminosity relation based on accurate properties. // The Astronomical Journal — 2015. — V. 149. — article id. 131, 16 pp.
- Eker Z., Soydugan F., Bilir S., Bakis V. Standard stellar luminosities: what are typical and limiting accuracies in the era after Gaia? //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society - 2021. - V. 507. - Pp. 3583-3592.
- 82. Kniazev A. Long-period eclipsing binaries: towards the true massluminosity relation. II. Absolute parameters of the NN Del system //Astrophysics and Space Science - 2020. - V. 365. - article id. 169, 14 pp.
- 83. Malkov O. Yu. Eclipsing binaries and the mass-luminosity relation. //Astronomy and Astrophysics - 2003 - V. 402. - Pp. 1055-1060.
- Trimble V., Ashwanden M. J. Astrophysics in 1999. //Publications of the Astronomical Society of the Pacific. - 2000. - V. 112. - Pp. 434-503.
- Budding E. Spectrographic study of the eclipsing binary system SZ Camelopardalis. //Astrophysics and Space Science - 1975. - V. 36. -Pp. 329-343.
- Guthnick P., Prager R. Funf lichtelektrisch gefundene Veranderliche von sehr fruhem Spektraltypus. // Astronomische Nachrichten – 1930. – V. 239. – Pp. 13-16.
- Wesselink A. J. A study of SZ Camelopardalis. // Annalen van de Sterrewacht te Leiden - 1941. - V. 17. - Pp. C1-C68.
- Kitamura M., Yamasaki A. Photoelectric observations of the close binary system SZ Camelopardalis. // Tokyo Astron. Bull., Second Ser. - 1972.-N.219. - Pp. 2563-2575.

- Polushina T. S. Photoelectric observations of SZ Camelopardalis. // Peremennye Zvezdy — 1977. — N. 20. — Pp. 473-480.
- 90. Chochol D. Photoelectric photometry of the close binary SZ-Camelopardalis in the intermediate passband filters. // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso - 1981. - V. 10. - Pp. 89-124.
- 91. Plaskett J. The O-Type Stars. // Publications of the Dominion Astrophysical Observatory - 1924.- V. 2. - Pp. 286-288.
- 92. Chochol D. The Close Binary SZ Camelopardalis A Semi-detached System. // Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia. — 1980. — V.31. — Pp. 321-343.
- 93. Mayer P., Lorenz R., Chochol D., Irsmambetova T. R. SZ Cam earlytype eclipsing binary with a third body. // Astronomy and Astrophysics – 1994. – V. 288. – Pp. L13-L16.
- 94. Lorenz R., Mayer P., Drechsel H. SZ Camelopardalis an early-type eclipsing binary embedded in a multiple system. // Astronomy and Astrophysics - 1998. - V. 332. - Pp. 909-927.
- 95. Harries T. J., Hilditch R. W., Hill G. Interacting OB star binaries: LZ Cep, SZ Cam and IU AUR // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society - 1998. - V. 295. - Pp. 386-396.
- 96. Mason B. D., Gies G. R., Hartkopf W. I., et.al. ICCD Speckle Observations of Binary Stars. XIX. an Astrometric/Spectroscopic Survey of O Stars. // The Astronomical Journal. - 1998. - V. 115. Pp. 821-847.
- 97. Slettebak A. The Spectra and Axial Rotational Velocities of the Components of 116 Visual Double-Star Systems. //Astrophysical Journal. - 1963. - V. 138. - Pp. 118-139.

- 98. Abt H. A. Visual multiples. VII. MK classifications. . //Astrophysical JournalJournal, Suppl. Ser. - 1981. - V. 45. - Pp. 437-456.
- 99. Rakos K. D. Photometric area scanner. // Applied Optics. 1965. V. 4.
 Pp. 1453-1456.
- 100. Franz O. G. Photometry and astrometry of close double stars by a photometric scanning technique. // Lowell Observatory Bulletin. 1966.
 V. 6. Pp. 251-256.
- 101. Горда С. Ю. Применение метода сканирования для наблюдений переменных звезд в визуально-двойных системах //Астрономогеодезические исследования: Динамические и физические характеристики небесных тел. Сб.науч.тр. Свердловск: УрГУ—1988. — С. 131-139.
- 102. Горда С. Ю. К вопросу о точности сканерной фотометрии (численный эксперимент). // Астрономо-геодезические исследования: Физика и динамика звездных систем. Сб.науч.тр. Свердловск: УрГУ — 1991. — С. 119-130.
- 103. Горда С. Ю. Исследование переменных звезд в визуально-двойных системах методом сканирования изображений.//Дис. канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург:С-Петербургский университет. — 1996. — 170 с.
- 104. Горда С. Ю. Результаты долговременного мониторинга кратной системы SZ Cam // Письма в Астрономический Журнал. — 2015. — Т. 41. — С. 303-316.
- 105. Gorda S. Yu. UBVR-Photometry of the Eclipsing Binary SZ Cam // Information Bulletin on Variable Stars. — 2000.— Nº 4839. — Pp. 1-4.

- 106. Gorda S. Yu., Balega Yu. Yu., Pluzhnik E. A. and Shkhagosheva Z. U Parameters of the apparent relative orbit of the third body in the SZ Cam system. // Astrophysical Bulletin. - 2007. V. 62. - Pp. 352-359.
- 107. Gorda S. Yu., Balega Yu. Yu., Pluzhnik E. A. and Shkhagosheva Z. U Visual orbit of the third body on the eclipsing binary SZ Cam. // Astronomical and Astrophysical Transactions. - 2007. V. 26. - Pp. 145-146.
- 108. Gorda S. Yu. VizieR Online Data Catalog: Long-term monitoring of SZ Cam (Gorda+, 2015) // VizieR Online Data Catalog. 2015. V. 41. Pp. 276-288. Originally published in Astronomy Letters
- 109. Michalska G., Pigulski A., Steslicki M. and Narwid A. A CCD search for variable stars of spectral type B in the northern hemisphere open clusters. VII. NGC 1502 Acta Astronomica - 2009. - V. 59. - Pp. 349-370.
- 110. Tamajo E., Munari U., Siviero A., et al. Asiago eclipsing binaries program
 IV. SZ Camelopardalis, a β Cephei pulsator in a quadruple, eclipsing
 system. Astronomy & Astrophysics. 2012. V. 539. id.A139 10pp.
- 111. Prsa A., Zwitter T. A computational guide to physics of eclipsing binaries.
 I. Demonstrations and Perspectives . // The Astrophysical Journal. 2005.
 V. 628. Pp. 426-438.
- 112. Wilson R. E. and Devinney E. J. Realization of accurate close-binary light curves: Application to MR Cygni . // The Astrophysical Journal. — 1971. V. 166. — Pp. 605-619.
- 113. Balega I. I., Balega Yu. Yu., Maximov A. F, et al. Speckle interferometry of nearby multiple stars. IV. Measurements in 2004 and new orbits . // Astrophysical Bulletin. - 2007. V. 62. - Pp. 339-351.

- Mayer P., Drechsel H., Kubat J., Slechta M. The O-type eclipsing binary SZ Camelopardalis revisited. // Astronomy and Astrophysics. — 2010.
 V. 524. — id.A1. 5 pp.
- 115. Горда С. Ю. Новая спектрофотометрия SZ Сат (проблема третьего компонента). //Писъма в Астрономический Журнал. — 2008. — Т. 34. — С. 351-361.
- 116. Pigulski A., Jerzykiewicz M. Ratajczak M. and et al. Pulsations in close binaries from the BRITE point of view. //Second BRITE-Constellation Science Conference: Small satellites—big science, Proceedings of the Polish Astronomical Society volume 5, held 22-26 August, 2016 in Innsbruck, Austria. Edited by Konnstanze Zwintz and Ennio Poretti. Polish Astronomical Society, Bartycka 18, 00-716 Warsaw, Poland. — Pp. 120-127.
- 117. Southworth J. and Bowman D. M. High-mass pulsators in eclipsing binaries observed using TESS. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2022. V. 513. - Pp. 3191-3209.
- 118. Musaev F. A. The coude echelle spectrometer of the 1-m Special Astrophysical Observatory telescope. // Astronomy Letters. — 1996. — V. 22. — Pp. 715-719
- 119. Панчук В. Е., Пискунов Н. Е., Клочкова В. Г., Юшкин М. В., Ермаков С. В. Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-метрового телескопа БТА. Х. Позиционные и фотометрические характеристики кварцевого эшелле-спектрографа НЭС с крупноформатной матрицей "Уппсала ПЗС". // Препринт Специальной Астрофизической Обсерватории — N. 169.

- 120. Gorda S. Yu. . Confirmation of a Double Nature of the Third Body in SZ Cam. // Information Bulletin on Variable Stars. 2002. Nº 5345. Pp. 1-4.
- 121. Panchuk V. E., Yushkin M. V. and Yakopov M. V. High-resolusion spectrographs with optical fiber input. // Astrophysical Bulletin. 2011.
 V. 66. Pp. 355-370.
- 122. Krushinsky V. V., Popov A. A., and Punanova A. F. Upgrade of the fiber-fed spectrograph of the Kourovka astronomical observatory. // Astrophysical Bulletin. - 2014. V. 69. - Pp. 497-505.
- 123. Горда С. Ю., Захарова П. Е., Крушинский В. В., Кузнецов Э. Д. 1.2м альт-азимутальный телескоп Коуровской обсерватории. // Физика космоса: Тр. 40-й международ. студ. науч. конф. Екатеринбург: Издво Урал.ун-та, 2011. — 400 С. — 2011. — С. 110-112.
- 124. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. // М.: изд.Наука — 1968. — 800 с.
- 125. *Куто П.* Наблюдения визуально-двойных звезд. // *М.: Изд.Мир* 1981. 115 с.
- 126. Зверев М. С., Кукаркин Б. В., Мартынов Д. Я. и др. Методы изучения переменных звезд. Т.Ш // М.-Л. ОГИЗ — 1947. — 659 с.
- 127. Maximov A. F., Balega Yu. Yu., Beckmann U. and et al. Speckle interferometer of the 6 m telescope. // Bulletin of the Special Astrophysical Observatory - 2003. - V. 56. - Pp. 102-114.
- 128. Pluzhnik E. A. Differential photometry of speckle-interferometric binary and multiple stars. // Astronomy and Astrophysics — 2005. — V. 431. — Pp. 587-596.
- 129. Zasche P., Uhlay R. R., Kuchakova H. and et al. Collection of minima of elipsing binaries. // Information Bulletin on Variable Stars. - 2014.-Nº 6114. - Pp. 1-19.
- 130. Hohle M. M., Eisenbeiss T., Mugrauer M. and et al. Photometric study of the OB star clusters NGC 1502 and NGC 2169 and mass estimation of their members at the University Observatory Jena. // Astronomische Nachrichten. - 2009. - V. 330. - Pp. 511-517.
- 131. Michalska G., Kubat J., Korcakova D. and et al. The multiple system SZ Cam. // Binary Stars as Critical Tools & Tests in Contemporary Astrophysics, Proceedings of IAU Symposium N 240, Cambridge: Cambridge University Press – 2007. – Pp. 555-557.
- 132. Delgado A .J., Alfaro E. J., Garcia-Pilayo J. M. and Garrido R. Uvby+H(Beta) photometry of the young open clusters NGC 1502 and NGC 2169. // Astronomical Journal. - 1991. - V. 103. - Pp. 891-903.
- 133. Galazutdinov G. // Echelle spectra processing programm package. SAO
 RAS: preprint 1992 N 92.
- 134. Hubeny I., Lanz T. Accelerated complete-linearization method for calculating NLTE model stellar atmospheres // Astronomy and Astrophysics. - 1992 - V. 262. - Pp. 501-514.
- 135. Lanz T., Hubeny I. A grid of NLTE line-blanketed model atmospheres of early B-type stars // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2007. — V. 169. — Pp. 83-104.
- 136. Simon-Diaz S., Herrero A. Fourier method of determining the rotational velocities in OB stars. // Astronomy and Astrophysics. 2007. V. 468. Pp. 1063-1073.

- 137. Горда С. Ю. Кривая лучевых скоростей спектрально-двойной HD 25639 (ADS 2984A). // Писъма в Астрономический Журнал. — 2016. — Т. 42. — С. 762-772.
- 138. Topasna G. A., Kaltcheva N. T. and Paunzen E. Interstellar polarization and extinction towards the young open cluster NGC 1502 // Astronomy and Astrophysics. - 2018. - V. 615. - A166(16).
- 139. Loktin A. V., Gerasimenko T. P., Malysheva L. K. The catalogue of open cluster parameters-second version. // Astronomical and Astrophysical Transactions. - 2001. - V. 20. - Pp. 607-633.
- 140. Tripathi A., Pandey U. S., Kumar B. Photometric study of Galactic open cluster NGC 2129, NGC 1502 and King 12. // Bulletin of the Astronomical Society of India. - 2013. - V. 41. - Pp. 209-226.
- 141. Dias W. S., Alessi B. S., Moitinho A. and Lepine J. R. D. New catalogue of optically visible open clusters and candidates. // Astronomy and Astrophysics. - 2002. - V. 389. - Pp.871-873.
- 142. Paunzen E., Netopil M., Iliev I. Kh. and et al. CCD photometric search for peculiar stars in open clusters. VI. NGC 1502, NGC 3105, Stock 16, NGC 6268, NGC 7235 and NGC 7510. // Astronomy and Astrophysics. — 2005. — V. 443. — Pp. 157-162.
- 143. Cantat-Gaudin T., Anders F., Castro-Ginard A. and et al. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters. // Astronomy and Astrophysics. - 2020. - V. 640. - Pp. A1(17).
- 144. Sanford R. F. The radial-velocity variation of UU Cassiopeiae. // Astrophysical Journal. — 1934. — V. 79. — Pp. 84-88.

- 145. Antokhina E. A. and Kumsiashvili M. I. Analysis of light curves of the tclipsing binary system UU-Cassiopeiae. // Soviet Astronomy. 1992. V. 36. Pp. 25-28.
- 146. Polushina T. S. Analysis of brightness variations in the massive close binary system UU Cassiopeia. // Astronomy Reports. — 2002. —V. 46. — Pp. 900-907.
- 147. Parenago P. P. and Kukarkin B.V. Peremennye Zvezdy. 1940. —V. 5.
 P. 287.
- 148. Kumsiashvili M. I. and Chargeishvilli K.B. Three-color photoelectric observations of UU Cas. // astro-ph arXiv 0907.1047 - 2009. - P. 19
- 149. Martin N. An objective-prism study of galactic structure in Cassiopeia.
 // Astronomy and Astrophysics. 1972. V. 17. Pp. 253-266.
- 150. Markov H., Vince I., Markova N. and Djurasevic G. Spectroscopic Observations of UU Cas. // Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade. - 2010. - V. 90. - Pp. 159-162.
- 151. Markov H., Markova N., Vince I. and Jurasevic G. New spectral observations of the EBS star UU Cas. // Bulgarian Astronomical Journal. - 2011. - V. 15. - Pp. 87-91.
- 152. Djurasevic G. R., Vince I. and Atanackovic O. Accretion disks in massive binary systems. // BINARIES – KEY TO COMPREHENSION OF THE UNIVERSE. ASP Conference Series. Andrej PrŠsa and Miloslav Zejda, eds. Astronomical Society of the Pacific. – 2010. – V. 435. – P. 301.
- 153. Boyarchuk A. A., Bisikalo D. V., Kuznetsov O. A., Chechetkin V. M. Mass Transfer in Close Binary Stars:Gas Dynamical Treatment. // Talor and Francis, London and New York - 2002. - 384 p.

- 154. Бисикало Д. В., Жилкин А. Г., Боярчук А. А. Газодинамика тесных двойных звезд. // М.: изд. ФИЗМАТЛИТ 2013. 632 с.
- 155. Bisikalo D. V., Boyarchuk A. A., Chechetkin V. M. and et al. Threedimensional numerical simulation of gaseous flow structure in semidetached binaries. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1998. — V. 300. — Pp.39-48.
- 156. Bisikalo D. V., Harmanec P., Boyarchuk A. A. and et al. Circumstellar structures in the eclipsing binary η Lyr A. Gasdynamical modelling confronted with observations. // Astronomy and Astrophysics. - 2000. -V. 353. - Pp.1009-1015.
- 157. Harmanec P., Bisikalo D. V., Harmanec P., Boyarchuk A. A., Kuznetsov O. A. On the role of duplicity in the Be phenomenon. I. General considerations and the first attempt at a 3-D gas-dynamical modelling of gas outflow from hot and rapidly rotating OB stars in binaries. // Astronomy and Astrophysics. — 2002. — V. 396. — Pp.937-948.
- 158. Nazarenko V. V., Glazunova L. V. Hydrodynamical modeling of mass transfer in the close binary system β Lyr. Astronomy Reports. - 2003. -V. 47. - Pp.1013-1026.
- 159. Nazarenko V. V., Glazunova L. V. Three-dimensional hydrodynamical modeling of mass transfer in the close binary system β Lyr with an accretor wind. Astronomy Reports. - 2006. - V. 50. - Pp.380-386.
- 160. Djurasevic G. R., Vince I. and Atanackovic O. Accretion disc in the massive binary RY Scuti. The Astronomical Journal. – 2008. – V. 136. – Pp. 767–772,
- 161. Djurasevic G. R., Vince I., Khruzina T. S. and Rovithis-Livaniou E. Accretion disc in the massive V448 Cygni system. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2009. - V. 396. - Pp. 1553-1558.

- 162. Gorda S. Yu. Eclipsing binary UU Cas: Radial-velocity curves. // Astrophysical Bulletin. -2017. V. 72. Pp. 321-329.
- 163. Podsiadlowski P., Joss P. C. and Hsu J. J. L. Presupernova evolution in massive interacting binaries. // Astrophysical Journal. — 1992. — V. 391. — Pp. 246-264.
- 164. Postnov K. A. and Yungelson L. R. The evolution of compact binary star systems. // Living Reviews in Relativity. - 2014. - V. 17. - 180 pp.
- 165. Nieva M. F. and Przybilla N. Atmospheric parameter determination for massive stars via non-LTE spectrum analysis. // EAS Publications Series. Non-LTE Line Formation for Trace Elements in Stellar Atmospheres, Edited by R. Monier, B.Smalley, G. Wahlgren, and Ph. Stee - 2010. -V. 43. - Pp. 167-187.
- 166. Hubeny I., Lanz T. Non-LTE line-blanketed model atmospheres of hot stars. I. Hybrid complete linearization/accelerated lambda iteration method. // Astrophysical Journal. — 1995 — V. 439. — Pp. 875-904.
- 167. Tkachenko A. Grid search in stellar parameters: a software for spectrum analysis of single stars and binary systems. // Astronomy and Astrophysics. 2015. V. 581. id.A129, 18 pp.
- 168. Kononov D. A., Gorda S. Yu. and Parfenov S. Yu. On the gas dynamic features of the interacting binary system UU Cas. // Astrophysical Journal. - 2019. - V. 883. - Pp. 186-196.
- 169. Marsh T. R. and Horne K. Images of accretion discs II. Doppler tomography. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society – 1988.— V. 235. — Pp.269-286.

- 170. Lucy L. B. Optimum strategies for inverse problems in statistical astronomy. // Astronomy and Astrophysics. - 1994. - V. 289. - Pp. 983-994.
- 171. Steeghs D., Marsh T., Knigge C. and et al. Emission from the secondary star in the old cataclysmic variable WZ Sagittae. // Astrophysical Journal. - 2001. - V. 562. - Pp. L145-L148.
- 172. Steeghs D. Replaying the 2001 outburst of WZ Sge. // IAU Colloquium. Compact Binaries in the Galaxy and Beyond, Proceedings of the conference held 17-22 November, 2003 in La Paz, Baja California Sur. Edited by G. Tovmassian and E. Sion. Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica - 2004. - V. 20. - Pp. 178-179.
- 173. Kononov D. A., Kaigorodov P. V., Bisikalo D. V. and et al. Spectroscopy and doppler mapping of the binary SS Cyg during outburst. // Astronomy Reports. - 2008. - V. 52. - Pp. 835-846.
- 174. Richards M. T., Albright G. E. and Bowles L. M. Doppler tomography of the gas stream in short-period Algol binaries. // Astrophysical Journal Letters. - 1995. - V. 438. - Pp. L103-L106.
- 175. Pearce J. A. The orbits of the spectroscopic components of the two helium stars HD 19820 and HD 176853. // Publications of the Dominion Astrophysical Observatory Victoria. - 1927. - V. 4. - Pp. 67-79.
- 176. Gaposchkin S. The eclipsing variables. // Annals of Harvard College Observatory. - 1953 - V. 113. - Pp. 67-149.
- 177. Hill G., Hilditch R.W., Aikman G.C.L. and Khalesseh B. Studies of earlytype variable stars. VIII. The massive binary system CC Cassiopeiae. // Astronomy and Astrophysics. - 1994. - V. 282. - Pp. 455-466.

- 178. Mayer P. Period Changes of early-type close binaries. // Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia. - 1987 - V. 38. - Pp. 58-63.
- 179. Gibson D. M. and Hjellming R. M. Variable radio emission from CC Cassiopeiae and AR Lacertae. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. - 1974 - V. 86. - Pp. 652-660.
- 180. I.D. Howarth I. D. and Prinja R. K. The stellar winds of 203 galactic O stars: a quantitative ultraviolet survey. // Astrophysical Journal Supplement. - 1989 - V. 69. - Pp. 527-592.
- 181. Polushina T. S. Photometric studies of the massive binary CC Cassiopeiae. // Perem. Zvezdy. - 1988 - V. 22. - Pp. 834-836.
- 182. Gorda S. Yu. CCD spectrophotometry of CC Cas. I. Radial velocity. // Astrophysical Bulletin. - 2013. - V. 68. - Pp. 101-106.
- 183. Mennickent R. E., Djurasevich G., Vince I. and et al. New insights on the massive interacting binary UU Cassiopeiae. // Astronomy and Astrophysics. - 2020. - V. 642. - id.A211, 9 pp.
- 184. Djurasevic G. R.An Analysis of Active Close Binaries / CB / Based on Photometric Measurements - Part Two - Active CB with Accretion Discs. // Astrophysics and Space Science. - 1992. - V. 196. - Pp. 267-282.
- 185. Hadrava P., Cabezas M., Djurasevich G. and et al. Spectroscopy of the massive interacting binary UU Cassiopeiae. // Astronomy and Astrophysics. - 2022.- V. 663. - id.A8, 15pp.
- 186. Hadrava P. Orbital elements of multiple spectroscopic stars. // Astronomy and Astrophysics Supplement. — 1995. — V. 114. — Pp. 393-396.
- 187. Hill G., Hilditch R.W., Younger F. and Fisher W.A. MK classifications of some northern hemisphere binary systems. // Memoirs of the Royal Astronomical Society. - 1975. - V. 79. - Pp. 131-144.

- Lucy L. B. The structure of contact binaries. // Astrophysical Journal. –
 1968. V. 151. Pp. 1123-1135.
- 189. Lucy L. B. W Ursae Majoris systems with marginal contact. // Astrophysical Journal. — 1976. — V. 205. — Pp. 208-216.
- 190. Lucy L. B. and Wilson R. E. Observational tests of theories of contact binaries. // Astrophysical Journal. — 1979. — V. 231. — Pp. 502-513.
- 191. Biermann P. and Thomas H. C. Models for contact binaries. // Astronomy and Astrophysics. - 1972. - V. 16. - Pp. 60-65.
- 192. Shu F. H., Lubow S. H. and Anderson L. On the structure of contact binaries. I. The contact discontinuity. // Astrophysical Journal. — 1976. — V. 209. — Pp. 536-546.
- 193. Shu F. H., Lubow S. H. and Anderson L. On various criticisms of the contact discontinuity model. // Astrophysical Journal. 1980. V. 239. Pp. 937-940.
- 194. Flannery B. P. A cyclic thermal instability in contact binary stars. // Astrophysical Journal. — 1976. — V. 205. — Pp. 217-225.
- 195. Mochnacki S. W. Contact binary stars. // Astrophysical Journal. 1981.
 V. 245. Pp. 650-670.
- 196. Bilir S., Karatas Y., Demircan O., Eker Z. Kinematics of W Ursae Majoris type binaries and evidence of the two types of formation. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2005. — V. 357. — Pp. 497-517.
- 197. Pribulla T. and Rucinski S. M. Contact binaries with additional components. I. The extant data. // The Astronomical Journal. - 2006. - V. 131. - Pp. 2986-3007.

- 198. Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity. // The Astronomical Journal. 1962. V. 67. Pp. 591-598.
- 199. Huang S.-S. Problems of close binary systems that involve transfer of angular momentum. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 1966. — V. 4. — Pp. 35-56.
- 200. под.ред. Дж. Е. Прингла и Р. А.Уэйда Взаимодействующие двойные звезды. // Изд. Наука, "физико-математическая литература": Москва. — 1993. — 192 с.
- 201. Zola S., Gazeas K., Kreiner J. M. and et al. Physical parameters of components in close binary systems - VII. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2010. - V. 408. - Pp. 464-474.
- 202. Binnendijk L. Synthetic parameters of five W-type contact binaries. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. - 1984. - V. 96. - Pp. 646-656.
- 203. Djurasevic G., Rovithis-Livaniou H., Rovithis P. and et al. A photometric study of the W UMa-type system U Pegasi. // Astronomy and Astrophysics. - 2001. - V. 367. - Pp. 840-847.
- 204. Rucinski S. M. and Vilhu O. IUE observations of W UMa-type stars. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1983. — V. 202. — Pp. 1221-1232.
- 205. Eaton, J. A. Chromospheric emission of W Ursae Majoris-type stars and its relation to the structure of their common envelopes. // Astrophysical Journal. - 1983. - V. 268. - Pp. 800-806.
- 206. Stepien K., Schmitt J. H. M. M. and Voges W. ROSAT all-sky survey of W Ursae Majoris stars and the problem of supersaturation. // Astronomy and Astrophysics. - 2001. - V. 370. - Pp. 157-169.

- 207. Maceroni C. and van Veer F. The uniqueness of photometric solutions for spotted W Ursae Majoris binaries. // Astronomy and Astrophysics. – 1993. – V. 277. – Pp. 515-520.
- 208. Li L., Zhang F. and Hun Z. The W Ursae Majoris system AK Herculis. // Astronomy and Astrophysics. - 2001. - V. 368. - Pp. 595-600.
- 209. Li L., Zhang F. and Hun Z. Period and light-curve changes in AP Leonis.
 // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2002. V. 54. Pp. 73-77.
- 210. Li L., Hun Z. and Zhang F. The later evolution of the contact binaries AP Leo, AK Her, AB And and AM Leo . // Exotic Stars as Challenges to Evolution, ASP Conference Proceedings. Also IAU Colloquium 187. Edited by Christopher A. Tout and Walter Van Hamme. ISBN: 1-58381-122-2. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific - 2002. - V. 279. -Pp. 331-336.
- 211. Applegate J. H. A mechanism for orbital period modulation in close binaries . // Astrophysical Journal. — 1992. — V. 385. — Pp. 621-629.
- 212. Alton K. B., Nelson R. H. and Terrell D. Period analysis, Roche modeling and absolute parameters for AU Ser, an overcontact binary Ssstem. // Information Bulletin on Variable Stars. - 2018. - Nº 6256. - Pp. 1-22.
- 213. Hiller M. E., Osborn W. and Terrell D. New light curves and orbital solution for AM Leonis. // The Publications of the Astronomical Society of the Pacific. - 2004. - V. 116. - Pp. 337-344.
- 214. Hoffmeister C. 162 neue Veraderliche. // Astronomische Nachrichten. –
 1935. V. 255. Pp. 401-411.

- 215. Worley C. E. and Eggen O. J. A new eclipsing binary: BD +10°2234 (A).
 // The Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1956. V. 68. Pp. 452-455.
- 216. Albayrak B., Selam S.O., Ak T. and et al. Light-time effect in the eclipsing binary system AM Leonis. // Astronomische Nachrichten. — 2005. — V. 326. — Pp. 122-126.
- 217. Hoffmann M. and Hopp U. BV and Narrow-Band Observations of the Eclipsing Binary Am-Leonis. // Astrophysics and Space Science. 1982.
 V. 83. Pp. 391-403.
- 218. Demircan O., Denmar E. and Dundar H. UBV photometry of the contact binary AM Leonis. // Astronomy and Astrophysics, Suppl. Ser. - 1992. -V. 95. - Pp. 213-221.
- 219. Derman E., Demircan O. and Dundar H. 1982-1990 UBV observations of AM Leonis. // Information Bulletin on Variable Stars. - 1991. - Nº 3630.
 - Pp. 1-4.
- 220. Binnendijk L. The orbital elements of W Ursae Majoris systems. // Vistas in Astronomy. - 1970. - V. 12. - Pp. 217-256.
- 221. Xiong X., Liu L. and Qian Sh-B. Investigations into the thermal nonequilibrium of W UMa-type contact binaries. // Research in Astronomy and Astrophysics. - 2018. - V. 18. - article id. 055(10).
- 222. Qian Sh-B., He J., Xiang F. and at el. Period changes of AO Camelopardalis and AM Leonis and tTheir iImplications for the presence of tertiary components and the evolutionary states of the two overcontact binary systems. // The Astronomical Journal. 2005. V. 129. Pp. 1686-1693.

- 223. Hrivnak B. J. New radial velocity curves of six W UMa binaries. // New frontiers in binary star research : a colloquium sponsored by the U.S. National Science Foundation and the Korean Science and Engineering Foundation, Seoul and Taejon, Korea, November 5-13, 1990. Edited by Kam-Ching Leung and Il-Seong Nha. San Francisco, Calif. Astronomical Society of the Pacific. - 1993. - V. 38. - Pp. 269-274.
- 224. Pribulla T., Rucincki S.M., Conidis G. and et al. Radial Velocity Studies of Close Binary Stars. XII. // The Astronomical Journal. - 2007. - V. 133. - Pp. 1977-1987.
- 225. Gorda S. Yu. Spectrometric and photometric study of the eclipsing variable AM Leo. // Astrophysical Bulletin. 2016. V. 71. Pp. 64-74.
- 226. Gorda S. Yu., Matveeva E. A. New light-time curve of eclipsing binary AM Leo. // Information Bulletin on Variable Stars. - 2017. - № 6227. - Pp. 1-6.
- 227. Gorda S. Yu. Цикличность изменений внезатменного блеска и периода тесной двойной системы типа W UMa AM Leo. // Астрономический Журнал. — 2020. — Т. 97. — С. 924-938.
- 228. Demircan O. and Denmar E. A period study of AM Leonis. // Astronomical Journal. - 1992. - V. 103. - Pp. 593-598.
- 229. Hanna M. A. and Awadalla N. S. Orbital period variation and morphological light curve studies for the W UMa binary BB Pegasi. // Journal of The Korean Astronomical Society. - 2011. - V. 44. - Pp. 97-108.
- 230. Sobolev A. M., Gorda S. Yu. and Davydova O. A. Discovery of irregular variability of five stars in the vicinity of the young stellar object V645 Cygni. // Information Bulletin on Variable Stars. 2013. № 6061. Pp. 1-6.

- 231. Gorda S. Yu., Lyaptsev A. P. and Sobolev A. M. Spot activity of the new W UMa-type variable GSC3599-2569. // Astrophysical Bulletin. - 2015. - V. 70. - Pp. 109-116.
- 232. Gorda S. Yu. and Vatolin Y. Possible periodic spot activity of the new W UMa-type variable GSC 3599-2569. // Peremennye Zvezdy (Variable Stars). - 2021.- V. 41. - Pp. 19-26.
- 233. Hoffmeister C., Rohlfs E. and Ahnert P. Die veraenderlichen Sterne der noerdlichen Milchstrasse Teil VI. // Veroeffentlichungen der Sternwarte in Sonneberg. - 1951. - V. 1. - Pp. 413-498.
- 234. Cohen M. The nature of V645 Cygni = CRL 2789. // The Astrophysical Journal. - 1977. - V. 215. - Pp. 533-540.
- 235. Humphreys R. M., Merrill K. M. and Black J. H. The perplexing spectrum of AFGL 2789 (V645 Cyg). // Astrophysical Journal. — 1980. — V. 237. — Pp. L17-L20.
- 236. Lada C. J., Blitz L., Reid M. J. and Moran J. M. VLBI observations of the water vapor masers in Cepheus A, S 252 a, Gl2789, GL 2139, CO 59.79+0.04, W 33 b, and U Orionis. // Astrophysical Journal. — 1981. — V. 243. — Pp. 769-777.
- 237. Morris M. and Kazes I. An unusual OH maser associated with V645 Cyg.
 // Astronomy and Astrophysics. 1982. V. 111. Pp. 239-241.
- 238. Torrelles J. M., Rodriguez L. F., Canto J. and et al. Are interstellar toroids the focusing agent of the bipolar molecular outflows? // Astrophysical Journal. - 1983. - V. 274. - Pp. 214-230.
- 239. Goodrich R. W. V645 Cygni and the duck nebula. // The Astrophysical Journal. - 1986. - V. 311. - Pp. 882-894.

- 240. Val'tts I. E., Slysh V I., Voronkov M A. J. and Migenes V. A protoplanetary disk in V645 Cyg as seen with H2O and methanol Masers.
 // Astronomical Society of the Pacific. Conference Series 2002. V. 279.
 Pp. 279-284.
- 241. Clarke A. J., Lumsden S. L., Oudmaijer R. D. and et al. Evidence for variable outflows in the young stellar object V645 Cygni. // Astronomy and Astrophysics. - 2006. - V. 457. - Pp. 183–188.
- 242. Testi L., Palla F. and Natta A. A search for clustering around Herbig Ae/Be stars. II. Atlas of the observed sources. // Astronomy and Astrophysics Supplement. - 1998. - V. 113. - Pp. 81-121.
- 243. Bowey, J. E., Adamson A. J. and Yates J. A. Galactic environment and the 10-μm silicate feature of young stellar objects. // Monthly Notice of the Royal Astronomical Society. - 2003. - V. 340. - Pp. 1173-1189.
- 244. Miroshnichenko A. S., Hofmann K.-H., Schertl D. and et al. A new spectroscopic and interferometric study of the young stellar object V645 Cygni. // Astronomy and Astrophysics. — 2009. — V. 498. — Pp. 115–126.
- 245. Miroshnichenko A. S., Ivezich Z., Vinkovich D. and et al. Dust emission from Herbig AE/BE stars: evidence for disks and envelopes . // The Astrophysical Journal. - 1999. - V. 520. - Pp. L115-L118.
- 246. Hamann F. and Persson S. E. High-resolution spectra of the luminous young stellar object V645 Cygni . // The Astrophysical Journal. 1989.
 V. 339. Pp. 1078-1088.
- 247. Shevchenko V. S., Grankin K. N., Ibragimov M. A. and et al. Periodic phenomena in Ae/Be Herbig stars light curves - Part one - light curves classification and digital analysis methods . // Astrophysics and Space Science. - 1993. - V. 202. - Pp. 121–136.

- 248. Gorda S. Yu, Bisyarina A. P., Sobolev A. M. and Parfenov S. Yu. Longterm brightness and color variations of the young variable star V645 Cyg. // Peremennye Zvezdy (Variable Stars). - 2022. - V.42. - N 11. - Pp. 87-105.
- 249. Shenavrin V. I., Taranova O. G. and Nadzhip, A. E. Search for and study of hot circumstellar dust envelopes. // Astronomy Reports. 2011. V. 55. Pp. 31-81.
- 250. Parfenov S. Yu. and Sobolev A. M. On the Class II methanol maser periodic variability due to the rotating spiral shocks in the gaps of discs around young binary stars. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2014. - V. 444. - Pp. 620-628.
- 251. Alksnis A. and Alksne Z. Carbon stars in a field in Cygnus. // Riga: Latvian SSR Radioastrophysical Observatory. — 1988. — 269 c.
- 252. Stetson P. B. On the automatic determination of light-curve parameters for cepheid variables . // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 1996. — V. 108. — Pp. 851-576.
- 253. Gorda S. Yu. and Sobolev A. M. 3UC 281-203711: a new variable with total eclipses. // Peremennye Zvezdy Prilozhenie. 2011. V. 11. Pp. 19-26.
- 254. Gorda S. Yu. and Sobolev A. M. First solution of the light curve of the new variable star 3UC 281-20371. // Information Bulletin on Variable Stars. — 2012. — Nº 6036. — Pp. 1-5.