СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1. Общая характеристика работы и ее краткое описание

Диссертация посвящена исследованию четырех астрофизических объектов, испытавших вспышки с большим энерговыделением в оптической области спектра. Абсолютные величины этих объектов в максимуме вспышек находятся в диапазоне M_V от -6^m до -10^m. Два объекта исследования, CI Cam и V4641 Sgr, известны как рентгеновские транзиентные источники. V838 Mon и V4332 Sgr являются пекулярными новыми неизвестной пока природы, которые по своему энерговыделению близки к классическим новым. В пике вспышек светимость всех этих объектов превышала критическую эддингтоновскую светимость. Огромные (сверхкритические) светимости объединяют эти звезды в нашем исследовании. Понимание механизмов большого энерговыделения имеет существенное значение для астрофизики. В Лаборатории физики звезд САО мы исследовали разные объекты со вспышками и большим энерговыделением, но для данной диссертации мы выбрали самые интересные из них, каждый из которых уникален для своего класса. Два из них оказались представителями нового класса астрофизических объектов.

Рентгеновские транзиентные источники – это объекты, появляющиеся на рентгеновском небе на некоторое время, а затем исчезающие. Появление такого источника чаще всего связано с эпизодом аккреции вещества на компактный или релятивистский объект: белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру в двойных звездных системах. При падении вещества на вращающуюся нейтронную звезду с магнитным полем наблюдается модуляция потока рентгеновского излучения с периодом вращения. При открытии такой модуляции можно сделать вывод о наличии нейтронной звезды в двойной системе. В случае падения вещества на черную дыру наблюдается быстрая переменность в шкале секунд – десятков секунд. По рентгеновскому спектру такое событие можно идентифицировать по "хвосту" жесткого излучения, распространяющемуся до нескольких сотен КэВ. В эпизодах сверхкритической аккреции на черную дыру возможно испускание релятивистских струй в противоположных направлениях. Релятивистские струи часто наблюдаются в радиодиапазоне у активных ядер галактик и квазаров, и длина таких струй может достигать нескольких мегапарсек. У галактических двойных систем – источников струй длина струй достигает десятков парсек. Массы черных дыр в ядрах активных галактик в миллионы раз больше масс черных дыр в двойных системах. Поэтому рентгеновские двойные со струями называются микроквазарами.

Появление рентгеновского транзиентного источника сопровождается оптической вспышкой, хотя это происходит не всегда. У некоторых транзиентных источников в системах OB- или Me-звезд заметного поярчания в оптике не выявлено.

Рентгеновский транзиентный источник XTE J0419+56, появившийся на рентгеновском небе 31 марта 1998 г. и достигший максимума интенсивности 1 апреля, был отождествлен с переменной B[e]-звездой CI Cam. Пик вспышки был очень коротким, но сама вспышка в рентгеновском диапазоне и в оптике продолжалась около месяца. Амплитуда оптической вспышки была по крайней мере $3^m.5$ в полосе R (максимум оптического блеска, вероятно, был пропущен наблюдателями). В рентгеновском диапазоне не было обнаружено ни пульсаций, ни быстрой переменности потока излучения. Вспышка была зарегистрирована в широком диапазоне длин волн от радио- до рентгеновского диапазона. Это пока единственный известный рентгеновский транзиент, наблюдавшийся среди звезд с B[e]-феноменом. Природа B[e]-звезд еще недостаточно ясна и дискутируется. Среди B[e]-звезд есть B[e]-сверхгиганты, ярчайшие звезды в галактиках, которые доходят по светимости до уровня ярких голубых переменных звезд (LBV). В пике вспышки оптический блеск звезды CI Cam превысил блеск в спокойном состоянии в 25 раз. Подобные оптические вспышки B[e]-звезд еще не наблюдались ни в нашей, ни в соседних галактиках. Кроме того в радиодиапазоне через несколько дней после максимума на VLA наблюдались s-образные радиоструи, из-за чего этот объект несколько лет считался микроквазаром. Позднее с помощью наблюдений на VLBA этот результат был пересмотрен, и объект был исключен из списков микроквазаров. Но наблюдения на VLBA обнаружили расширяющуюся с замедлением биполярную радиотуманность, результат выброса газа из системы во время вспышки. Вспышка CI Cam привлекла внимание многих исследователей. Однако, результаты исследований оказались противоречивыми. Ясно, что CI Cam – двойная система, содержащая компактный объект. В разных работах предполагалось, что система содержит черную дыру, нейтронную звезду или белый карлик, а причина вспышки объяснялась сверхкритической аккрецией на черную дыру или нейтронную звезду, а также термоядерным взрывом на поверхности белого карлика. Расстояние до системы оставалось тоже неопределенным, от 1 до 5–8 кпк. В САО получен уникальный ряд спектральных наблюдений CI Cam на БТА и 1-м телескопе Цейсса во вспышке и в спокойном состоянии в течение следующих после вспышки 7 лет. Ценность этих наблюдений еще и в том, что спектроскопия в САО сопровождалась фотометрическими наблюдениями как в САО, так и на Крымской станции ГАИШ в сотрудничестве с нашими коллегами из Московского университета. Целью нашего исследования было определение орбиты и спектральных классов компонентов системы, изучение строения оболочки B[e]-звезды и изменений, происшедших с нею при рентгеновской вспышке, природы оптической переменности, светимостей компонентов и эволюционной стадии системы.

Другой объект исследования из группы рентгеновских транзиентных источников – V4641 Sgr (ранее ошибочно отождествленный с GM Sge) также был известен как переменная звезда до большой рентгеновской вспышки 15 сентября 1999 г. В каталогах рентгеновских источников объект значится как SAX J1819.3-2525 или XTE J1819-254. До вспышки в 1999 г. он был известен как эллипсоидальная или затменная двойная система, которая в 1978 г. испытала необычную вспышку с амплитудой до $2^m.0$ B. В САО еще в 1996 г. были получены спектры этой звезды, спектральный класс ее был A0 без каких либо особенностей или эмиссионных линий, указывающих на то, что в системе есть аккреционный диск и перенос массы. В большой вспышке 1999 г. у звезды наблюдались радиоструи, и на основании этих наблюдений объект был отнесен к микроквазарам. Как показали последующие наблюдения, у звезды происходят рентгеновские вспышки меньшей, чем в 1999 г., мощности с частотой 1 раз в год. В таких вспышках звезда проявляет быструю переменность в шкале десятки секунд с амплитудой, достигающей $1^m.5$, имеющую характер быстрых всплесков. Такое поведение аккрецирующих черных дыр было предсказано еще в работах Шварцмана (1971), Шакуры и Сюняева (1973). В первых спектроскопических работах была определена масса компактного объекта, свидетельствующая о том, что он является кандидатом в черные дыры. Высказывалось предположение, что V4641 Sgr – экземпляр разделенной двойной системы с черной дырой, и что таких черных дыр, не проявляющих или чрезвычайно редко проявляющих себя в наблюдениях, может быть много. Система имеет большое наклонение орбиты, но не показывает затмений рентгеновского источника во вспышке. В нашей работе был поставлен спектроскопический эксперимент: во время нижнего соединения черной дыры просмотреть ее окрестности на просвет, на фоне находящейся позади нее нормальной звезды, чтобы установить причину ее вспышек. Результаты этого эксперимента приведены в настоящей работе.

Другая актуальная проблема астрофизики – пекулярные красные новые звезды со спектрами класса K–M во вспышках, которые не проходят небулярную стадию, как классические новые, а превращаются в холодные сверхгиганты. Впервые объект такого класса появился в 1988 г. в галактике Андромеды. В различных исследованиях звезда V1006/7 была описана как новая звезда, и как переменный красный сверхгигант, и эти свойства оказались двумя разными сторонами одного и того же явления. Впоследствии две такие красные новые звезды V4332 Sgr и V838 Mon вспыхнули в нашей Галактике, в 1994 и в 2002 г. соответственно. Вспышки этих звезд не сопровождались ни рентгеновским, ни радиоизлучением. В САО РАН получены спектры V838 Mon во вспышке и в спокойном состоянии после вспышки, а для V4332 Sgr – в спокойном состоянии через 11 лет после вспышки 1994 г. Спектральные наблюдения опять анализировались в совокупности с фотометрией, проводившейся в САО и на Крымской станции ГАИШ, а также с архивной фотометрией по материалам цифровых обзоров неба и коллекций негативов Московской и Зоннебергской обсерваторий. Такое комплексное исследование оказалось источником новых знаний о природе этого нового класса астрофизических объектов. В этом исследовании мы стремились установить причину явления пекулярных красных новых, исследовать состав химических элементов в их фотосферах, определить их спектральные классы, светимости и расстояния.

В таблице 1 приводятся основные данные об исследованных объектах: обозначения, координаты, звездные величины в спокойном состоянии и в максимуме блеска во вспышках, а также спектральный класс.

Для решения этих проблем использовался российский 6-метровый телескоп БТА со спектрографами среднего разрешения UAGS и SCORPIO, а также 1-м телескоп Цейсса САО со спектрографом UAGS. В работе принимали участие сотрудники нескольких отделов и лабораторий САО, а также сотрудники отдела изучения Галактики и переменных звезд, отдела звездной астрофизики, Крымской станции ГАИШ МГУ и рабочей группы ГАИШ МГУ при Тяньшанской обсерватории в Казахстане. Для фотометрических исследований использовался 1-м телескоп Цейсса САО с ПЗС UBVRcIc-фотометром и 60-см телескоп Цейсса Крымской станции ГАИШ МГУ с различными ПЗС-приемниками и наборами фильтров.

Заметим, что некоторые решения задач наших исследований в первых работах не всегда оказывались правильными, и от них пришлось впоследствии отказаться. В диссертации показаны те аргументы и факты, на основании которых делались наши выводы. В конечном счете использование современных технологий наблюдений и их совершенствование, а также накопление достаточно большого количества наблюдательных данных, как правило, приводит к правильному решению.

Таблица 1. Объекты исследования

Звезда	Другие обозначения	R.A., Decl., 2000	Блеск в спок. сост.	Блеск во вспышке	Спектр. класс
Рентгеновские транзиентные источники:					
CI Cam	MWC 84, KPD	$4^h19^m42^s.11$	$11^m.42 - 11.87V$	$9^m.2V$	B[e]
	KPD 0415+5552	$+55^o59'57''.7$	$12.31–12.63B$	$10.25B$	
	LS V $+55^o16$		$11.74–12.37U$	$10.3U$	
	IRAS 04156+5552				
	XTE J0421+560				
V4641 Sgr	GSC 6848.3786	$18^h19^m21^s.64$	$13.52–13.92V$	$8.9V$	B9III
	XTE J1819-254	$-25^o24'25''.7$	$13.45–13.82R$		
	SAX J1819.3-2525				
Пекулярные красные новые:					
V838 Mon	GSC 4822.39,	$7^h04^m04^s.85$	$15.4–16.3V$	$6.8V$	B3V+B1V
	IRAS 07015-0346?	$-3^o50'51''.1$	$15.8–16.8B$	$7.9B$	
	N Mon 2002				
V4332 Sgr	N Sgr 1994 No.1	$18^h50^m36^s.73$	$17.3–18.0V$	$8.6\ V$	B+M
		$-21^o23'28''.9$	$17.8–19.7B$	$10.0\ B$	

1.2 Актуальность темы

Исследования рентгеновских транзиентных источников актуальны, так как являются источником знаний о поведении вещества в экстремальных условиях. В таких исследованиях могут быть проверены выводы и предсказания теории и фундаментальные законы физики. Исследования космических вспышек рентгеновского излучения и их природы имеют практическое значение, связанное с освоением человеком космического пространства.

С появлением космических рентгеновских обсерваторий, ведущих обзор всего неба в реальном времени, регулярно делаются открытия транзиентных рентгеновских источников и рентгеновских новых звезд. Координаты областей локализации таких источников передаются на наземные оптические и радиообсерватории для последующего отождествления и исследования. Для успешного отождествления транзиентных рентгеновских источников, как правило, требуются срочные оптические наблюдения, пока вспышка продолжается. Сведения о массах релятивистских звезд получают из наземных наблюдений в оптическом диапазоне, когда объекты находятся в спокойном состоянии.

Поиск и исследование релятивистских звезд методами наземной оптической и радиоастрономии тоже актуален. Примером служат истории исследования объектов нашей диссертации CI Cam и V4641 Sgr. Обе эти звезды были открыты и исследованы еще до того, как у них наблюдались вспышки рентгеновского излучения. Предполагалось, что в мощных оптических вспышках у этих объектов наблюдались эпизоды сверхкритической аккреции на релятивистские объекты (у CI Cam – Хайнес и др. (2002), у V4641 Sgr – Ревнивцев и др. (2002а,б)). V4641 Sgr может быть объектом нового, наиболее многочисленного класса двойных систем, содержащих релятивистский компонент – разделенных систем (Хьелминг и др., 2000). Из-за отсутствия непрерывной аккреционной активности они не проявляют или редко проявляют себя в рентгеновских лучах, и вероятность их открытия на орбитальных рентгеновских обсерваториях очень мала. Тем не менее, появляются перспективы открытия и исследования таких систем традиционными методами оптической спектроскопии и фотометрии. Знания о V4641 Sgr актуальны еще и потому, что дают возможность понять поведение одиночных черных дыр, которые еще никогда не наблюдались.

Исследования рентгеновских транзиентных источников методами оптической астрономии актуальны еще и потому, что дают возможность предсказывать появление рентгеновских вспышек. Так на основе фотометрии рентгеновского транзиента BQ Cam (V0332 +53) его рентгеновская вспышка 2004 г. была предсказана за 10 месяцев до этого события

(Горанский и Барсукова, 2004).

Загадка пекулярных новых V4332 Sgr и V838 Mon состоит в том, что они имеют спектры красных сверхгигантов классов K-M во вспышках и не проходят через небулярную стадию. Для того, чтобы понять природу пекулярной новой звезды V1006/7 в M31, Ибен и Тутуков (1992) построили модели вспышек в карликовых двойных системах с "холодным" маломассивным вырожденным карликом. Однако эта модель противоречит современным наблюдениям. Тыленда и соавторы (2005), изучавшие V4332 Sgr, придерживаются мнения, что до вспышки эта звезда была звездой солнечного типа, а вспышка была результатом столкновения или слияния звезд. Появление трех таких объектов за последние 15 лет наводит на мысль, что некоторые красные новые есть среди открытых ранее, но не подтвержденных по спектрам классических новых. Загадка этого нового для астрофизики класса объектов остается нерешенной. Поэтому исследования трех известных объектов как во вспышках, так и в спокойном состоянии являются актуальными.

1.3 Цель диссертации

Исследование направлено на то, чтобы установить наблюдательными методами природу четырех объектов, которые испытали мощные вспышки. Цель исследования CI Cam – определение типа звездных компонентов системы, их физических параметров, выяснение природы B[e]-звезды в системе. Потому наши наблюдения были направлены также на изучение строения околозвездной оболочки и ее реакции на мощную рентгеновскую вспышку. Целью было установить причину вспышки звезды и проверить известные гипотезы о причине вспышки.

V4641 Sgr – система с черной дырой в разделенной двойной системе со звездой спектрального класса B9–A0. Целью исследования было найти следы взаимодействия нормального компонента с черной дырой. Была поставлена задача наблюдения системы в фазе нижнего соединения черной дыры, чтобы увидеть "на просвет" содержимое ее полости Роша.

Пекулярные красные новые звезды представляют собой новый и неизвестный ранее класс объектов. Первая цель исследования – установить, являются эти объекты одиночными или двойными звездами. Следующая цель – исследование компонентов систем и поиск следов взаимодействия между компонентами. Целью исследования спектра V838 Mon во вспышке было уточнение ее эволюционного статуса и сходства или отличия этой звезды от новоподобных звезд, находящихся в пост-AGB стадии эволюции, представителями которых являются FG Sge и объект Сакураи (V4334 Sgr). Целью работы было также установить по архивным фотографиям, по современной фотометрии и спектроскопии, какие изменения в спектральных распределениях энергии двух пекулярных новых произошли в результате вспышек.

1.4 Научная новизна

1. Впервые определены орбитальный период P = 19.41 дня и элементы орбиты CI Cam. Спектральный класс и класс светимости B4 III-V главного компонента определен впервые по водородным линиям высоких порядков в синей области спектра. Ранее оценки спектрального класса делались только по распределению энергии в спектре и часто были ошибочными. Динамическая оценка массы для B[e]-звезды в системе CI Cam $M(B[e]) > 12M_{\odot}$.

2. Впервые обнаружены такие особенности спектральных изменений CI Cam, как снижение интенсивности эмиссионных линий HeI после вспышки относительно уровня их интенсивности до вспышки, запаздывание пика вспышки запрещенной линии [N II] λ5755Å на 210 $\pm$20 дней относительно пика вспышки в рентгеновском диапазоне и тот факт, что поток в этой линии оставался постоянным в течение вспышки.

3. Впервые исследовано взаимодействие релятивистского компонента V4641 Sgr с нормальной звездой методом спектроскопии в нижнем соединении релятивистского компонента. Это привело к открытию газового потока, направленного от наблюдателя, который интерпре-

тируется как часть разреженного кеплеровского газового диска. Впервые определена масса кандидата в черные дыры по скорости газового потока на орбите вокруг него.

4. Впервые доказано, что пекулярная красная новая V838 Mon имеет нормальное, близкое к солнечному, содержание элементов. Поэтому пекулярные красные новые нельзя отнести к звездам, находящимся в пост-AGB стадии эволюции. Этот результат позволяет выделить три известные пекулярные красные новые звезды в новый, неизвестный ранее класс астрофизических объектов.

5. Впервые обнаружены линии лития в спектре V838 Mon.

6. Впервые показано, что до вспышки V838 Mon была горячей голубой звездой с показателем цвета $(B - V)_0 = -0^m.17 \pm 0^m.10$. Ранее считалось, что она была звездой класса F главной последовательности (Мунари и др., 2002 а), или звездой F0III-II (Мунари и др., 2002б). Впервые опубликовано предположение, основанное на изменениях в спектральном распределении энергии в результате вспышки, что взорвавшаяся звезда до вспышки была голубой звездой и имела такое же спектральное распределение энегрии, как и ее компонент класса B3V. Теперь это положение общепризнано.

7. Впервые описана переменность спектров V838 Mon в спокойном состоянии, а в синей области спектра отождествлены запрещенные эмиссии [Fe II], интенсивность которых быстро увеличивается.

8. Впервые описан и интерпретирован спектр V4332 Sgr в синем диапазоне. На основе уникальных фотоснимков московской коллекции и современной фотометрии и спектроскопии V4332 Sgr показано, что голубой компонент, наблюдавшийся в спектральном распределении энергии в 1980–86 годах до вспышки, теперь не виден в спектре. Так что и в этом случае произошел взрыв голубой звезды в двойной системе. Наши наблюдения опровергают предположение, что до вспышки V4332 Sgr была звездой солнечного типа.

Наш длительный семилетний ряд спектроскопических наблюдений CI Cam, полученный в САО, имеет особую научную ценность, так как сопровождался многоцветной фотометрией. Это дает возможность фотометрической калибровки спектров и определения потоков в линиях в физических единицах. Наша спектроскопия CI Cam во вспышке наиболее полна и информативна на фоне всех мировых наблюдательных данных.

Открытие орбитального периода 19.41 дня и определение элементов орбиты, оценка массы главного компонента CI Cam и даже ограничение его размера дают прямую, и уникальную информацию о звездах с B[e]-феноменом. Оценка массы компактного компонента, который возможно является белым карликом, объясняет причину рентгеновской вспышки 1998 г. 19-дневный период подтвержден фотометрическим методом в докладе В.М. Ларионова (Санкт-Петербургский университет) и В.И. Шенаврина (ГАИШ МГУ) на ВАК-2004 "Горизонты Вселенной" в Москве, а также в докладе С. Кларка (Открытый университет, UKL, Англия) на конференции "Звезды с B[e]-феноменом" в 2005 г. в Нидерландах. Наша фотометрия и лучевые скорости в табличном виде доступны в Интернете и используются в зарубежных публикациях. Спектроскопия CI Cam используется в производственной практике студентов Московского, Казанского и Санкт-Петербургского университетов.

Ценность примененного нами спектроскопического метода исследования содержимого полости Роша компактного компонента V4641 Sgr "на просвет" состоит в том, что он может быть применен к другим рентгеновским системам с большим наклонением орбиты.

Наше первое спектральное и фотометрическое исследование пекулярной красной новой V838 Mon, опубликованное в Письмах в АЖ, широко цитируется в мировой литературе (15 цитирований в NASA ADS Abstract Service) и упоминается в ежегодном обзоре мировых достижений "Астрофизика в 2003 г." (Тримбл и Ашванден, 2004). Широко используются в мировой литературе опубликованные нами архивные и современные фотометрические данные по пекулярным красным новым. Принципиальное значение наших архивных изысканий для понимания природы этого феномена и важность результатов спектральных наблюдений на телескопе БТА отмечены оргкомитетом конференции на Ла Пальма (Испания) в 2006 г., и эта оценка отражена в трудах конференции. Особая ценность наших спектроскопических данных по красным новым состоит в том, что они анализируются в совокупности с архивной и современной многоцветной фотометрией.

1.6 Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Результаты семилетней спектроскопии рентгеновского транзиентного источника CI Cam во вспышке и в спокойном состоянии, полученные в САО РАН. Результаты исследования поведения спектра во вспышке: нарушение и последующее восстановление структуры стратифицированной оболочки, реакция внешних слоев оболочки по линии [N II], ионизация окружающего газа вспышкой и выброс газа со скоростью 1200 км/с.

2. Определение орбиты компактного компонента в системе CI Cam с периодом 19.41 ±0.02 дня с эксцентриситетом 0.62±0.07. Динамическая оценка массы для B[e]-звезды $M(B[e]) > 12M_{\odot}$. Определение спектрального класса главного компонента CI Cam B4 III-V по водородным линиям.

3. Классификация V4641 Sgr как разделенной системы, в спектре которой виден только один оптический компонент спектрального класса A0III. Обнаружение разреженного газового потока в системе. Определение по скорости движения вещества в разреженном потоке массы кандидата в черные дыры $7.1 \leq M_{BH} \leq 9.5M_{\odot}$.

4. Доказательство, что пекулярная красная новая V838 Mon – звезда с нормальным, близким к солнечному, содержанием элементов. Открытие в ее спектре сильной линии лития λ6707Å. Вывод, что до вспышки V838 Mon была широкой физической парой, состоящей из

двух звезд класса B, одна из которых взорвалась.

5. Результаты спектроскопии пекулярной красной новой V4332 Sgr. Вывод, что до вспышки система V4332 Sgr состояла из двух звездных компонентов: голубого и красного, и что в 1994 г. произошел взрыв голубого компонента.

1.7 Апробация результатов

Результаты нашей работы докладывались на научных семинарах САО и на следующих конференциях.

1. "Переменные звезды – ключ к пониманию строения и эволюции Галактики". Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения Б.В. Кукаркина (Москва, 1999).
2. "Физика катаклизмических переменных и сходных с ними объектов". Международная конференция, посвященная 65-летию со дня рождения Клауса Бауэрмана (Геттинген, Германия, 2001).
3. "Вспышки классических новых звезд". Международная конференция. (Сиджес, Испания, 2002).
4. "Новые взгляды на микроквазары". 4-й симпозиум по микроквазарам. (Каргезе, Корсика, Франция, 2002).
5. 10-я открытая конференция молодых ученых по астрономии и космической физике (Киев, Украина, 2003).
6. "Горизонты Вселенной". Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2004 (Москва, 2004).
7. "Звезды с B[e]-феноменом". Симпозиум (остров Влиеланд, Нидерланды, 2005).
8. "Природа V838 Mon и ее светового эха". Конференция (остров Ла Пальма, Канарские острова, Испания, 2006).

1.8 Публикации по теме диссертации:

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 работах общим объемом 109 страниц, все работы написаны совместно с другими авторами.

1. Barsukova E.A., Fabrika S.N., Pustilnik S.A., Ugryumov A.V. Optical monitoring of CI Cam after the X-ray burst on April 1, 1998. SAO Bull. V.45, p.145–151, 1998.

2. Barsukova E., Fabrika S.. Spectral monitoring of the rapid X-ray transient CI Cam. "Переменные звезды – ключ к пониманию строения и эволюции Галактики". Сборник трудов. Ред. Н.Н.Самусь, А.В.Миронов. Нижний Архыз. с.154–158. 2000.

3. Hynes R.I., Clark J.S., Barsukova E.A., Callanan P.J., Charles P.A., Collier Cameron A., Fabrika S.N., Garcia M.R., Haswell C.A., Horne K., Miroshnichenko A., Negueruela I., Reig P., Welch W.F., Witherick D.K. Spectroscopic observations of the candidate sgB[e]/X-ray binary CI Camelopardalis. Astron. and Astrophys. V.392, No.3, p.991–1013, 2002.

4. Barsukova E.A., Borisov N.V., Fabrika S.N., Goranskij V.P., Metlova N.V. Spectral and photometric evolution of the B[e]/X-ray transient CI Camelopardalis after its outburst in 1998. ASP Conf. Series V.261, p.463–464, 2002.

5. Барсукова Е.А., Борисов Н.В., Горанский В.П., Лютый В.М., Метлова Н.В. Фотометрическое и спектральное исследование B[e]-звезды и рентгеновского транзиентного источника CI Жирафа. Астрон. журнал, т.79, No.4, с.309–327, 2002.

6. Barsukova E.A., Borisov N.V., Goranskii V.P., Kusakin A.V., Metlova N.V., Shugarov S.Yu. Nova Monocerotis 2002 (V838 Mon) in the early stages of its outburst. AIP Conf. Proc. V.637, p.303–307, 2002.

7. Горанский В.П., Кусакин А.В., Метлова Н.В., Шугаров С.Ю., Барсукова Е.А., Борисов Н.В. Новая Единорога 2002 г. (V838 Mon) на

ранних стадиях вспышки. Письма в Астрон. журнал т. 28, No. 10, с.764–774, 2002.

8. Goranskij V.P., Barsukova E.A., Burenkov A.N., Monin D.N. Rarefied gaseous disk around black hole in the system of V 4641 Sgr. "New Views on Microquasars". Ed-s P.Durouchox, V.Fuchs, J.Rodriguez. Center of Space Physics. Kolkata, India, p.382–384, 2002.
9. Горанский В.П., Барсукова Е.А., Буренков А.Н. Фотометрия и спектроскопия системы V4641 Стрельца в спокойном состоянии. Астрон. журнал, т.80, No.9, с.805–815, 2003.
10. Goranskij V.P., Shugarov S.Yu., Barsukova E.A., Kroll P. V838 Mon before and after its outburst. Inform. Bull. Var. Stars No.5511, p.1–4, 2004.
11. Горанский В.П., Барсукова Е.А., Борисов Н.В., Метлова Н.В., Шугаров С.Ю. Пекулярные новые звезды с красными спектрами K-M во вспышках. ВАК-2004. Тезисы докладов. Труды ГАИШ т.75, с.138–139, 2004 (http://jet.sao.ru/ ~bars/rednovae.htm).
12. Барсукова Е.А., Борисов Н.В., Буренков А.Н., Горанский В.П., Метлова Н.В. Спектральные и фотометрические наблюдения рентгеновского транзиента и B[e]-звезды CI Жирафа в 1998–2004 г. ВАК-2004. Труды ГАИШ т.75, с.147, 2004. (http://jet.sao.ru/~bars/vac2004r.htm).
13. Barsukova E.A., Borisov N.V., Burenkov A.N., Klochkova V.G., Goranskij, V.P., Metlova N.V. The orbital period of CI Cam (XTE J0421+560). Astronomer's Tel. No.416, 2005. (http://jet.sao.ru/~bars/orbit-ce.htm).
14. Barsukova E.A., Borisov N.V., Burenkov A.N., Goranskij V.P., Klochkova V.G., Metlova N.V. The orbital period of the B[e]/X-ray binary CI Cam. Workshop on Stars with the B[e] phenomenon, 10-16 July, 2005. Island of Vlieland, The Netherlands. Abstracts-Posters, p. 42, 2005.
15. Барсукова Е.А., Борисов Н.В., Буренков А.Н., Горанский В.П., Клочкова В.Г., Метлова Н.В. Результаты фотометрических и спектраль-

ных наблюдений CI Жирафа в 1998–2005 гг. Астрон. журнал, т.83, No.8, с.745–760, 2006.

16. Barsukova E., Goranskij V., Abolmasov P. and Fabrika S. Rapid strengthening of iron forbidden lines in the spectrum of V838 Mon. Astronomer's Tel. No.803, 2006.

17. Goranskij V., Barsukova E.A. Historical light curves of peculiar novae V838 Mon and V4332 Sgr. Conference on "The nature of V838 Mon and its light echo". Programme, abstracts, and list of participants. 16–19 May 2006, La Palma, Canary Islands, Spain. P.23. 2006.

18. Barsukova E., Goranskij V. Comparative analysis of blue spectra of the peculiar novae V838 Mon and V4332 Sgr in the quiet state after their outbursts. Conference on "The nature of V838 Mon and its light echo". Programme, abstracts, and list of participants. 16–19 May 2006, La Palma, Canary Islands, Spain. P.26. 2006.

1.9 Личный вклад автора

Автору принадлежит постановка задач, обоснование программ спектральных наблюдений на БТА и на 1-м телескопе САО, участие в наблюдениях на БТА, вся обработка и первичный анализ спектров средней дисперсии, полученных в САО. ПЗС UBVRI-фотометрия выполнена в САО и на Крымской станции ГАИШ МГУ совместно с В.П.Горанским. Наблюдения интерпретировались совместно с С.Н. Фабрикой или В.П. Горанским.

2. Методика обработки наблюдательных данных

Наш наблюдательный материал состоял в основном из спектров средней дисперсии ($\lambda/\Delta\lambda = 1000 \div 3000$), полученных на телескопе Цейсс-1000 со спектрографом UAGS и на телескопе БТА со спектрографами UAGS и SCORPIO с ПЗС-приемниками. Во всех случаях применялась только стандартная методика обработки. В тексте диссертации при необходимости приводятся дополнительно краткие описания процедур обработки.

2.1 Первичная обработка ПЗС-кадров

Мы использовали систему MIDAS, созданную в Южноевропейской обсерватории для анализа различных астрономических данных. Спектры 4-х объектов исследования были получены в основном в моде с длинной щелью. Данные удобно обрабатывать в контексте LONG в MIDAS.

Изображения исследуемого объекта, полученные с ПЗС, сопровождаются дополнительными калибровочными кадрами, с помощью которых устраняют искажения, вносимые оптической системой и приемником. Это кадры байеса (bias), темноты (dark), плоского поля (flat field) и спектра калибровочной лампы – спектра сравнения (reference). Байес – это кадр нулевого уровня интенсивности, полученный с нулевой экспозицией, он корректирует исследуемое изображение за дополнительный заряд к реальному сигналу на ПЗС и определяет фотометрический нуль-пункт данной электронной системы. Этот кадр вычитается из всех кадров объекта и остальных калибровочных кадров. Затем из исследуемого изображения объекта и спектра лампы удаляются следы космических частиц и дефектные элементы ПЗС. Затем вычитается изображение темноты, полученное с длинной экспозицией при закрытом затворе для учета темновой эмиссии (оно нормируется на время экспозиции исследуемого объекта).

Для компенсации низкочастотных неоднородностей отсчетов по полю детектора используют процедуру деления на кадр плоского поля. Получают кадр плоского поля засветкой щели специальной лампой или используют свет сумеречного неба, полученный с широкой щелью. Отсчет каждого пикселя кадра изображения делится на отсчет соответствующего пикселя кадра поля и нормируется на среднее значение отсчетов кадра поля, эта процедура компенсирует неоднородную освещенность (виньетирование) камеры спектрографа и одновременно удаляет некоторые дефекты матрицы (например, следы от пылинок). Неоднородность спектральной чувствительности элементов матрицы частично корректируется использованием инструментальной кривой реакции (см. дальше). Нам пришлось отказаться от использования кадра плоского поля в тех случаях, когда в синей или УФ области спектра, где излучение лампы ослаблено, сигнал от поля был недостаточно накоплен, из-за чего эта процедура увеличивала неточность измерения спектра объекта.

Следующим очень важным этапом обработки ПЗС-изображения является точная двумерная геометрическая коррекция спектров с длинной щелью. Она состоит главным образом в переводе первоначальных пиксельных координат вдоль дисперсии в длины волн и называется "линеаризацией". Для этого используется специально полученное изображение спектра калибровочной лампы, дающей линии источника излучения с известными длинами волн. Для восстановления шкалы длин волн в наших наблюдениях были использованы спектры источника He-Ne-Ar. На изображении спектра лампы находят положения конкретных линий по спектру. Затем строится дисперсионное соотношение для каждого из рядов ПЗС (что позволяет исправить кривизну линий спектра неба вдоль щели). Точность построения дисперсионных кривых получалась как правило $0.1 \div 0.15$Å (6–8 км/сек). Однако, систематические ошибки положений линий со спектрографом UAGS 1-м телескопа иногда достигают 300 км/с, и они хаотично меняются от спектра к спектру, что делает невозможным абсолютные измерения лучевых скоростей с этим спектрографом. Причиной систематических ошибок измеренных длин волн линий спектра на данном приборе могут быть гнутие спектрографа и неодинаковое освещение коллиматора спектрографа светом звезды и лампы спектра сравнения. Для повышения точности измерения лучевой скорости линии HeII $\lambda4686$ Å мы использовали дифференциальный метод определения лучевой скорости относительно стационарных линий FeII в ее окрестностях, лучевую скорость которых мы взяли из спектроскопии высокого разрешения, которая была известна по литературным источникам (подробности далее). Дифференциальный метод дает точность лучевой скорости по сильным линиям 20–25 км/с, а для слабой линии He II

$\lambda 4686$Å – 50 км/с.

Для получения реальных отсчетов спектра звезды еще необходимо вычитание спектра неба. Эта процедура осуществляется полиномиальным представлением спектра неба в рядах изображения выше и ниже спектра объекта. Полученная таким образом "модель" спектра неба вычитается из спектра объекта. Те же этапы обработки проходит и кадр со звездой – спектрофотометрическим стандартом, которая будет использована для перевода инструментальных потоков в стандартные (относительные) энергетические потоки, точнее, плотности потоков.

Теперь, просуммировав отсчеты – инструментальные потоки по рядам спектра вдоль щели, получим одномерный спектр объекта в координатах: длина волны – поток. Эту процедуру в MIDAS называют "extraction".

Чтобы сравнивать получаемые интенсивности с данными из других источников, необходимо перевести инструментальные потоки в физические, выраженные в энергетических единицах эрг/(см^2·с·Å). Для этого сначала учитывают атмосферную экстинкцию в зависимости от воздушной массы в направлении на объект (используют таблицу зависимости атмосферного поглощения от длины волны). Затем используют кривую реакции всего регистрирующего комплекса (response), которая строится делением одномерного спектра звезды-стандарта на известное для нее распределение абсолютного потока. Точности потока после этих процедур при щелевой спектроскопии от 20% до 50%.

2.2 Спектральные измерения и отождествление линий в спектре

Перед тем как перейти к спектральным измерениям различных параметров в спектре, обычно проводят сглаженный континуум по спектру исследуемого объекта, а затем делят на него исследуемый спектр, приводя его континуум к единице, а интенсивности к относительным интенсивностям (I/I_{cont}).

Дальше выполняется отождествление линий в спектре. Как правило, отождествляется не одна линия, а весь набор линий данного элемента в данной стадии ионизации или, по крайней мере, весь мультиплет, к которому линия принадлежит. Критериев принадлежности линии к набору несколько: длина волны, относительная интенсивность, лучевая скорость (дифференциальный сдвиг), специфическая форма профиля. Для отождествления спектральных линий использовались списки длин волн спектральных линий, составленные И.М. Копыловым (частное сообщение), или списки эмиссионных линий астрофизических объектов из книги Мейнела и др. (1969), линий атомов и ионов из книги Стриганова и Свентицкого (1966), а также из работ Ченцова и др. (1999) и Хеунга и др. (2000). Нами была создана программа в среде MIDAS и в ОС Linux, которая использует расширенные базы данных для многих химических элементов и ионов. В основном используется база данных по спектральным линиям Колуцци (1993). Использование подобных программ и баз данных делает отождествление линий в спектре более надежным, так как учитываются все линии в спектре данного атома или иона в заданном спектральном диапазоне, причем с учетом их относительных интенсивностей, а также лучевой скорости объекта. Отождествление какой либо слабой линии атома или иона на определенной лучевой скорости можно сразу же подтвердить или опровергнуть наличием или отсутствием других более сильных линий на тех же скоростях. Сейчас эта программа позволяет измерять все параметры линий и использует возможности пакета MIDAS. Мы также использовали базу данных по спектральным линиям NIST:

http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/lines_form.

Наша база данных по спектральным линиям была дополнена данными по молекулярным линиям и полосам, а также по межзвездным полосам поглощения (DIB). Информация о молекулярных спектрах взята из книги Пирса и Гейдона (1949).

Для работы с одномерными спектрами мы использовали и контекст SPEC в MIDAS, в котором предусмотрено много команд для получения самой разной информации: определение положения линий и их интенсивности, разделение блендированных линий, объединение спектров, их кросс-корреляция и т.д. При переводе положения линии в лучевую скорость (по эффекту Доплера), мы всегда учитывали поправку за движение Земли вокруг Солнца, то есть, результирующая лучевая скорость – гелиоцентрическая (приведена к центру Солнца).

2.3 Перевод эмиссионных спектров в энергетические единицы с помощью фотометрии

Наши спектральные наблюдения сопровождались фотометрией в те же даты или очень близкие. Точность фотоэлектрических наблюдений CI Cam, полученных на Крымской станции ГАИШ Н.В. Метловой составляет в среднем $0^m.02$ в полосах B, V и $0^m.03$ в полосе U. Внутренняя точность ПЗС-фотометрии для CI Cam на 1-м телескопе Цейсса САО достигает $0^m.002 - 0^m.004$, но систематические ошибки от ночи к ночи, или при переустановке прибора могут достигать $0^m.1$. Как правило это связано с неравномерностью подсветки ПЗС при получении кадров плоского поля из-за бликов и рассеяния света на внутренних деталях фотометра. Систематические ошибки, связанные с этим, можно минимизировать, подбирая близкие звезды сравнения. Однако в окрестностях CI Cam таких звезд нет. Средняя точность ПЗС-фотометрии более слабых звезд, таких как V838 Mon и V4332 Sgr после вспышек, составляла $0^m.02 - 0^m.04$. Точность измерений цифровых архивных фотографических наблюдений V838 Mon и V4332 Sgr определялась дисперсией характеристических кривых. Для первой звезды она составила в среднем $0^m.09$. Для более слабой второй звезды $0^m.10 - 0^m.40$, причем точность измерения дается для каждого цифрового кадра в таблице наблюдений. Для звезд с сильными эмиссионными линиями систематические различия фотометрии с различными приборами очень велики и достигают $0^m.5$. Специальные способы сведения разнородных наблюдений в одну систему описаны в отдельных главах диссертации. Они основаны на определении систематических поправок по одновременным или близким по времени рядам наблюдений, полученным с разными приборами.

Методика фотометрической калибровки спектров следующая:

1) Сначала в каждой фотометрической полосе определяется вклад эмиссионных линий методом интегрирования спектра по кривой реакции данной полосы системы. Кривые реакции величин U, B, V мы брали из таблицы 7 в книге Страйжиса (1977). Спектры нормализуются к звездному континууму. Вклад эмиссии равен интегралу по области с линиями, свернутому с кривой реакции. Интеграл по континууму, свернутый по той же кривой реакции, определяет вклад континуума в каждом фильтре.

2) Вклад эмиссии переводится в звездные величины.

3) Теперь эта поправка вносится в величины звезды, и получаются звездные величины в континууме уже без эмиссий.

4) Фотометрические звездные величины приводятся в физические единицы эрг/(см$^2\cdot$ с $\cdot$ Å) с помощью значений плотности потоков для звезды спектрального класса A0 V нулевой величины в V (согласно определению все показатели цвета и величины такой звезды равны нулю). Для такого перевода использовались таблицы плотности потоков для звезды класса A0 нулевой звездной величины для полос системы Джонсона $UBVRI$ из таблицы 20 в кн. Страйжиса (1977), а для полос системы Козинса $R_C I_C$, которая применяется в САО, – из работы Моро и Мунари (2000). Эта методика применялась при исследовании нескольких звезд, но конкретно наблюдения CI Cam в фильтре Козинса I_C не производились (так как звезда в этом фильтре получалась передержанной даже на коротких экспозициях, и ее измерения в этом фильтре не точны). Для получения потоков в линиях использовались фотометрические плотности потока в континууме на длинах волн линий, и эквивалентные ширины линий.

5) Когда распределение энергии в континууме известно (в физических единицах), это распределение умножается на нормированный спектр (с континуумом $= 1$). Для каждого пиксела спектра значение энергетического континуума придется проинтерполировать (так как шаг спектра и фотометрии разный). Для перевода эквивалентных ширин линий в по-

токи также приходится интерполировать энергетический континуум на длины волн конкретных линий. Поток в линии определялся как произведение эквивалентной ширины на плотность потока в континууме на средней длине волны линии. По нашей оценке точность определения потоков в линиях составила 5–20% в зависимости от интенсивности линии.

Использование фотометрических данных придает особую ценность нашим спектральным исследованиям. Благодаря фотометрической калибровке, нам удалось проследить изменение потоков в линиях CI Cam во вспышке, сравнивая потоки во время вспышки и после нее в спокойном состоянии системы. Также впервые удалось изучить особое поведение линии N[II] 5755Å в спектре CI Cam.

Совместное рассмотрение спектроскопических данных и фотометрии, современной и архивной, дало качественно новую информацию о природе пекулярных новых звезд V838 Mon и V4332 Sgr. В этих случаях оказалось возможным разделить вклад компонентов (V838 Mon) или отделить вклад холодной звезды от туманности (V4332 Sgr) в полосах фотометрической системы. Полученные распределения энергии отдельных компонентов в спектрах этих систем были использованы для сравнения с распределениями энергии, основанными на архивных фотометрических данных.

Глава 1.
СПЕКТРАЛЬНОЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ТРАНЗИЕНТНОГО ИСТОЧНИКА И B[e]-ЗВЕЗДЫ CI ЖИРАФА

CI Cam – B[e]-звезда, испытавшая мощную вспышку в широком диапазоне электромагнитных волн от радио до рентгена с максимумом 1 апреля 1998 г.

К классу B[e]-звезд относят звезды, имеющие следующие спектральные особенности (Ламерс и др., 1998):

(1) эмиссионные линии водорода и гелия на фоне голубого континуума;

(2) многочисленные эмиссии Fe II и других металлов преимущественно низко ионизованных и с низким потенциалом возбуждения;

(3) запрещенные линии металлов и других элементов: [Fe II], [O I] в оптическом спектре;

(4) сильные инфракрасные избытки – излучение горячей околозвездной пыли.

CI Cam имеет эти особенности в спектре. Эти особенности проявляются у горячих звезд, находящихся в разных стадиях эволюции, которые объединяются в один класс B[e]: Ae/B[e]-звезды Хербига в стадии до главной последовательности; симбиотические звезды; B[e]-сверхгиганты, которые по светимости достигают LBV – ярких голубых переменных звезд галактик; компактные планетарные туманности. В последнее время принято описывать эти особенности как B[e]-феномен, присущий разным классам звезд.

Звезда впервые открыта и описана в 1932–33 г. как B-звезда с эмиссиями H_α, He I и Fe II (Меррил и др.,1932; Меррил, 1933). Спектр звезды был подробно исследован и описан в работах Даунса (1984) и Мирошниченко (1995).

Результаты широкополосной фотометрии CI Cam до вспышки в оптическом и инфракрасном диапазонах представлены в работе Бергнера и др. (1995). Звезда показала значительную переменность блеска с амплитудой до $0^m.4$ в полосе V и на этом основании была включена в Общий каталог переменных звезд. В работах Мирошниченко (1994,1995) на основе наблюдений Бергнера и др.(1995) определен фотометрический период $11^d.7$, амплитуда периодической составляющей $0^m.13$ V. Распределение энергии в спектре представляется суммой спектров B0V + G8II (Мирошниченко, 1994), или B0V + K0II (Мирошниченко, 1995). В работе Мирошниченко (1995) сообщается о наблюдении абсорбционных линий холодной звезды. Однако известно, что "континуум и слабые линии в этих спектрах [Мирошниченко, 1995] были плохо экспонированы"(Хайнес и др., 2002). На основании этих данных считалось, что CI Cam напоминает симбиотические звезды, которые по своим свойствам частично перекрываются с B[e]-звездами (это подкласс B[e]-звезд, обозначаемый SymB[e]), а в ОКПЗ она классифицирована как ZAND:. Свет звезды сильно поглощен, до $A_V = 3^m$, причем значительная часть поглощения явно имеет околозвездную природу. Расстояние до звезды по старым оценкам до 1998 г. принималось 1 кпс (Чхиквадзе, 1970). Таковы основные данные о звезде, известные на момент вспышки 1998 г.

В апреле 1998 г. у звезды произошла мощная рентгеновская вспышка, в максимуме которой, состоявшемся 1 апреля 0^h57^mUT (JD 2450904.54) звезда достигла яркости 2 Краба в диапазоне 2-12 кэВ на мониторе ASM орбитальной обсерватории RXTE. Эта вспышка привлекла внимание многих исследователей. Подъем рентгеновского потока к максимуму продолжался всего несколько часов (Смит и др., 1998), что необычно для транзиентных источников. Падение потока также было быстрым: в первые двое суток поток уменьшался с параметром $\tau_e = 0^d.56$ (время ослабления в e раз). На 4-е сутки скорость ослабления уменьшилась ($\tau_e = 2^d.34$). Рентгеновский спектр был мягким по сравнению с рентгеновскими новыми и не распространялся в энергетическую область выше 60 кэВ (Беллони и др., 1999). В спектре видны эмиссии в K-линии

Fe XXV–Fe XXVI на 6.4–6.9 кэВ, S XV–S XVI на 2.45–2.62 кэВ и в L-линии Si XIII-Si XIV на 1.86-2.01 кэВ (Беллони и др., 1999).

Оптические наблюдения были сделаны с некоторой задержкой по времени относительно максимума в рентгеновском диапазоне, необходимой для отождествления. Самый яркий блеск, зарегистрированный во вспышке, составил $7^m.1$ в полосе R (Робинсон и др., 1998). Так как блеск CI Cam в спокойном состоянии составляет в среднем $10^m.6$ R, полная амплитуда вспышки превышала $3^m.5$, то есть добавочный свет источника вспышки превысил по интенсивности свет B[e]-компонента более чем в 25 раз. Максимальный блеск в лучах B и V был зарегистрирован Гарсиа и др. (1998) $10^m.2$ и $9^m.2$, из чего следует поярчание по крайней мере на $2^m.3$ и $2^m.4$, соответственно, относительно уровня до вспышки (Бергнер и др., 1995; Мирошниченко, 1995). Интересно, что при таком поярчании показатели цвета не изменились. Барсукова и др. (1998), Кларк и др. (1999) отмечали значительное усиление всех эмиссионных линий в спектре вспышки. В спектре CI Cam 3 апреля 1998 г. Вагнер и Старрфилд (1998) заметили сильную линию HeII λ4686Å, хотя спектр в остальном был очень похож на спектр 1984 г. Даунса (1984), и на спектр Меррила (1933). Линия HeII вообще не была описана ни в одном предыдущем исследовании, сделанном до вспышки.

Радиоисточник был зарегистрирован уже 1 апреля, а 3 апреля в 20^h UT он достиг максимума 120 мЯн на 1.4 ГГц с задержкой по времени в 2.8 дня относительно рентгеновского максимума. В максимуме интенсивности его угловой размер был меньше $0''.1$ на частоте 22.5 ГГц. Зависимости радиопотока, а также потока рентгеновского, оптического и инфракрасного излучения от времени опубликованы в работе Кларка и др. (2000). Заметно запаздывание максимума вспышки с увеличением длины волны излучения в радиодиапазоне. Скорость падения блеска в оптическом диапазоне с 3 по 10 апреля 1998 г. составляла $\tau_e = 3^d.4 \pm 0^d.4$.

Радиоисточник имел синхротронный спектр. 5 апреля он разрешился на центральное ядро и противоположно направленные струи, которые со временем приняли S-образную форму, подобно струям, наблюдающимся в радиодиапазоне у объекта SS 433 (радиокарта опубликована в заметке Хьелминга и Медушевски, 1998a). Скорость распространения струй составила 26 угловых миллисекунд в день, или, при расстоянии в 1 кпс, $0.15c$ (Хьелминг и Медушевски, 1998b). Как галактическая звездная система со струями, CI Cam вошла в класс объектов, называемых "микроквазарами".

Однако позднее, в 2002 г., эти первые наблюдения на VLA были пересмотрены, так как они не согласовались с картиной вспышки, полученной с радиотелескопом VLBA. Калибровка радионаблюдений VLA признана ошибочной на том основании, что калибровочный источник – квазар – сам оказался источником радиоструй, поэтому его радиоструи были внесены при обработке в радиоизображения CI Cam (Рупен и др., 2002a). В работе Медушевски и Рупена (2004) описана эволюция радиоостатка вспышки по наблюдениям на VLBA. Это была расширяющаяся с замедлением биполярная облачная структура, имеющая форму оболочки с поярчанием к краю. Структура напоминает ударную волну, проходящую по плотной межзвездной среде.

Рентгеновский поток упал до уровня обнаружения через $10 - 15^d$ после вспышки. В оптическом диапазоне повышенный блеск наблюдался до конца сезона наблюдений JD 2450941 (37^d), но в начале следующего сезона в JD 2451051 блеск уже был обычным и даже несколько возрастал. При этом радиоизлучение все еще измерялось весь следующий сезон JD 2451020–51300, хотя и ослабевало (Кларк и др., 2000).

В рентгеновских лучах в спокойном состоянии объект был обнаружен на спутнике BeppoSAX при длительных экспозициях в JD 2451425 (Орландини и др., 2000), и в JD 2451445 (Пармар и др., 2000), или совсем не регистрировался. Из этих наблюдений следовало, что в рентгеновском диапазоне объект переменен по крайней мере на порядок. Спектральные оптические исследования CI Cam в декабре 1998 и в январе 1999 г. (Орландини и др., 2000) показали отсутствие каких-либо изменений в спектре в этот период времени и сходство со спектром, полученным до вспышки (Даунс, 1984).

1. Спектральные наблюдения вспышки CI Cam

Наши наблюдения были проведены на 6-м телескопе БТА САО РАН 4,5,6,19 апреля и 16 мая 1998 г. Информацию о наблюдателях, спектральном диапазоне, количестве спектрограмм и спектральном разрешении можно увидеть в табл.2. Первое наблюдение получено через 3.7 дня после пика рентгеновской вспышки и через 1.6 дня после наблюдений Вагнера и Старрфилда (1998) и Гарсиа и др. (1998), то есть в дату, когда рентгеновский поток уменьшился вдвое. Получение такого материала на БТА стало возможным благодаря своевременному сообщению о вспышке CI Cam, переданному нам П. Рошем (P. Roche), а также благодаря сотрудникам САО С.А. Пустильнику и А.В. Угрюмову, которые провели наблюдения CI Cam на БТА 4, 5, 6 и 19 апреля 1998 г.

Был использован спектрограф среднего разрешения SP-124 в фокусе Нэсмит-1 с камерой UAGS и ПЗС Photometrix PM1024. Дисперсия 2.4 Å/pxl, спектральное разрешение FWHM ≈4–7Å. Спектры обработаны в пакете MIDAS (в контексте для длинной щели LONG). Методика обработки наших спектральных данных описана в конце введения диссертации в пункте: "Методика обработки наблюдательных данных" (см. Содержание диссертации). Наши спектральные наблюдения во вспышке описаны в работах Барсуковой и др. (1998) и Барсуковой и Фабрики (2000).

С 1998 г. спектральные наблюдения сопровождаются фотометрией в полосах системы $UBVR$, и это позволяет более точно определять потоки в эмиссионных линиях, а также сравнивать потоки во вспышке с потоками до и после вспышки. Фотометрические $UBVR$-наблюдения во время вспышки опубликованы в работах Кларка и др. (2000) (это наблюдения В.М. Лютого, Н.В. Метловой и В.П. Горанского на Крымской станции ГАИШ МГУ); Орландини и др. (2000); Гарсиа и др. (1998) и Хайнеса и др. (1998).

Фрагменты нормализованных спектров 4,5,6,19 апреля и 16 мая 1998 г.

показаны на рис. 1 а-г. Все спектры приведены в одной шкале. Видно, что степень возбуждения в спектрах спадает со временем. Эмиссионная линия He II λ4686Å на рис. 1 а сильна в начале апреля и практически исчезла в спектре 16 мая. То же относится и к другой линии He II λ5411Å (рис. 1 в). Потоки в линиях He I уменьшались быстрее, чем в водородных линиях.

Обнаружена сильная переменность бленды λ5050Å (рис. 1 б). Похоже, она исчезла в спектрах 19 апреля и 16 мая. Она состоит из линий Si II λ5041,5056 + He I λ5048 + C IIλ5045Å, и по нашей оценке, основанной на исследовании этой бленды, вклад линий Si II составляет 80% от общего потока, а He I – 20%. Так что быстрое падение потока – это свойство линии Si II. На рис. 1 а и 1 в показан очень яркий и богатый эмиссионный спектр Fe II. Интенсивности всех линий Fe II уменьшались со временем, но скорость падения зависела от номера мультиплета и от потенциала возбуждения. Например, линия Fe II λ5169Å была самой сильной линией железа в этом спектральном диапазоне сразу после вспышки, но стала слабее линии Fe II λ5317Å в конце нашего наблюдательного ряда. Другой пример на рис. 1 г показывает, что линия [N II] λ5755Å даже становится сильнее со временем. Эта линия была неправильно отождествлена в работах Даунса (1984) и Орландини и др. (2000) как Fe II. Ошибочным отождествлением объясняется отличие длины волны этой линии от лабораторной на 8Å, замеченное в Орландини и др. (2000). Особое поведение этой линии было выявлено в первой нашей работе (Барсукова и др., 1998). В следующих работах поведение этой запрещенной линии было подробно исследовано, оно будет описано позднее.

Ширины профилей линий также показали зависимость от потенциала возбуждения. Водородные эмиссии и эмиссии He I во вспышке имели широкие и узкие компоненты. Это особенно хорошо видно в сильных и неблендированных линиях H_β и He I λ5876Å (рис. 1 г). Ширина узкого компонента была $\approx$400 км/с в начале наблюдений (все ширины исправлены за инструментальную ширину линии). Затем она уменьшается до 200 км/с. Интенсивность широких компонентов быстро падает, но их

Таблица 2. Спектральные наблюдения CI Cam

JD hel. 24...	Дата	Диапазон (Å)	Разрешение (Å)	Число Спектров	Теле-скоп	Наблюдатели
50908.259	1998.04.04	3800-6100	4	2	6-м	П,У
50908.260	1998.04.04	5000-7400	4	1	6-м	П,У
50909.176	1998.04.05	5000-7400	4	1	6-м	П,У
50909.20	1998.04.05	3800-6100	4	1	6-м	П,У
50910.20	1998.04.06	3800-6100	4	2	6-м	П,У
50910.205	1998.04.06	5000-7400	4	3	6-м	П,У
50923.25	1998.04.19	3800-6100	7	29	6-м	П,У,М
50923.266	1998.04.19	5000-7400	7	2	6-м	П,У,М
50950.30	1998.05.16	3800-6100	4	2	6-м	В1,Ф
50950.314	1998.05.16	5000-7400	4	2	6-м	В1,Ф
51204.333	1999.01.25	3800-6100	4	100	6-м	Б1,В1,М,Ф
51206.30	1999.01.27	5000-7700	0.23	3	6-м	Б1,М
51398.534	1999.01.08	5580-7320	4	2	1-м	Б2
51399.538	1999.08.09	4100-5800	4	2	1-м	Б2
51399.525	1999.08.09	5580-7290	4	2	1-м	Б2
51400.510	1999.08.10	4100-5800	4	4	1-м	Б2
51400.531	1999.08.10	5600-7300	4	4	1-м	Б2
51423.551	1999.09.02	5590-7330	4	4	1-м	Б2
51423.566	1999.09.02	4100-5780	4	3	1-м	Б2
51424.551	1999.09.03	4100-5780	4	4	1-м	Б1,Б2
51425.581	1999.09.04	5600-7300	4	13	1-м	Б1,Б2
51426.519	1999.09.05	4100-5780	4	3	1-м	Б1,Б2
51426.561	1999.09.05	5600-7300	4	5	1-м	Б1,Б2
51464.523	1999.10.13	5600-7320	4	6	1-м	Б3
51464.542	1999.10.13	4100-5780	4	4	1-м	Б3
51465.434	1999.10.14	4100-5780	4	4	1-м	Б3
51465.458	1999.10.14	5600-7320	4	6	1-м	Б3
51485.653	1999.11.03	4100-5700	4	3	1-м	Б2
51485.666	1999.11.03	5670-7340	4	4	1-м	Б2
51488.416	1999.11.06	5670-7320	4	6	1-м	Б2
51488.447	1999.11.06	4100-5780	4	6	1-м	Б2
51514.288	1999.12.01	4100-5780	4	10	1-м	Б2,Б3
51635.187	2000.03.31	5660-7330	4	10	1-м	Б2
51810.552	2000.09.23	5600-7280	4	5	1-м	В2
51812.555	2000.09.25	5600-7230	4	10	1-м	С
51844.500	2000.10.27	4100-5800	4	11	1-м	Б2
51846.430	2000.10.29	5600-7240	4	5	1-м	В2
51848.416	2000.10.31	5600-7300	4	6	1-м	Б2
51864.375	2000.11.16	5660-7320	4	9	1-м	Б2
51864.448	2000.11.16	4100-5780	4	10	1-м	Б2
51880.312	2000.12.01	5660-7330	4	17	1-м	Б2
51885.319	2000.12.06	4500-7000	5	164*)	6-м	В1,М,Ф
51936.243	2001.01.26	5660-7320	4	10	1-м	Б2
51937.234	2001.01.27	5660-7320	4	4	1-м	В2

Таблица 2. Продолжение

JD hel. 24...	Дата	Диапазон (Å)	Разрешение (Å)	Число Спектров	Теле-скоп	Наблюдатели
52176.467	2001.09.23	4070-5783	8.7	5	1-м	Б3
52176.479	2001.09.23	5626-7330	9.5	7	1-м	Б3
52177.402	2001.09.24	4105-5792	9.5	2	1-м	Б3
52177.500	2001.09.24	5612-7302	6.7	14	1-м	Б3
52189.485	2001.10.06	5610-7317	7.3	8	1-м	Б2
52192.586	2001.10.09	4095-5788	7.0	4	1-м	Б2
52293.428	2002.01.18	4095-5788	7.0	4	1-м	Б2
52299.220	2002.01.24	5655-7359	8.8	17	1-м	Б2
52299.268	2002.01.24	4102-5798	9.5	8	1-м	Б2
52300.409	2002.01.25	3539-4997	0.20	1	6-м	К
52310.470	2002.02.04	4604-6071	0.20	1	6-м	К
52327.251	2002.02.21	4081-5779	8.8	6	1-м	Б2
52327.284	2002.02.21	5626-7332	8.8	10	1-м	Б2
52531.573	2002.09.13	4162-5860	7.0	2	1-м	Б3
52532.520	2002.09.14	4104-5797	9.5	2	1-м	Б3
52532.547	2002.09.14	5622-7328	9.5	6	1-м	Б3
52542.517	2002.09.24	5642-7346	10.1	11	1-м	Б3
52542.554	2002.09.24	4085-5779	10.1	4	1-м	Б3
52598.19	2002.11.19	4558-5996	0.13	1	6-м	К
52683.344	2003.02.12	4090-5784	9.4	6	1-м	Б2
52906.476	2003.09.23	3470-6205	3.7	1	1-м	Б2
52906.492	2003.09.23	3470-6205	3.7	1	1-м	Б2
52906.508	2003.09.23	3470-6205	3.7	1	1-м	Б2
52965.435	2003.11.21	4121-5818	7.5	6	1-м	Б2
53019.304	2004.01.14	3710-7970	7.0	2	1-м	Б3
53023.278	2004.01.18	3710-7997	7.0	3	1-м	Б2
53054.19	2004.02.18	3769-5007	4.3	3	6-м	Б1,Б3,Г
53082.346	2004.03.17	3710-8017	7.7	1	1-м	Б2
53300.435	2004.10.21	3630-7955	7.7	4	1-м	Б3
53301.451	2004.10.22	3850-5922	4.0	2	1-м	Б3
53301.492	2004.10.22	3820-7910	7.7	1	1-м	Б3
53328.330	2004.11.18	3970-5738	5.3	1	6-м	Б1,Б2,Г
53357.286	2004.12.17	3800-8090	7.1	7	1-м	Б3
53358.336	2004.12.18	3800-8090	7.1	10	1-м	Б3
53359.354	2004.12.19	3800-8090	7.1	5	1-м	Б3
53360.365	2004.12.20	3800-8090	7.1	2	1-м	Б3
53389.253	2005.01.18	3800-7940	6.2	6	1-м	Б3
53390.279	2005.01.19	3800-7940	6.1	5	1-м	Б3
53417.296	2005.02.15	3800-7910	6.1	2	1-м	Б3
53419.239	2005.02.17	3800-7910	6.2	3	1-м	Б3
53451.245	2005.03.21	3880-6207	6.1	2	1-м	Б3
53593.513	2005.08.11	4600-4750	8.0	23	50-см	Г **)

*) апертурные спектры сквозь циррусы;

**) бесщелевые спектры с объективной призмой.

Телескопы:
6-м – 6-метровый телескоп;
1-м – 1-м рефлектор САО РАН;
50-см – 50-см менисковый телескоп с 7-градусной объективной призмой Крымской станции ГАИШ МГУ.

Наблюдатели:

Б1 – Барсукова Е.А.	В2 – Власюк В.В.	П – Пустильник С.А.
Б2 – Борисов Н.В.	Г – Горанский В.П.	С – Серафимович Н.
Б3 – Буренков А.Н.	К – Клочкова В.Г.	У – Угрюмов А.В.
В1 – Валявин Г.Г.	М – Монин Д.Н.	Ф – Фабрика С.Н.

ширина постепенно уменьшается от 1200 км/с до 700 – 800 км/с. Линии Fe II, Ti II и других линий показывают только узкие компоненты.

Во вспышке нами не обнаружены абсорбционные линии Ca I, Co I, Ni I, Cr II и другие, описанные в работе Мирошниченко (1995). Отметим, что спектры Мирошниченко были получены на TV-сканере БТА, их качество невысокое. Как и в спокойном состоянии, в спектре вспышки CI Cam видны только диффузные межзвездные полосы поглощения (DIB) или абсорбционные линии межзвездной среды (Na II D_2D_1).

Сравнивая спектры на спаде вспышки со спокойным спектром до вспышки Даунса (1984), мы обнаружили, что в конце вспышки интенсивность линии H_β опустилась до уровня спокойного состояния, наблюдавшегося в работе Даунса (рис. 2), а интенсивность линии He I $\lambda5876$Å (на том же рисунке) уменьшилась даже значительно ниже спокойного уровня. В работе Хайнеса и др. (2002), выполненной с нашим участием, в которой все спектральные наблюдения CI Cam в мире до вспышки, во вспышке и в первый год после вспышки были объединены и анализировались вместе, открытое нами (Барсукова и др., 1998) необычное поведение эмиссий HeI подтвердилось.

Наибольшее падение потока между 4 и 19 апреля 1998 г. наблюдалось у широкого компонента линии H_β (в 12.5 раза), у бленды Si II (в 14.9 раза), у линии He II $\lambda4686$Å(в 14.1 раза), у He I $\lambda4471$Å (в 7.4 раза) и у He I $\lambda5876$Å (в 5.1 раза). Узкий компонент H_β и эмиссия Fe II $\lambda5876$Å

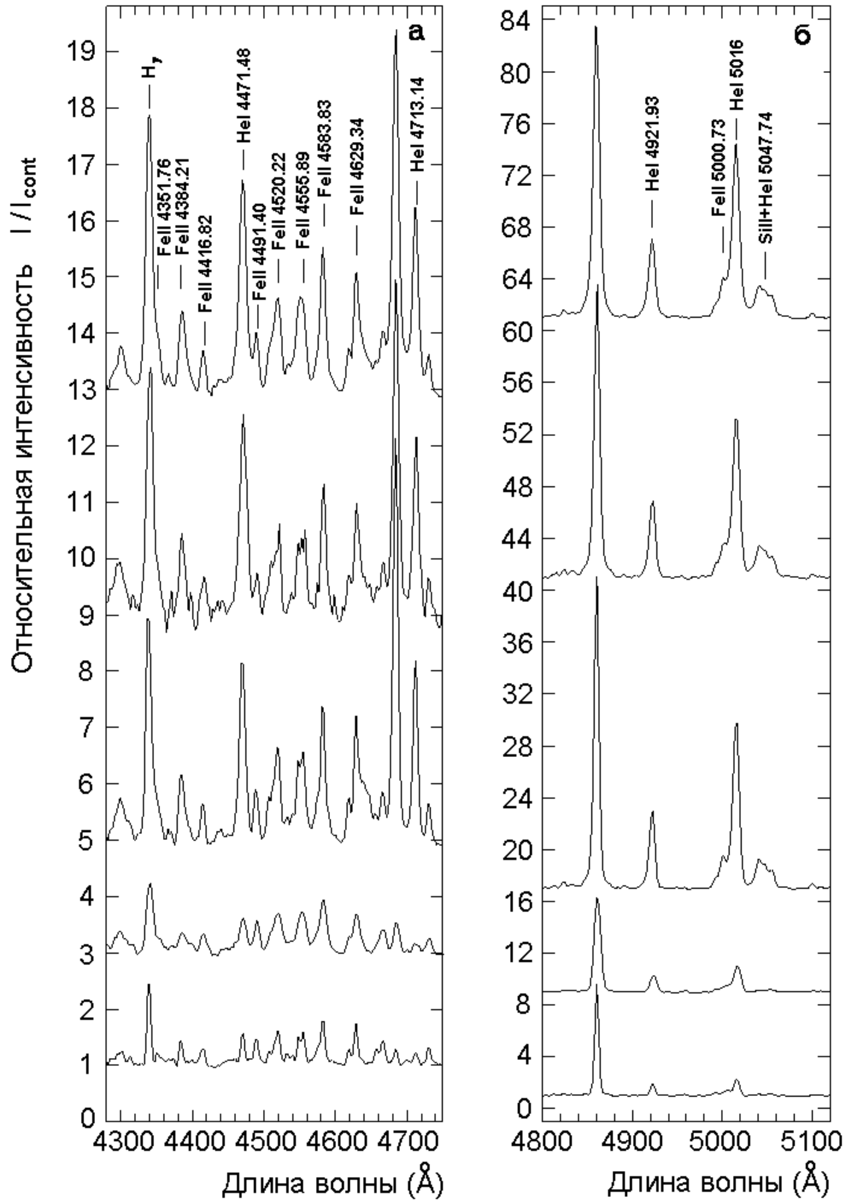

Рис. 1 а,б,в,г.

Фрагменты нормализованных спектров, полученных 4,5,6,19 апреля и 16 мая 1998 г. (сверху вниз). Сильнейшие линии - He II λ4686Å, H_β, Fe II λ5169Å, Fe II λ5317Å и He I λ5876Å – не отмечены. Для удобства отображения спектры сдвинуты вдоль оси интенсивностей на величины в 12, 8, 4, 2 и 0 единиц на рис. 1 а и б, на 60, 40, 16, 8 и 0 единиц на рис. 1 в и г.

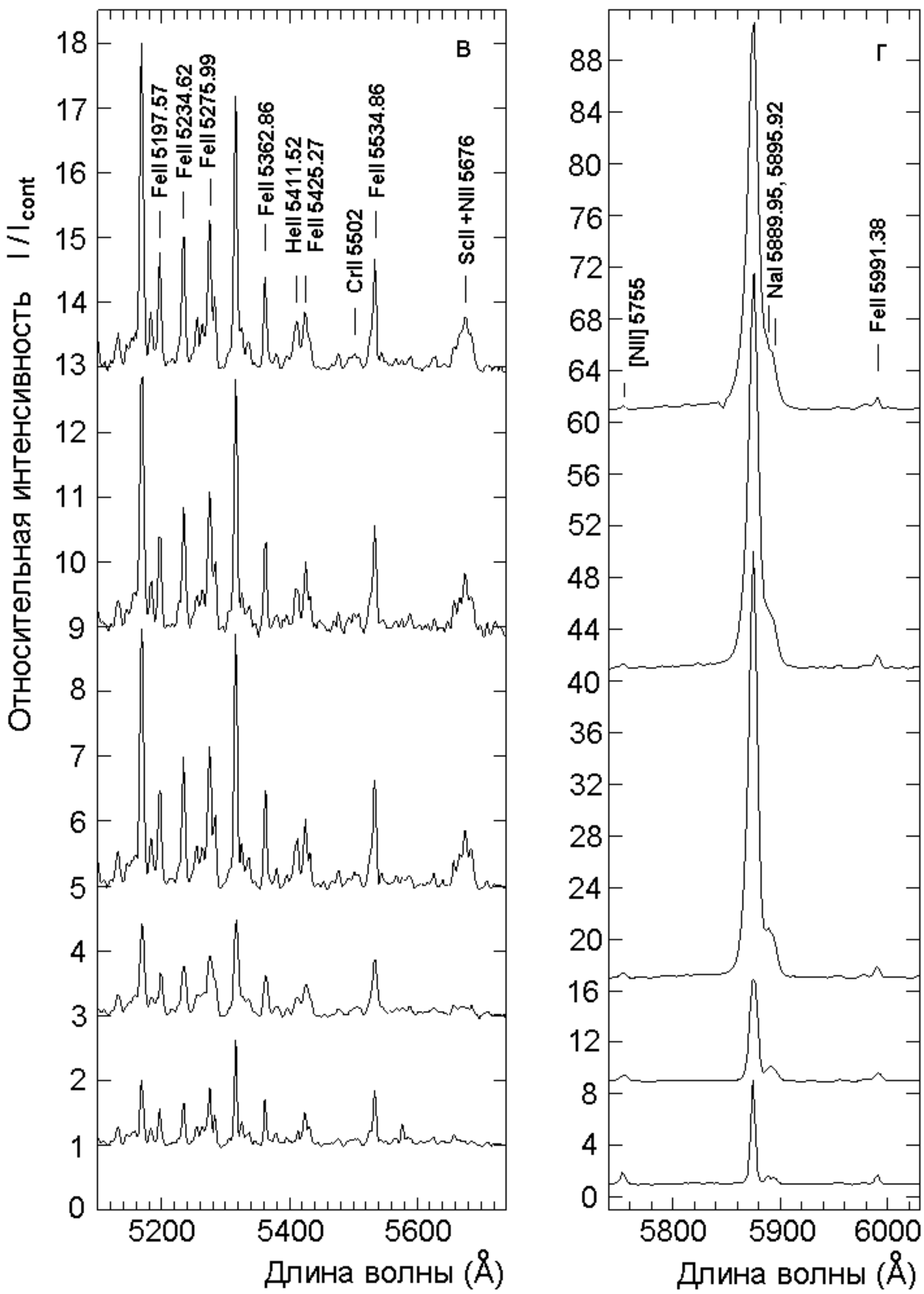

Рис. 1 а,б,в,г (продолжение).

показали умеренный спад в 2.4 и 3.0 раза, соответственно. Графики изменения эквивалентных ширин нескольких линий и бленд во вспышке показаны на рис. 2–5. Подробное описание бленд и отождествление их компонентов дается в статье Барсуковой и др. (1998). Точность определения эквивалентных ширин линий составляет 5–10%.

Предполагается, что рентгеновская вспышка с одной стороны образовала область, в которой формируются широкие линии (выброс), а с

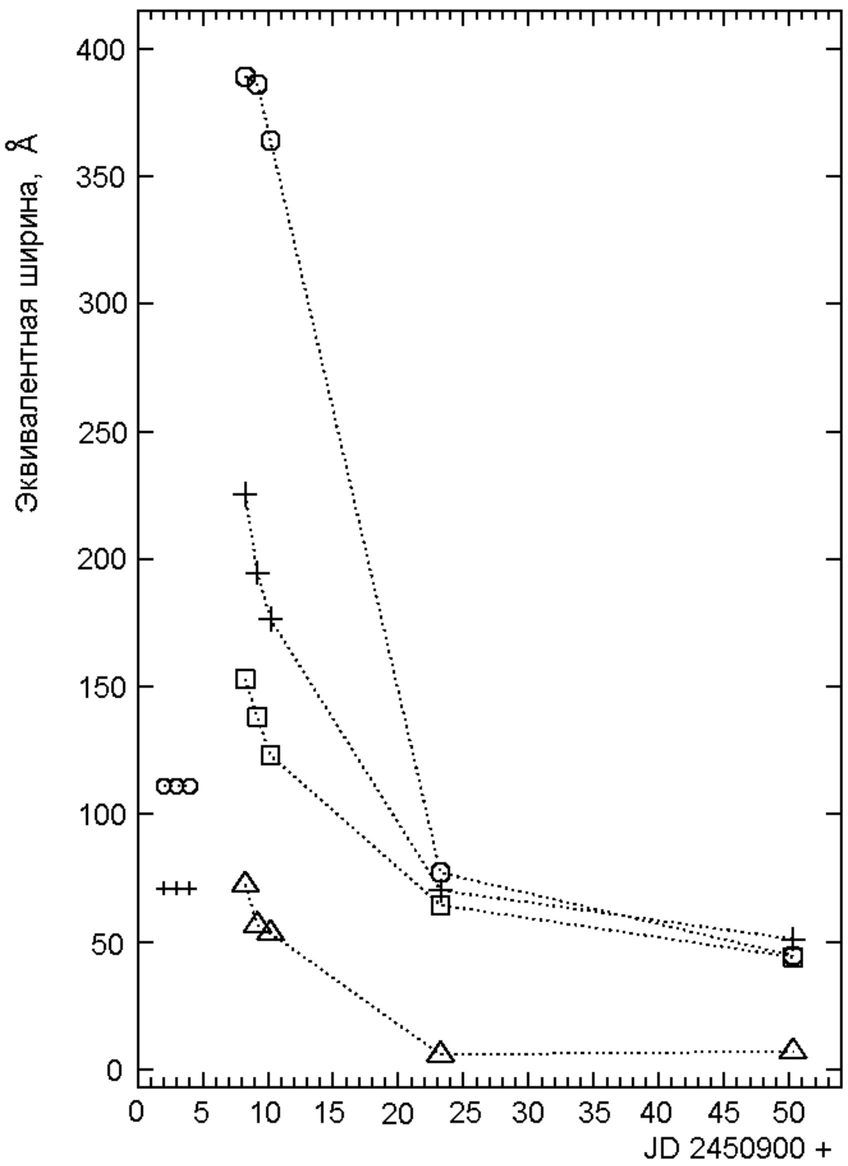

Рис. 2.

Изменения эквивалентной ширины сильнейших эмиссионных линий во вспышке. He I $\lambda 5876$Å (полный профиль) – кружки; H_β(полный профиль) –крестики; H_β(узкий компонент) – квадраты; H_β(широкий компонент) – треугольники. Мелкие символы слева означают эквивалентные ширины в спокойном состоянии в январе 1984 г. (Даунс, 1984). Момент рентгеновского максимума, как следует из наблюдений RXTE, соответствует JD 2450904.5.

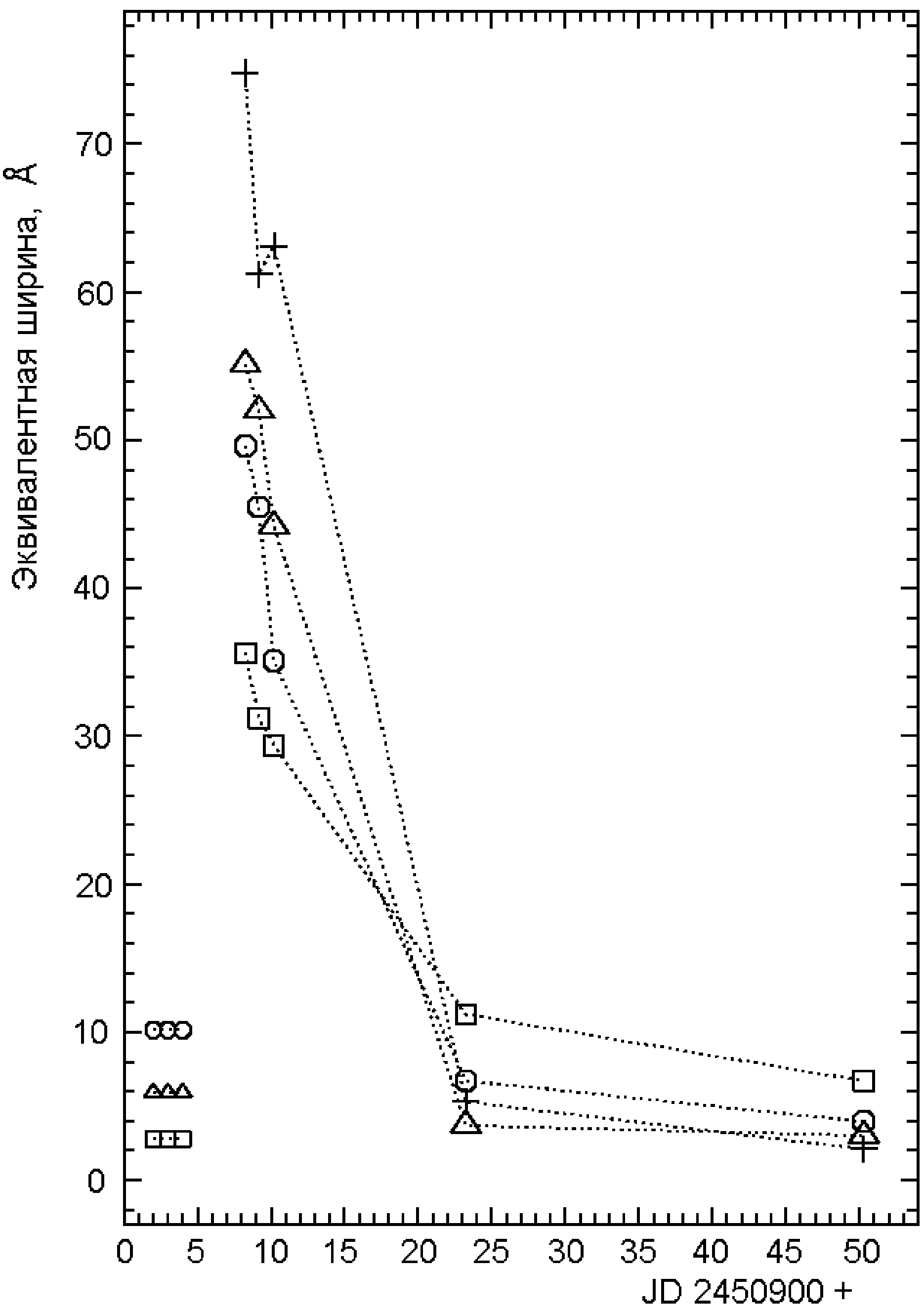

Рис. 3.

Изменения эквивалентной ширины сильнейших эмиссионных линий во вспышке. He II $\lambda 4686$Å – крестики; бленда $\lambda 5050$Å – треугольники; He I $\lambda 4471$Å – кружки; Fe II $\lambda 5169$Å – квадраты. Остальные обозначения как на рис. 2.

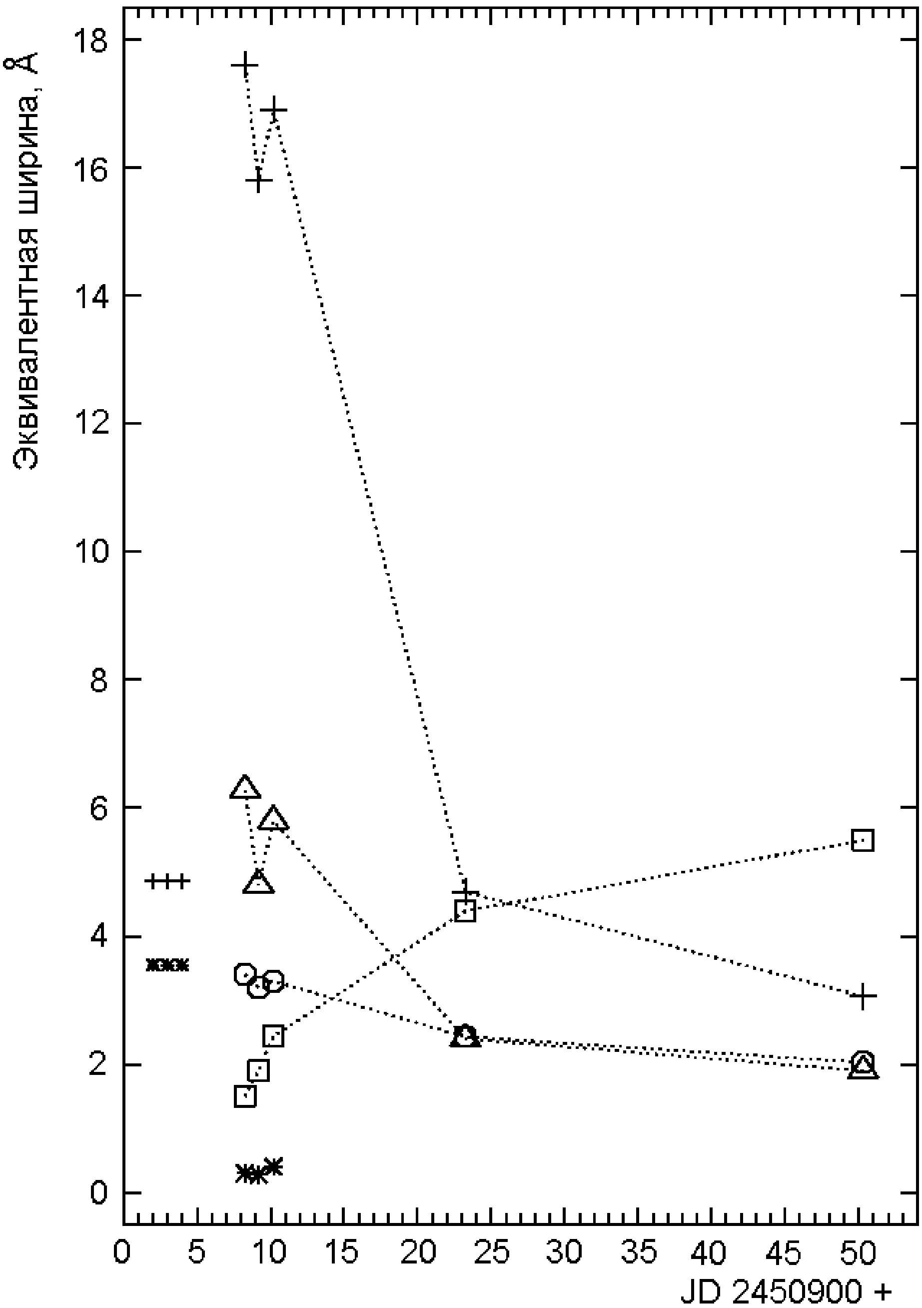

Рис. 4.

Изменения эквивалентной ширины сильнейших эмиссионных линий во вспышке. Бленда λ5670Å – крестики; Fe II λ5197Å – треугольники, бленда λ5509Å – кружки; [N II] λ5755Å – квадраты и слабая бленда Fe II λ5748Å + N II λ5747Å – звездочки. Остальные обозначения как на рис. 2.

другой – значительно подогрела уже существующую область, где формируются узкие линии (звездный ветер B[e]-звезды). Расширение эмиссионных линий H I и He I (пьедесталы) связано именно с движением излучающего газа, но не с электронным рассеянием в оптически толстой оболочке. Это можно объяснить тем фактом, что после вспышки ширина пьедесталов лишь постепенно уменьшалась при быстром падении интенсивности. А в случае уширения линий электронным рассеянием ширина линий и их интенсивность сильно зависит от оптической толщины газа. В этом случае профиль линии должен был быстро вернуться к прежнему виду, так как при расширении выброса газ становится оптически тонким.

В работах (Барсуковой и др., 2002а,в) рассмотрены спектральные данные за три года наблюдений после вспышки. Мы сравнили поведение CI Cam во вспышке с глубоким спокойным состоянием в последующие после вспышки три года.

Сравнивая спокойный спектр CI Cam со спектром во вспышке (Барсукова и др., 2002а), можно заметить, что набор эмиссионных линий практически не изменился. Они лишь изменили относительную яркость. Наиболее заметные спектральные изменения во вспышке уже описаны ранее. Во вспышке появилась также сильная эмиссия в дублете Na I D_1 и D_2, которая слилась с широкой линией He I λ 5876Å и выглядела как горб на ее профиле. По мере ослабления блеска и уменьшения ширины линии He I эмиссия натрия отделилась от линии гелия, а затем исчезла. В спектрах с высоким разрешением (Робинсон и др., 2002) дублет Na I D_1 и D_2 имеет сложный профиль, состоящий из эмиссионных и абсорбционных компонентов, причем последние явно имеют межзвездное или околозвездное происхождение. Наоборот, запрещенная линия [N II] λ 5755Å, почти невидимая во вспышке, появилась и стала видна как одна из сильнейших после вспышки. Вклад эмиссий в широкие полосы B и V (системы UBV) составляет ≈10% в спокойном состоянии и ≈40% во вспышке, а в полосе R_J, в которую попадает очень сильная эмиссия H_α, – 38 и 58%, соответственно.

Для 24 сильных эмиссионных линий H, He, Fe, Si, N (см. табл. 3, стр.51) были измерены эквивалентные ширины во вспышке и в спокойном состоянии, которые затем с помощью фотометрических данных были переведены в потоки в величинах (эрг/см^2·с). Выбирались в основном сильные линии, не составляющие бленды. В некоторых случаях, когда линия оказалась составной и не разделялась, определены суммарные эквивалентные ширины компонентов. К тому же были определены отношения эквивалентных ширин EW_o/EW_q и логарифмы отношения потоков $lg(F_o/F_q)$ линий во вспышке (o) и в спокойном состоянии (q). Так как наблюдения в самом пике вспышки не проводились, средние величины в первые две ночи наблюдений 4 и 5 апреля 1998 г. были приняты как характеризующие вспышку. Величины в спокойном состоянии определялись как средние за следующий сезон наблюдений 1999 г. Результаты измерений – отношения эквивалентных ширин, логарифмы отношения потоков вместе с логарифмами суммарного потенциала возбуждения (потенциал ионизации + потенциал возбуждения) каждой линии из книги Стриганова и Свентицкого (1966) сведены в табл. 3. Зависимость логарифма отношения потоков от логарифма полного потенциала возбуждения линии показана на рис. 5. Видна четкая зависимость амплитуды вспышки в линии от потенциала возбуждения, на которую не ложится только запрещенная линия [N II] λ5755Å. Рекордное поярчание, видимое на этом графике, относится к линии HeII λ4686Å, которая имеет наивысший потенциал возбуждения. Эту зависимость можно объяснить, тем, что оболочка CI Cam стратифицирована, и что источник ионизации во вспышке стал существенно более жестким, чем в спокойном состоянии. Температура источника вспышки была не менее 600000^{o}K (при условии, что спектр вспышки тепловой), что требуется для вторичной ионизации гелия. По аналогии с планетарными туманностями можно предположить, что степень ионизации газа в оболочке меняется с расстоянием от возбуждающего источника. Поэтому оболочка состоит из нескольких зон ионизации, причем высшая степень ионизации достигается ближе к ионизующему источнику. Мы предполагаем, что оболочка CI Cam отличается от оболочек планетар-

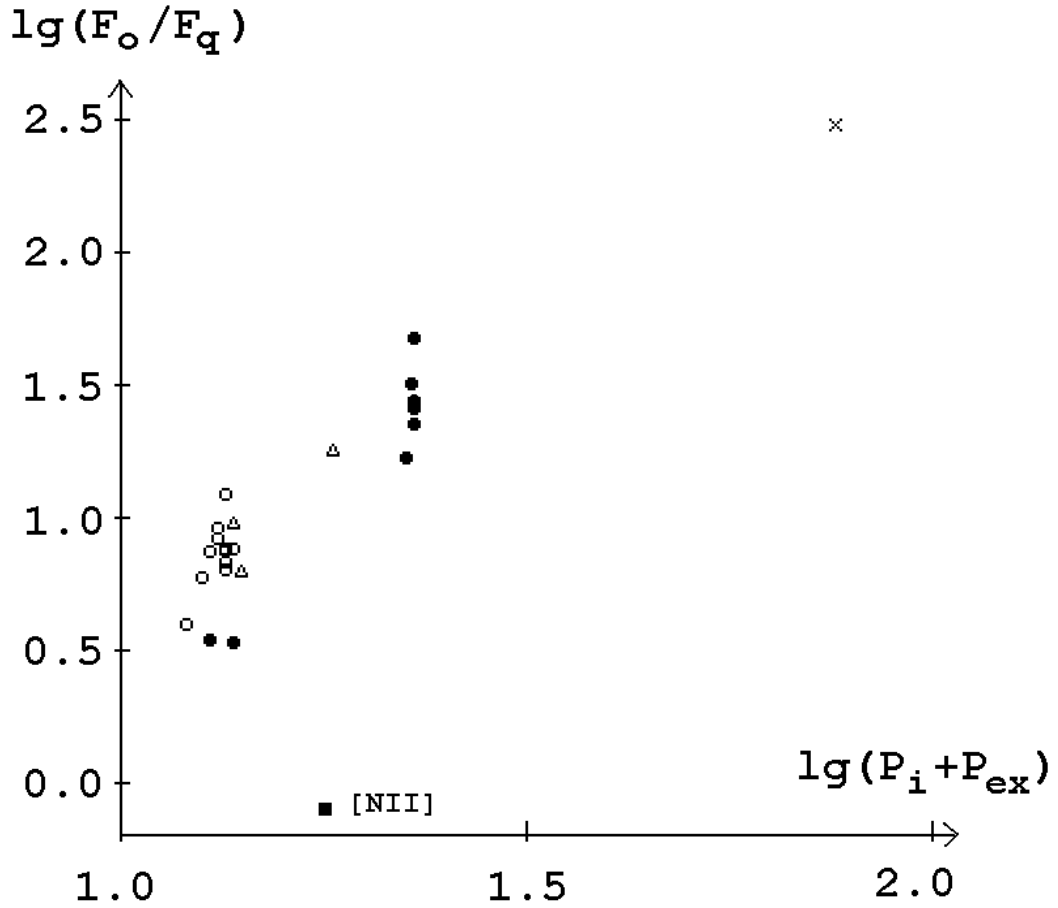

Рис. 5.

Зависимость между отношением потоков во вспышке (F_o) и в спокойном состоянии (F_q) в эмиссионных линиях и полным потенциалом возбуждения линии (сумма потенциалов ионизации P_i и потенциала возбуждения P_{ex}) в шкале логарифмов. Крестиком нанесена линия He II $\lambda 4686$Å, темными кружками – линии He I и Fe II того же типа поведения, светлыми кружками – бальмеровские линии и линии Fe II с поведением типа H_α, треугольниками – линии с поведением типа Si II, а темным квадратом – линия [N II] $\lambda 5755$Å.

ных туманностей большей концентрацией вещества к центру туманности, где расположен источник ионизации. Поэтому амплитуда вспышек потоков в линиях зависит от потенциала возбуждения (ионизация + возбуждение).

2. Спектральная эволюция CI Cam после вспышки

Фотометрическое и спектроскопическое слежение за CI Cam в спокойном состоянии в 1998–2001 гг. было нами продолжено до 2005 г., и в диссертации приводятся результаты семилетних наблюдений. Результаты этих наблюдений подробно излагаются в статье Барсуковой и др. (2006а).

Спектроскопические наблюдения CI Cam, которые начались на БТА во время вспышки в ночь с 4 на 5 апреля 1998 г. со спектрографом СП-124, продолжались в основном на телескопе Цейсс-1000 САО со спектрографом UAGS с длинной щелью. Результаты наблюдений до 27 января 2001 г. были показаны в работе Барсуковой и др. (2002а), новые наблюдения публикуются в работе Барсуковой и др. (2006а). Список всех спектров дается в табл. 2 на стр.32.

Новые спектры среднего разрешения (4–10Å) получены в 2001–2005 годах на Цейссе-1000 различными наблюдателями САО по долгосрочной программе, инициированной автором диссертации. Два спектра с разрешением 4–5Å получены автором на БТА со спектрографами UAGS и SCORPIO специально для достижения достаточно высокого отношения сигнал/шум в синей области спектра. Мы осуществили попытку бесщелевых спектральных наблюдений CI Cam на менисковом телескопе АЗТ-5 Крымской станции ГАИШ с 7-градусной объективной призмой. Наблюдения и обработка были удачными и использованы в диссертации. Спектральное разрешение в районе линии H_β составило 8Å. Привязка спектра к длинам волн была сделана также в пакете MIDAS к "ветровым" линиям Fe II B[e]-звезды. Эти линии, согласно спектроскопии высокого разрешения, имеют узкие прямоугольные профили шириной 1.3Å и не показывают заметных изменений лучевой скорости. Природа этих линий обсуждается далее.

В нашем распоряжении есть также несколько спектров CI Cam высокого разрешения, полученных на телескопе БТА. Спектры получены с эшелле-спектрографом NES (Панчук и др., 2002) в фокусе Нэсмита с ПЗС-матрицей EEV 42-40 2048 x 2048 элементов. В комбинации с резателем изображений (Панчук и др., 2003) спектрограф NES обеспечивает спектральное разрешение $R \geq 60000$. Всего получено три таких спектра, два из которых уже анализировались в работе Мирошниченко и др. (2002). Экстракция данных из двумерных эшелле-спектров выполнена с помощью модифицированного контекста ECHELLE пакета программ MIDAS (Юшкин и Клочкова, 2004) автором данной программы М.В. Юшкиным. Модификация позволяет, в частности, выполнять экстракцию данных из эшелле-спектра, полученного с резателем изображений. Точность измерения скорости по одной линии в спектрах, полученных со спектрографом NES, 1 км/с. Всего в спокойном состоянии CI Cam получено 86 спектров в голубом и красном диапазонах. Особая ценность наших спектральных данных состоит в том, что они сопровождались фотометрическим слежением, и потому могут быть надежно прокалиброваны.

Электрофотометрия CI Cam проводилась Н.В. Метловой на Крымской станции ГАИШ на 60-см телескопе Цейсса с одноканальным UBV-фотометром конструкции В.М.Лютого. Этот плотный по времени и очень однородный ряд наблюдений был использован нами для определения систематических поправок в неоднородных ПЗС-наблюдениях, полученных в системе UBV.

ПЗС-наблюдения CI Cam проводились в полосах системы $UBVR_J$ на Крымской станции ГАИШ на телескопе Цейсс-600 с матрицами SBIG ST-7, Apogee-47p и VersArray (Princeton Instruments), а также на менисковом телескопе АЗТ-5 с матрицей Meade Pictor-416, установленной в прямом фокусе. Матрица VersArray оснащена также и фильтром R_C. Измерения с VersArray проводились с двумя красными фильтрами, дающими кривые реакции, близкие к кривым реакции полос Джонсона и Козинса. В САО ПЗС-наблюдения проводились в полосах системы $UBVR_C$ на телескопе Цейсс-1000 с фотометром, оснащенным ПЗС-матрицами К585 (НПО "Электрон") и EEV 42-40. Обработка наблюдений осуществлялась В.П. Горанским с помощью разработанной им программы WinFITS, осуществлена методика скорректированной апертурной фотометрии. Смена приемников и наборов фильтров, конечно, не способствовала однородности наших ПЗС- наблюдений, проблема осложнялась еще и эмиссионным спектром изучаемой звезды. В полосах UBV проблему сведения всех данных в одну систему удалось решить относительно легко благодаря однородным крымским данным, определяя систематические отличия отдельных фрагментов кривых блеска. ПЗС-наблюдения хорошо согласуются с фотоэлектрической фотометрией. Привести все данные в красных фильтрах, включая R_C, в одну систему R_J оказалось сложнее, и окончательная кривая блеска, возможно, содержит некоторые систематические неточности, которые не удалось скомпенсировать по одновременным наблюдениям. Результаты фотометрии опубликованы в работах Барсуковой и др. (2002a, 2006a).

На рис. 6 показаны кривые блеска CI Cam в полосах системы $UBVR_J$. Черными кружками показаны фотоэлектрические наблюдения Н.В. Метловой, светлыми кружками – наши ПЗС-наблюдения. На кривых блеска видно медленное, возможно циклическое, синхронное во всех фильтрах изменение блеска с широкими максимумами и узким минимумом около JD 2452000. В начале 2005 г. около JD 2453400 блеск резко начал слабеть и сформировался новый минимум. В конце года (JD 2453730) блеск опустился ниже уровня предыдущего минимума (текущие наблюдения можно посмотреть с Java-совместимым браузером на сайте http://jet.sao.ru/~goray/cicam.htm). Амплитуда медленных изменений составила около $0^m.2$. Если это медленное изменение действительно циклично, то длительность цикла около 1600 дней. Такие медленные изменения не были зарегистрированы в наблюдениях CI Cam до вспышки и не описаны ни в работе Бергнера и др. (1995), ни в более поздней работе Мирошниченко

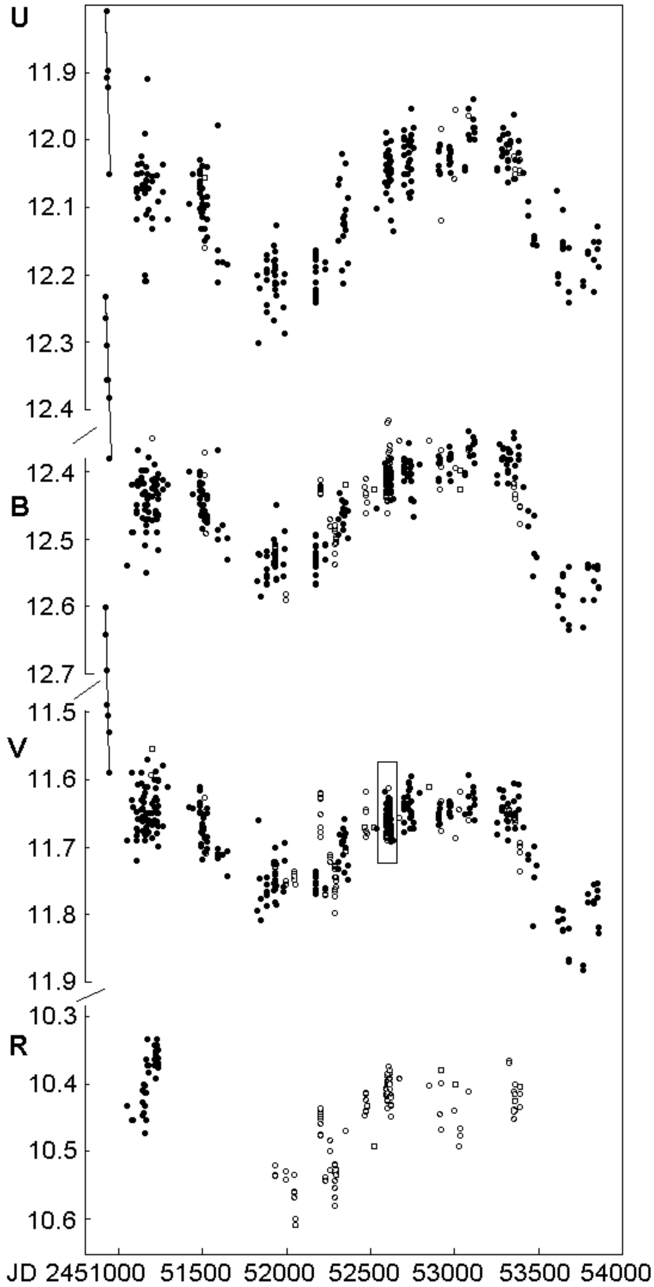

Рис. 6.

Кривые блеска CI Cam в полосах системы $UBVR_J$ в спокойном состоянии. Вспышка и наблюдения до вспышки на этом графике не показаны, сплошными линиями слева показана только конечная стадия вспышки. Черные кружки – фотоэлектрические наблюдения Н.В. Метловой, светлые кружки – наша ПЗС-фотометрия. Прямоугольником на кривой блеска V выделены наблюдения, специально проведенные для изучения быстрой переменности в шкале дней – десятков дней, они показаны отдельно на рис. 13.

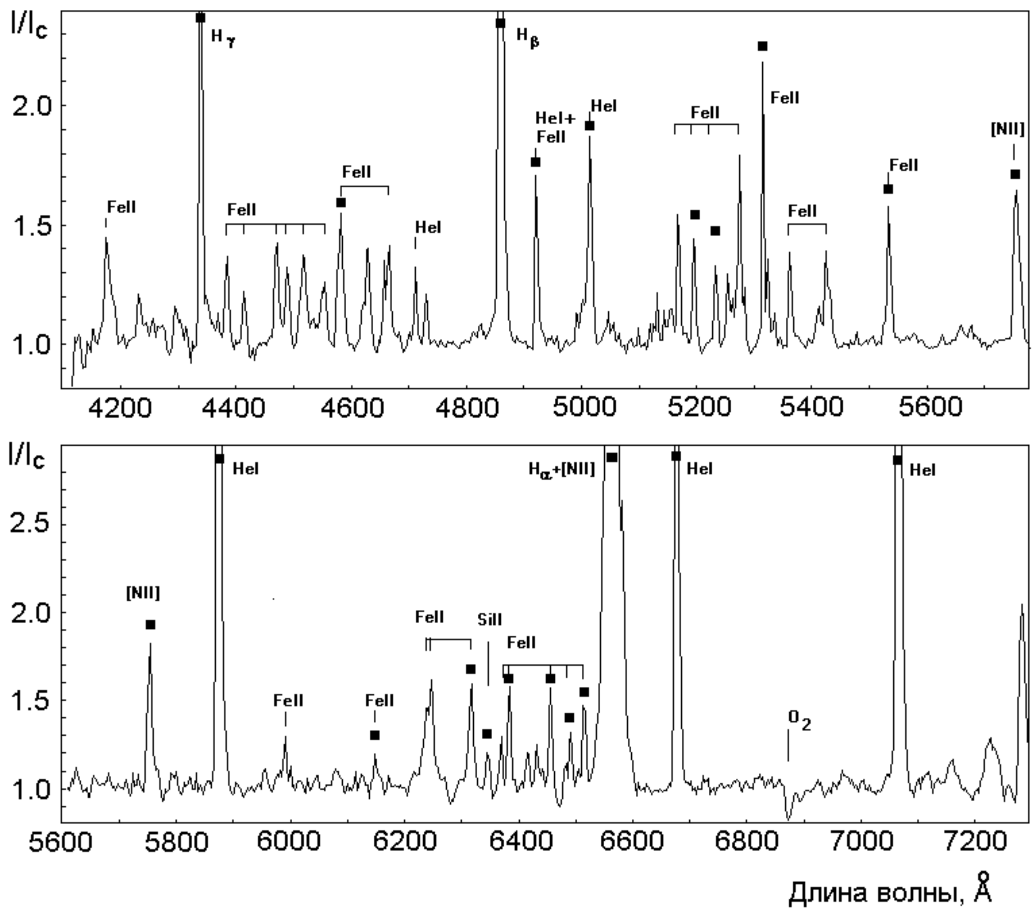

Рис. 7.

Типичный спектр CI Cam, полученный со спектрографом UAGS на 1-м телескопе Цейсса САО. Отождествлены самые яркие эмиссионные линии. Те линии, за которыми проводилось слежение для того, чтобы установить характер их изменений со временем, отмечены черными квадратами.

(1995). В работе Мирошниченко (1995) был заподозрен период 11.7 дня с амплитудой периодической составляющей $0^m.13\ V$, что сравнимо с полной амплитудой обнаруженных в нашей работе медленных изменений.

В работах Барсуковой и др. (2002а,в) были обнаружены изменения потоков в водородных линиях синхронные с фотометрическими изменениями (см., например рис. 1 и рис. 5а в статье Барсуковой и др., 2002а). Типичный спектр CI Cam и отождествление линий представлены на рис. 7. Для исследования характера изменений в эмиссионных линиях были выбраны в основном сильные линии, не составляющие бленды

(Барсукова и др., 2002a). Однако анализ спектров высокого разрешения в некоторых случаях показывает близкие компоненты, не разделяемые в спектрах среднего разрешения. Если линия оказывалась составной и не разделялась, для нее определены суммарные эквивалентные ширины и интенсивности компонентов.

H_α – самая интенсивная линия в оптическом спектре, в спокойном состоянии звезды ее эквивалентная ширина меняется в пределах 350–500 Å. В тех спектрах, которые предназначены для анализа слабых линий, эта линия обычно "передержана". Мы специально получали короткие экспозиции, чтобы измерить не искаженную интенсивность линии.

На рис. 8 а-г показаны типичные зависимости потоков в линиях от времени. Не показан ход параметров во время вспышки 1998 г., чтобы лучше представить поведение после вспышки в спокойном состоянии. На большинстве графиков видна только окончательная стадия затухания вспышки. Масштабы изменений в линиях во вспышке можно оценить по данным в табл. 3 на стр.51.

На рис. 8 а видны изменения в потоках водородных линий. Видно повторное усиление эмиссий после основной вспышки с максимумом около JD 2451300. На рис. 8 б – изменения потоков в линиях He I. Иногда наблюдается значительная быстрая переменность потоков. На рис. 8 в – изменения потоков в линиях Fe II. Около JD 2451300 они показывают значительную быструю переменность, подобно линиям HeI, а затем постепенно уменьшают свою яркость и выходят на стабильный пониженный уровень, соответствующий потокам до вспышки. На рис. 8 г – показано несколько линий с особым поведением. Вверху – кривая потока в запрещенной эмиссии [N II] λ5755Å. Повышенная дисперсия наблюдений после максимума потока этой линии по нашему мнению связана с ошибками наблюдений. Поток в этой эмиссии был слабым и не переменным во вспышке, а через 50 дней по окончании вспышки началось усиление линии, и максимум интенсивности был достигнут около JD 2451115, т.е. 210 $\pm$20 дней после пика основной вспышки. На этом фрагменте черными кружками везде показаны наши наблюдения. Светлые кружки –

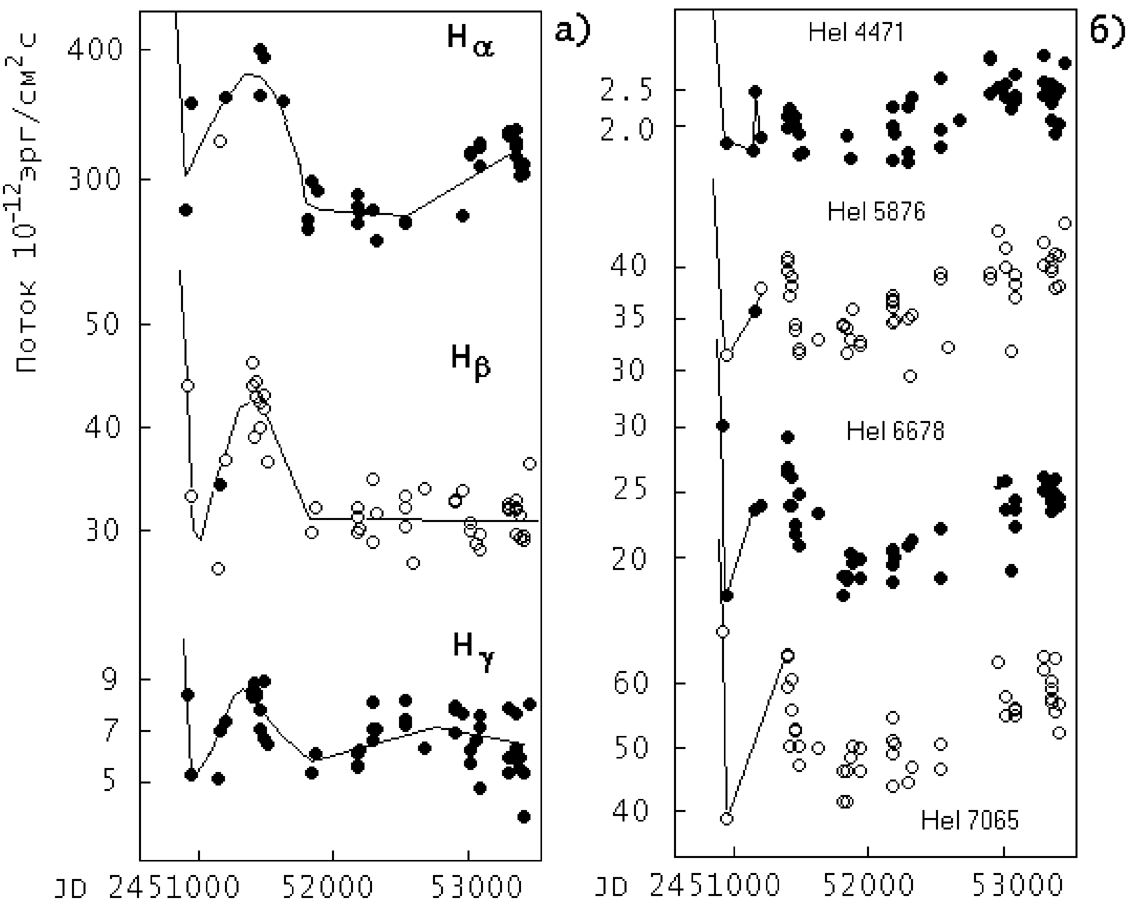

Рис. 8 а-г. Изменения потоков в различных эмиссиях у CI Cam в спокойном состоянии со временем. Сплошными линиями в начале каждой зависимости показан спад вспышки 1998 г. Заполненными и пустыми кружками выделены наблюдения в разных эмиссионных линиях. Белый кружок среди черных, и наоборот, обозначает наблюдение Орландини и др.(2000), остальные наблюдения наши.

потоки, вычисленные по эквивалентным ширинам, снятым с графика на рис. 5f из работы Хайнеса и др. (2002). Крестики – потоки, вычисленные по эквивалентным ширинам из работы Орландини и др. (2000). Эти дополнительные наблюдения интересны тем, что попадают на подъем потока к максимуму. Из-за технического устройства 1-м Цейсса на нем невозможно наблюдать CI Cam в низком положении над горизонтом на севере, в котором она находилась в этот период времени. В середине

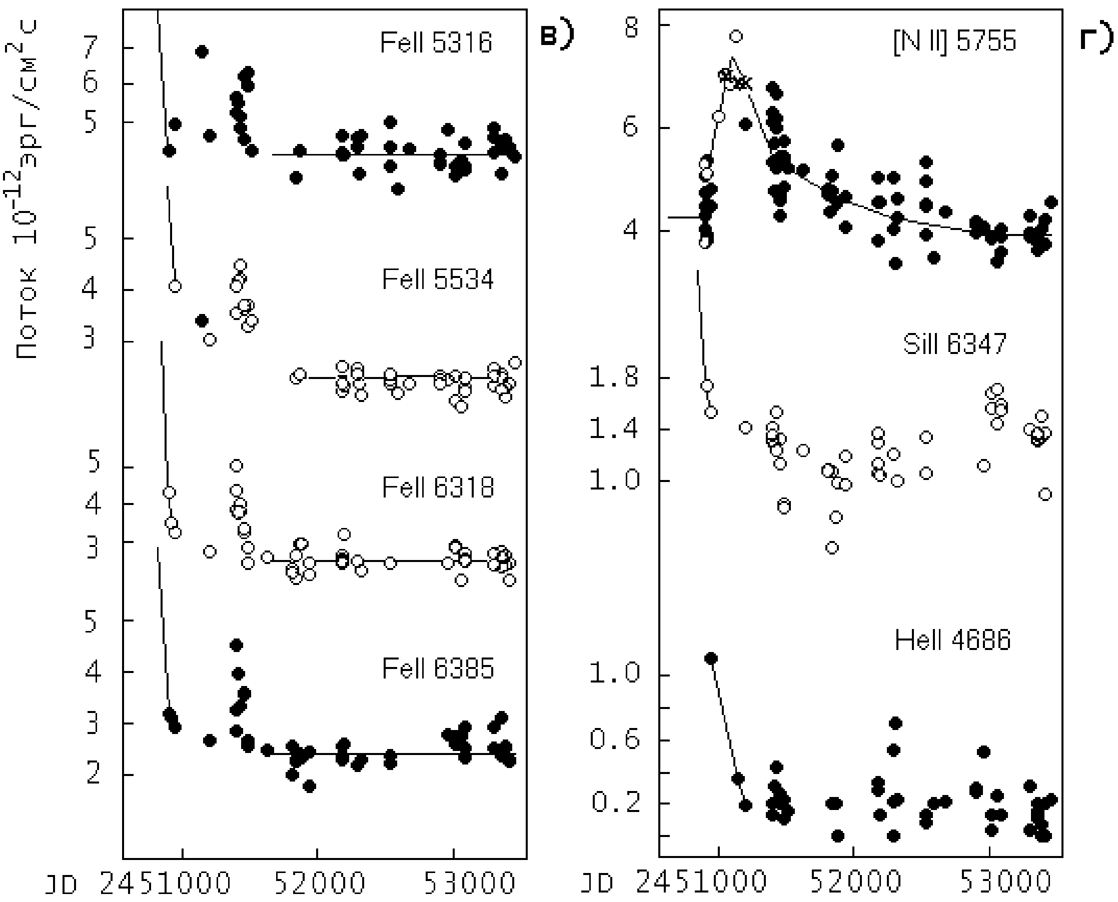

Рис. 8. Продолжение

рис. 8 г – поведение эмиссионной линии Si II λ6347Å, которая не показала повторного поярчания, подобного водородным линиям, и сразу перешла в спокойное состояние. Внизу – кривая потока в эмиссии He II λ4686Å. Амплитуда изменения потока в этой линии была максимальной, более 300 раз, и сразу после вспышки эмиссия ослабела до уровня спокойного состояния, в котором она временами усиливается или исчезает совсем.

Разные линии показывают существенно разное поведение. Выделяются по крайней мере 5 типов поведения спектральных линий, тип поведения приводится в последнем столбце табл. 3.

Тип He II λ4686Å.

Сильная вспышка эмиссии с изменением эквивалентной ширины по крайней мере в 130 раз, а потока в 300 раз по сравнению со спокойным

Таблица 3. Поведение спектральных линий во вспышке

Линия	λ_{lab}	EW_o/EW_q	$lg(F_o/F_q)$	$lg(P_i+P_{ex})$	Тип
H_γ	4340.468	4.86	0.96	1.12	H_α
FeII	4414.78	2.97	0.80	1.13	H_α
HeI	4471.688	12.28	1.43	1.36	HeI
FeII	4583.290	2.89	0.88	1.13	H_α?
HeII	4685.810	132.82	2.49	1.88	$HeII$
H_β	4861.332	3.24	0.87	1.11	H_α
HeI(+FeII)	4921.929	3.79	1.51	1.36	HeI
HeI	5015.675	22.90	1.68	1.36	HeI
FeII	5197.569	3.49	0.92	1.12	H_α
FeII	5234.620	5.52	1.09	1.13	H_α
FeII	5316.609	2.90	0.87	1.13	H_α
FeII	5534.860	2.70	0.83	1.13	H_α
$[NII]$	5754.640	0.32	-0.10	1.25	$[NII]$
HeI	5875.792	8.70	1.35	1.36	HeI
FeII	6147.735	2.60	0.98	1.14	$SiII$
FeII	6318.000	1.23	0.53	1.14	HeI
SiII	6347.091	5.52	1.26	1.26	$SiII$
FeII	6385.470	1.00	0.54	1.11	HeI
FeII	6456.376	1.71	0.88	1.14	H_α
FeII	6491.670	0.94	0.82	1.13	$SiII$
FeII	6516.053	1.88	0.77	1.10	H_α
H_α	6562.816	1.21	0.60	1.08	H_α
HeI	6678.151	7.92	1.41	1.36	HeI
HeI	7065.440	4.60	1.23	1.36	HeI

состоянием. (Вспышка не воспроизводится на рис. 8г из-за неудобства такого воспроизведения, отрезком линии показан только конец спада вспышки). Линия He II, вероятно, формируется в непосредственной близости от компактного объекта. В течение семилетнего ряда наблюдений в спокойном состоянии линия He II остается очень слабой, ее эквивалентная ширина меняется около 0.3Å (рис. 8 г).

Тип Hα.

Вспышка в интенсивностях в 5–10 раз и волнообразное изменение эквивалентной ширины, которое после вспышки повторяет цикл изменения блеска (рис. 8 а). В начале наблюдательного сета даже существовала корреляция эквивалентной ширины линий этого типа и блеска в полосах $UBVR$. Но после первого фотометрического минимума около JD 2452000, когда блеск пошел вверх, потоки в линиях вверх не пошли, а стабилизировались в спокойном состоянии на низком уровне (см. рис. 6 и рис. 8 а). Таким же образом, как бальмеровские линии ведет себя большинство линий FeII.

Волну изменения потока в линиях в интервале JD 2451090 – 2452000 более точно можно интерпретировать как повторное поярчание (rebrightening – термин Р.И. Хайнеса), после которого появляется тенденция перехода в спокойное состояние с изменениями малой амплитуды. Возможно, эта волна явилась реакцией газо-пылевой оболочки на вспышку. Перевод эквивалентных ширин в потоки увеличивает относительную амплитуду повторного поярчания в водородных линиях от 25 до 43%.

Тип He I.

Вспышка в потоках линий в 15–50 раз, а в спокойном состоянии – сильные неправильные изменения эквивалентных ширин (рис. 8 б). Кроме всех линий He I к этому типу принадлежат линии Fe II λ 6318 и 6385Å. Не наблюдается повторного поярчания в линиях этого типа. Сравнение эквивалентных ширин до и после вспышки показывает, что линии He I после вспышки ослабели даже ниже предвспышечного уровня. Впервые это явление замечено в наших работах (Барсукова и др., 1998; Барсукова и Фабрика, 2000) и в сообщении Хайнеса и др. (1998). По оценке Хайнеса и др. (1998) после большой вспышки 1998 г. эквивалентные ширины эмиссий He I (в отличие от H I) уменьшились в 2–10 раз ниже уровня, наблюдавшегося в старых архивных спектрах, полученных до вспышки 1998 г. Более подробно это явление исследовано в последующей совместной работе (Хайнес и др., 2002). В течение всего нашего семилетнего ряда наблюдается медленное поярчание гелиевых линий к невозмущенному спокойному состоянию до 1998 г. Из такого значительного ослабления линий гелия мы предположили, что внешние части оболочки или структура газовых потоков в системе CI Cam могли быть разрушены в результате вспышки, а теперь они восстанавливаются.

В сезон 1999 г. (JD 2451399–2451485), когда у линий с поведением типа H_α наблюдается широкий максимум на зависимости эквивалентных ширин и потоков от времени, линии типа He I показывают постепенное систематическое ослабление эквивалентных ширин и потоков. Заметим, что в начале этого сезона рентгеновский источник был зарегистрирован спутником BeppoSAX с мягким спектром, а в середине сезона – с жестким спектром (Орландини и др., 2000; Пармар и др., 2000). Вероятно, поведение этих линий чувствительно к рентгеновскому потоку от компактного компонента, и мы наблюдали спад потоков в линиях после локальной слабой рентгеновской вспышки. Нужно заметить, что профили линий Fe II (имеющие в высокодисперсных спектрах характерную прямоугольную форму (Робинсон и др., 2002) с крутыми спадами и двумя, не равными по интенсивностям пиками на краях) заметно отличаются по форме от водородных линий и линий He I.

Линии Fe II, которые показывали поведение подобное линиям водорода или подобное линиям He I, после фотометрического минимума JD 2452000 повели себя одинаковым образом: опустились до еще более низкого уровня, и их потоки стабилизировались (рис. 8 в).

В отличие от линий водорода интенсивности линий HeI к тому же хорошо коррелируют между собой (рис. 8 б).

Тип Si II.

Вспышка по интенсивности в 6–18 раз, после которой наблюдается медленное постепенное падение блеска. Следов циклического изменения или повторного поярчания явно не наблюдается. Кроме линии Si II λ6347Å так ведут себя еще две линии Fe II λ6148 и 6492Å.

Тип [N II].

Запрещенная линия [N II] λ5755Å попадает одновременно на голубые и красные спектры, и поэтому ее изменение прослежено наиболее подробно (рис. 8 г, вверху). Эмиссия была очень слабой, но измеримой во время вспышки, и ее эквивалентная ширина постепенно увеличивалась по мере ослабления блеска (рис. 9). Это увеличение было обнаружено в нашей первой работе (Барсукова и др., 1998). По окончании вспышки эквивалентная ширина достигла максимума, а затем постепенно уменьшалась. Необычность поведения этой линии в сравнении с другими линиями была объяснена в работе Барсуковой и др. (2002а), в которой эквивалентные ширины были переведены в потоки излучения с помощью фотометрических данных. Оказывается, поток излучения в этой линии во время вспышки был постоянным, в то время как потоки других эмиссий возросли на порядок или больше. Ее эквивалентная ширина уменьшилась во вспышке просто потому, что увеличился поток излучения в подстилающем континууме. В JD 2451115, т.е. 210$\pm$20 дней после пика рентгеновской вспышки, когда потоки во всех других эмиссиях уменьшились до спокойного уровня, поток в [N II] достиг максимума, который в 1.8$\pm$0.2 раза больше уровня, наблюдавшегося во время вспышки. Затем он постепенно уменьшился до уровня, наблюдавшегося во время вспышки, или даже немного ниже этого уровня, что видно на рис. 8 г (вверху). Линия [N II], очевидно, формируется в самых внешних частях газо-пылевой оболочки, где плотность газа очень мала.

Электронную плотность в этих областях оболочки мы определили по отношению потоков в линиях [N II] λ6583Å+ λ6548Å к потоку в линии [N II] λ5755Å по уравнению (5.5) на стр. 101 (Остерброк, 1974). Воспользовавшись спектром высокого разрешения, полученным на БТА со спектрографом NES в ноябре 2005 г., и фотометрическими данными, относящимися к этому периоду, мы получили следующие потоки в линиях (в единицах 10^{-13} эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$), исправленные за межзвездное поглощение: 29.7 (λ5755Å), 3.6 (λ6583Å), 11.5 (λ6548Å). Для электронной температуры от 9000^{o}K до 11000^{o}K, приемлемой для различных газовых туманностей как первое приближение (Остерброк, 1974), мы определили электронную плотность в области излучения линий [N II] в пределах $5.5 \cdot 10^6$ см$^{-3} < n_e < 8.5 \cdot 10^6$ см$^{-3}$.

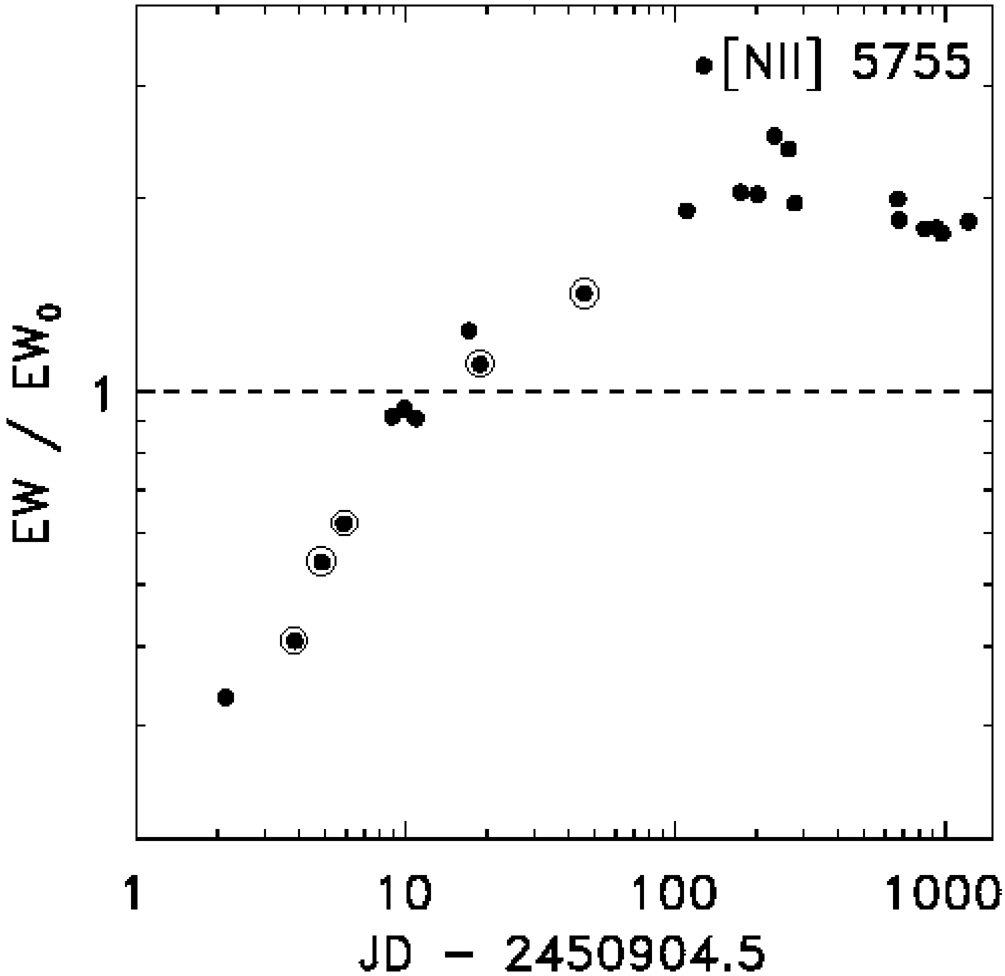

Рис. 9.

Изменение эквивалентной ширины эмиссионной линии λ5755Å по всем наблюдениям CI Cam, сделанным в мире, по совместной работе Хайнеса и др. (2002) с нашим участием. По оси абсцисс отложено время с начала вспышки, которое отсчитывается от максимума рентгеновского потока в логарифмической шкале. По оси ординат отложены эквивалентные ширины, нормализованные к уровню до вспышки, который отмечен штриховой линией. Наши наблюдения, выполненные в САО на БТА, на рисунке обведены кружками. Увеличение эквивалентной ширины в первые 20–50 дней после вспышки связано только с падением блеска в континууме. Поток эмиссии в это время оставался постоянным.

По точным измерениям наших спектрограмм БТА с угловым разрешением 2–3$''$ профили распределения яркости вдоль щели в непрерывном спектре и в эмиссии [N II] λ5755Å совершенно не отличаются (совпадение с точностью 3–5% по полуширине профиля). Мы предположили, что поярчание эмиссии через 210 дней после вспышки связано с выбросом вещества при вспышке. Первоначальная скорость движения выброса 1200 км/с определяется по ширине пьедесталов (широких компонентов) эмиссионных линий во вспышке (Барсукова и Фабрика, 2000; Хайнес и др., 1998). Угловой размер выброса в картинной плоскости в секундах дуги составит $\alpha = 0.00058Vt/d$, где V – проекция скорости выброса на картинную плоскость, t – время в днях, d – расстояние в парсеках. Принимая наклонение оси выброса 53^o из работы Медушевски и Рупена (2004), t = 210 дней, d = 1500 пк и не учитывая замедление выброса, получаем угловой размер выброса 0".13. С учетом замедления эта величина была еще меньше и осталась за пределами углового разрешения наших спектрограмм с длинной щелью. Отсюда же следует, что радиус протяженной оболочки не превышает 200 а.е.

Итак, мы имеем пять типов поведения спектральных линий после вспышки. Вместе с известным инфракрасным избытком, который дает пыль, разнообразие типов подтверждает существование в системе стратифицированной газо-пылевой оболочки. Под термином "стратифицированная оболочка" мы понимаем сложную структуру, окружающую B[e]-звезду и состоящую из экваториального звездного ветра и формируемого этим ветром экваториального диска ("дискообразного ветра" по Зикграфу, 2003), полярного звездного ветра, пылевой оболочки и удаленных от звезды внешних слоев малой плотности, в которых формируются запрещенные линии. Семилетние спектральные наблюдения в спокойном состоянии показывают основную тенденцию к стабилизации структуры этой сложной стратифицированной околозвездной оболочки после того, как эта структура была нарушена ионизацией при вспышке и прохождением ударной волны в результате вспышки. Если слои оболочки, излучающие эмиссию Fe II (экваториальный звездный ветер) были восстановлены уже через 3 года после вспышки, эмиссия He I еще продолжает приближаться к уровню до вспышки 1998 г.

3. Спектральный класс B[e]-звезды

После семи лет интенсивных исследований информация о CI Cam остается противоречивой. До сих пор не определено расстояние до звезды. В работах Кларка и др., 2000, Жореца, 1998, Чхиквадзе (1970), Беллони и др. (1999), Орландини и др. (2000) приводятся аргументы в пользу малого расстояния 1–2 кпс, в работах Хайнеса и др. (2002), Робинсона и др. (2002) и Медушевски и Рупена (2004) – в пользу большого расстояния 5–17 кпс, в работе Мирошниченко и др. (2002) отдано предпочтение промежуточной величине ≈ 2.5 кпс. От выбора расстояния зависит многое: природа компонентов системы, оценка энергетики и объяснение причины вспышки 1998 г. Согласно Хайнесу и др. (2002), Робинсону и др. (2002) и Ишиде и др. (2004), оптическим компонентом является звезда-сверхгигант класса B0–B3, компактным компонентом может быть либо черная дыра или нейтронная звезда, либо белый карлик. В качестве причин вспышки рассматривается событие сверхкритической аккреции на черную дыру или нейтронную звезду (Хайнес и др., 2002), а также термоядерный взрыв на поверхности белого карлика – механизм вспышек классических новых звезд (Орландини и др., 2000; Ишида и др., 2004). В оптической и ИК областях спектра вклад эмиссии околозвездной оболочки очень большой, и звездные компоненты почти не проявляют себя в спектре. Согласно Мирошниченко и др. (2002) никаких фотосферных линий не было обнаружено даже в спектрах высокого спектрального разрешения ($R \approx 60000$). По спектральным наблюдениям на телескопе "Хаббл" в далеком ультрафиолете (УФ) распределение энергии CI Cam совпадает с распределением энергии звезды класса B3IV при учете межзвездного покраснения E(B-V)=$0^m.85 \pm 0.05$ (Робинсон и др., 2002). Как видно из цитированной ранее литературы по расстоянию до CI Cam, работа Робинсона и др. (2002) была первой, которая серьезно ревизовала расстояние в сторону увеличения, более 5 кпк. Именно на этой работе основаны выводы о том, что CI Cam относится к классу сверхгигантов sgB[e], что энергетика вспышки 1998 г. соответствует сверхкритической аккреции на черную дыру. Этой же точки зрения придерживаются и мои соавторы работы (Хайнес и др., 2002). В частности Хайнесом и др. (2002) были обнаружены широкие абсорбции в бальмеровских линиях высоких номеров, наиболее четко выраженные в H_δ и H_ϵ, которые, вероятно, являются фотосферными. Известно, что ширина линий водорода зависит от плотности вещества в фотосфере звезды (эффект Штарка). А плотность вещества в фотосферах сверхгигантов меньше, чем у звезд главной последовательности и гигантов. Поэтому линии, формирующиеся в фотосферах сверхгигантов, более узкие, чем линии в спектрах звезд главной последовательности. Ширина крыльев линий водорода в спектре CI Cam противоречит выводам работы Хайнеса и др. (2002) о том, что B[e]- компонент системы является сверхгигантом, они для этого вывода очень широки. На рис. 3 в статье Хайнеса и др. (2002) они составляют 25Å. Однако, наши соавторы не провели детальную диагностику в водородных линиях по своим спектрам "из-за большой засоренности крыльев линий другими линиями и, возможно, остаточной ветровой эмиссией".

Для проведения такой диагностики 18 февраля 2004 г. мы получили на БТА со спектрографом UAGS спектр CI Cam, распространяющийся в синюю сторону до λ3680Å, при высоком отношении сигнал/шум. В спектре видны профили водородных линий более высоких номеров, от H_ζ до H_{10} (рис. 10). Спектральное разрешение составляет 4.3Å, полная ширина абсорбционных крыльев на уровне континуума FWZI $= 25 \pm 2$ Å, в то время как полуширина эмиссионных компонентов всего FWHM $= 4.8 \pm 0.2$ Å. На рисунке видно, что интенсивность эмиссионных компонентов водородных линий круто падает с увеличением номера линии, так что уже в профиле H_η пик эмиссии лишь немного превышает уровень континуума. Выпадает из крутой зависимости только линия $H_\zeta\lambda$3889.051Å, которая выглядит более сильной и широкой, вероятно, из-за блендирования сильной эмиссией He I λ3888.646Å. Для определения спектрального класса и класса светимости CI Cam мы должны сравнить параметры абсорбционных профилей CI Cam и профилей нормальных звезд класса B с различными классами светимости. Очевидно, что для сравнения мы не можем использовать параметр полуширины FWHM абсорбционного компонента из-за искажения центральных частей профиля эмиссией. Однако полная ширина FWZI может быть использована, так как для ее определения не нужно знать глубину линии, а узкий эмиссионный компонент не искажает края широких крыльев линии. Однако, точность определения FWZI на порядок меньше, чем FWHM.

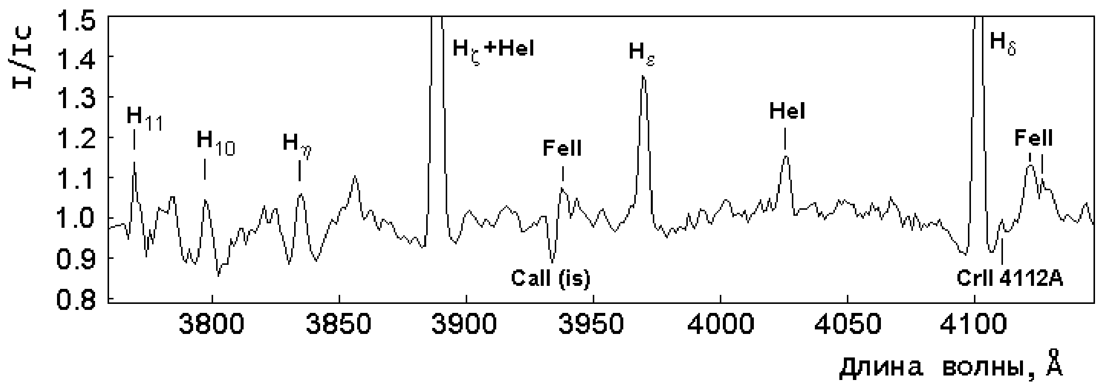

Рис. 10.

Фрагмент спектра среднего разрешения CI Cam в синем диапазоне (БТА/UAGS). Видны широкие абсорбционные крылья водородных линий и межзвездная линия Ca II H λ3968Å.

Мы выбрали линии H_δ λ4101Å и H_η λ3835Å, абсорбционные крылья которых наименее искажены близкими эмиссионными линиями околозвездной оболочки. На рис. 10 видно, что на красное крыло H_δ накладывается только одна слабая и узкая линия, которую мы отождествляем с Cr II λ4112 Å, и которая не помешает оценке полной ширины H_δ.

Зависимость ширины и полуширины водородных линий для нормальных B-звезд разного класса светимости мы исследовали по звездным спектрам из двух баз данных (Якоби и др., 1984; Ле Боргне и др., 2003), в качестве контрольной звезды использовалась HD 52918 (B1V), спектрограмма которой была получена в ту же ночь и с тем же прибором. Разрешение спектров в базе данных Якоби и др. (1984) составляет в среднем 4.5 Å, что близко к нашему, 4.3 Å. Спектры из Тулузской базы данных (Ле Боргне и др., 2003) имеют более высокое разрешение, 2.9Å. Для них величины FWZI и FWHM были пересчитаны к более низкому разрешению, 4.3Å в предположении, что сами линии и инструментальные профили имеют форму гауссианы. Полуширины линий FWHM этих звезд определялись с помощью метода CENTER/GAUSS пакета MIDAS.

Результат анализа баз данных – зависимость ширины линий H_δ и H_η от спектрального класса и класса светимости показана на рис. 11, на котором сверхгиганты класса I и II отмечены косыми и прямыми крестами соответственно, а звезды класса III, IV и V - кружками, ромбами и квадратами соответственно. Светлым квадратом отмечено положение контрольной звезды HD 52918. В определении полной ширины линий есть некоторый элемент произвольности, полная ширина зависит от принятого уровня континуума и оценивается с погрешностью 2–3 Å. Поэтому мы оценивали также и полуширины линий, результаты этих оценок показаны на рис. 12. Наличие четкой зависимости величин FWZI и FWHM является основанием считать наши оценки достаточно достоверными.

Как видно на рис. 11, минимальное различие ширины линий для разных классов светимости наблюдается только у самых горячих B-звезд, B0–B2. Для более поздних спектральных классов разница ширин линий между классами светимости I–II и III–V увеличивается, хотя не заметно существенного различия между I и II классами, а также между классами III–V. Имея ширину абсорбционных крыльев в 25 Å, CI Cam расположена на графиках *далеко вне области сверхгигантов*, и ее спектральный класс может быть определен однозначно как B4 III–V. Абсолютная величина такой звезды M_V может быть в пределах $-1^m.2$ и $-2^m.3$ (Страйжис, 1982), а расстояние, вычисленное с принятой величиной межзвездного покраснения $E(B-V) = 0^m.85$ составляет 1.1–1.9 кпк.

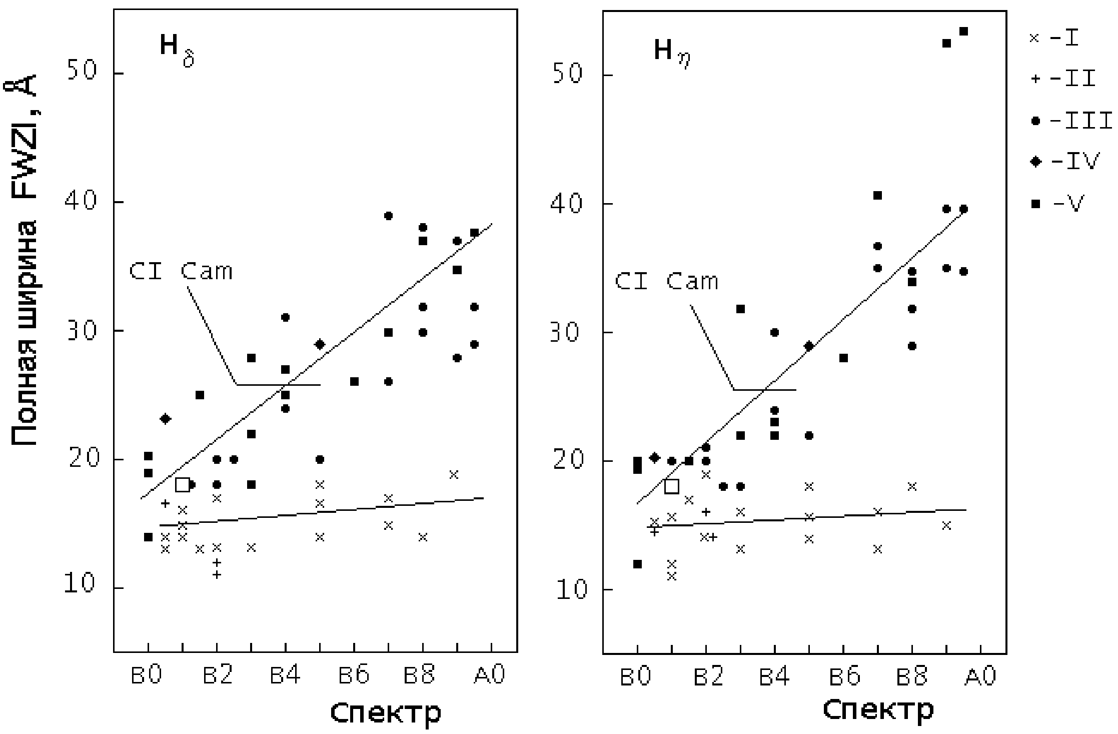

Рис. 11.

Зависимость полной ширины линий FWZI H_δ и H_η в спектрах нормальных B-звезд от спектрального класса и класса светимости. Сверхгиганты класса I и II отмечены косыми и прямыми крестами соответственно, а звезды класса III, IV и V - кружками, ромбами и квадратами соответственно. Светлым квадратом отмечено положение контрольной звезды HD 52918.

Согласно Робинсону и др. (2002), УФ спектр CI Cam в диапазоне λ1250–2650Å хорошо согласуется со спектром звезды BD+33^{o}2642 (B3IV) (рис. 5 в работе Робинсона и др., 2002). Спектр B3 IV в пределах ошибки определения совпадает с нашим значением, B4 III-V. Но в работе Робинсона и др. (2002), тем не менее, звезда была классифицирована по другим признакам как сверхгигант, и ей было приписано расстояние более 5 кпк.

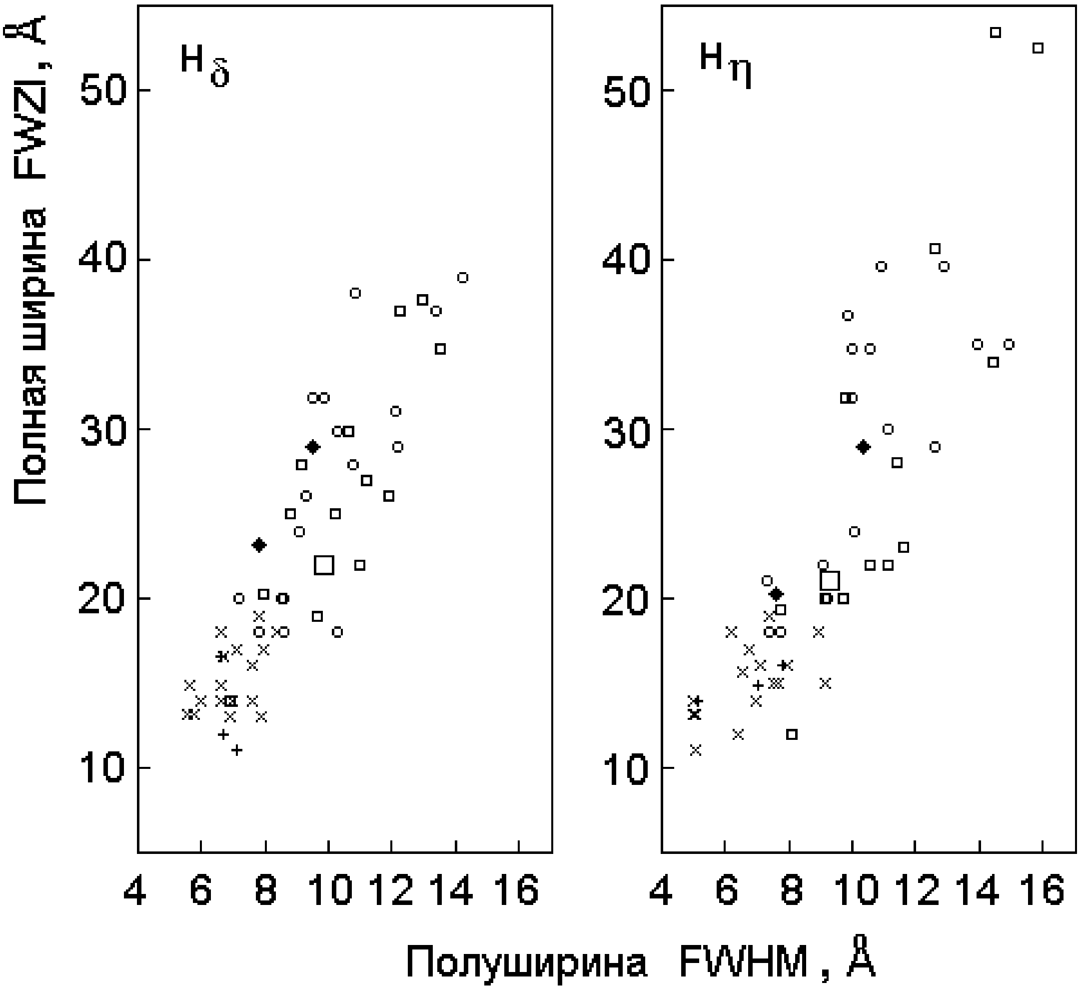

Рис. 12.

Зависимость полуширины линий FWHM H_δ и H_η и полной ширины в спектрах нормальных B-звезд разных классов светимости. Обозначения те же, что и на рис. 11.

4. Орбитальный период CI Cam

В первых наших работах (Барсукова и др., 2002a,в) предполагалось, что медленные циклические изменения, наблюдаемые фотометрически, могут быть результатом "эффекта отражения" на поверхности холодного компонента G8II или K0II (Мирошниченко, 1994,1995) в широкой системе, подобной симбиотическим (подкласс symB[e]). Тогда фотометрический цикл мог бы быть связан с движением по орбите. Впоследствии мы от этого предположения отказались.

У CI Cam был известен также еще один фотометрический период, $11^d.7$, найденный Мирошниченко (1995) в наблюдениях Бергнера и др. (1995). По нашим фотометрическим наблюдениям первых трех лет слежения (Барсукова и др., 2002а,в) период Мирошниченко был подтвержден только в полосе V. Полумплитуда пика, относящегося к 11-дневному периоду, составляла всего $0^m.015$, то есть полная амплитуда $0^m.03$, но оценка уровня значимости этого периода была достаточно высокой, выше 99.999%. Остаточные уклонения в этой полосе имели дисперсию $0^m.029$. Значение периода составляло тогда $11^d.719$.

Мы повторили исследование Мирошниченко по фотометрии Бергнера и др. (1995) и подтвердили период $11^d.704$ по наблюдениям до вспышки. Амплитуда периодической составляющей была тогда равна $0^m.16$ B и $0^m.13$ V и $0^m.10$ R. В работе Като и Уемуры (2001) период $11^d.7$ не был подтвержен по новой ПЗС-фотометрии в сезон 1999 г. по их 259 ПЗС-наблюдениям. Наблюдения показали неправильный характер переменности с амплитудой $0^m.2$, медленный тренд, мини-вспышку.

Мы провели специальные интенсивные фотометрические наблюдения на 60-см телескопе Крымской станции ГАИШ МГУ в период 28 ночей с 15 ноября по 12 декабря 2002 г. (JD 2452594 – 2452621), чтобы еще раз проверить период 11.7 дня. Этот интервал времени перекрывает 2.4 искомых 11-дневных периода. Наблюдения проводились параллельно фотоэлектрическим и ПЗС-методом. Мы благодарны ГАИШ и его Крымской станции за предоставление такого большого количества наблюдательного времени и ПЗС-приемника, а также Н.В. Метловой за поддержку параллельной электрофотометрией, так как все это привело к открытию орбитального периода CI Cam (Барсукова и др., 2005а,б). Результаты наблюдений в фильтре V показаны на рис. 13. Наблюдается четкая волна в изменениях блеска, период которой явно больше, чем 11.7 дня, и по этому рисунку он оценивается как ≈ 19 дней. Оказывается, этот период содержится и в остальных фотометрических данных.

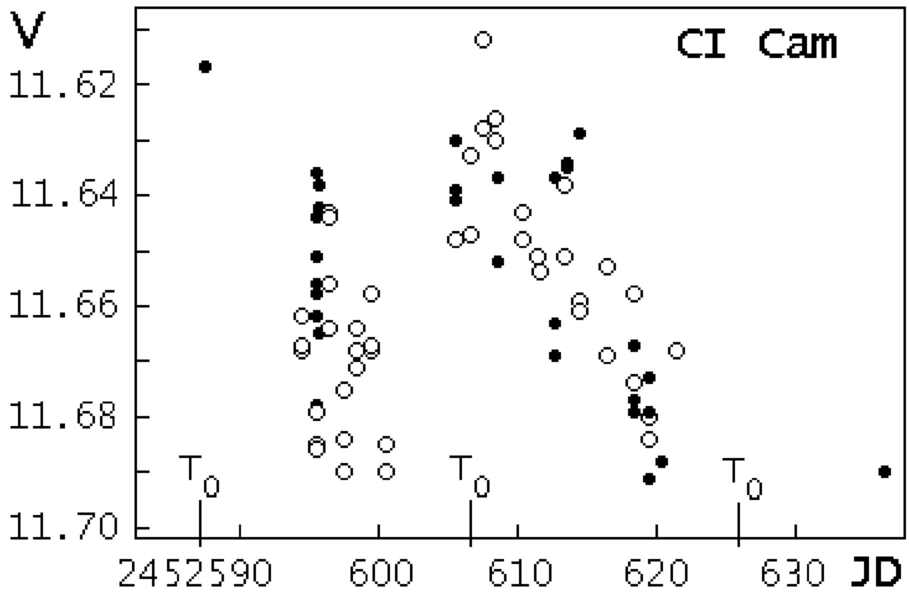

Рис. 13.

Фрагмент кривой блеска V, показывающий периодические малоамплитудные изменения с $P \approx 19$ дней. Черные кружки – фотоэлектрические наблюдения Н.В. Метловой, светлые кружки – наша ПЗС-фотометрия. На рис. 6 этот фрагмент выделен прямоугольником.

Для уточнения 19-дневного периода был использован весь ряд наших фотометрических наблюдений 1998 – 2005 годов, представленный на рис. 6. Для частотного анализа быстрых изменений блеска мы вычли из кривых блеска в полосах UBV среднюю сглаженную кривую медленного тренда. К остаточным уклонениям был применен частотный анализ методом Диминга (1975). Были просчитаны два варианта: все данные, усредненные за ночь (всего 172 ночи), и те же данные без наблюдений ноября-декабря 2002 г. Амплитудный спектр по всем данным показан на рис. 14, где доминирует пик с периодом 19.407 дня (полуамплитуда гармоники $0^m.016$). Точность определения периода составляет 0.02 дня. На этом же рисунке показано положение, соответствующее ранее выявленному периоду 11.7 дня (Мирошниченко, 1995). Очевидно, что пик 11-дневного периода сильно подавлен наблюдениями последних 4 сезонов, но новый пик 19-дневного периода четко выявляется. Старые наблюдения первых трех сезонов не противоречат новому периоду. Аналогично выглядит амплитудный спектр по независимому ряду наблюдений (без ноября-декабря 2002 г.), и это доказывает наличие 19-дневной периодичности независимо во всех остальных наблюдениях. На рис. 15 показана фазовая кривая блеска с периодом 19.407 дня. На этом рисунке каждая точка – среднее значение по всем наблюдениям за ночь. Эпоха максимума, снятая со средней кривой блеска, JD hel. = 2452200.75$\pm 0^d.6$. Сплошной линией на этом рисунке нанесена средняя кривая блеска, вычисленная методом скользящего среднего.

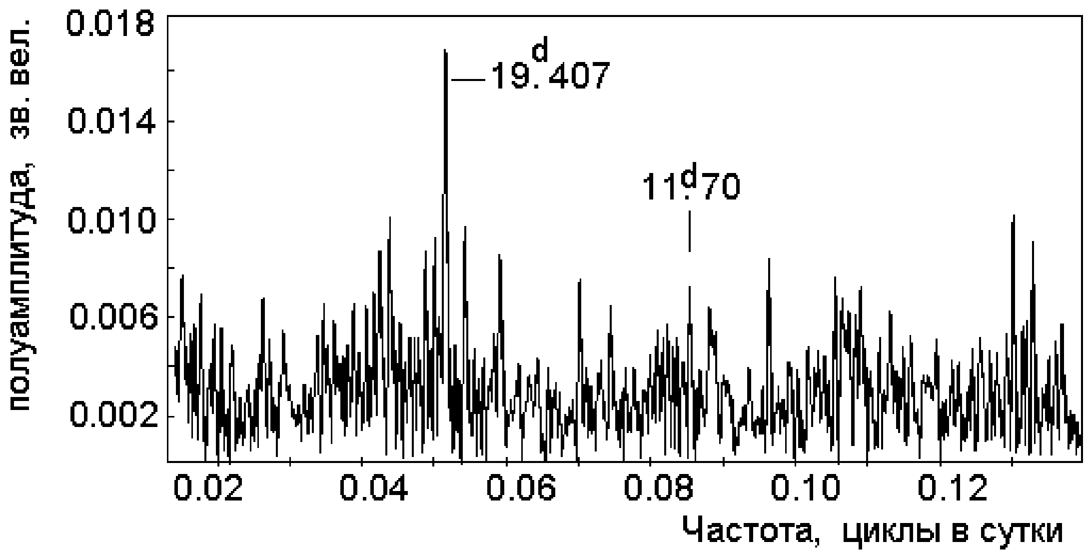

Рис. 14.

Периодограмма амплитуда-частота, рассчитанная методом Диминга. Показаны пики орбитального периода 19.407 дня и ранее найденного Мирошниченко (1995) периода 11.7 дня.

Мы обнаружили, что линия He II λ4686Å смещается из-за эффекта Доплера относительно соседних линий Fe II и He I более, чем на 400 км/с (см. рис. 16). Смещения линии He II зависят от фазы нашего фотометрического периода 19.41 дня (рис. 17).

По имеющимся у нас эшелле-спектрам БТА, полученным со спектрографами NES и LYNX, и по литературным источникам большинство спектральных линий CI Cam в спокойном состоянии не показывает заметной переменности лучевой скорости. Точность измерений лучевой скорости с эшелле-спектрографами БТА составляет ~1 км/с. Эмиссии Fe II, формирующиеся в звездном ветре, имеют прямоугольный профиль шириной 1.3 Å (см., например, Робинсон и др., 2002, рис. 7). Лучевая скорость, измеренная по центру этих линий, колеблется в пределах -46 и -51 км/с, что может быть объяснено систематическими ошибками разных приборов. Важно, однако, то, что смещения линии He II в 100 раз больше, чем возможные смещения линий Fe II.

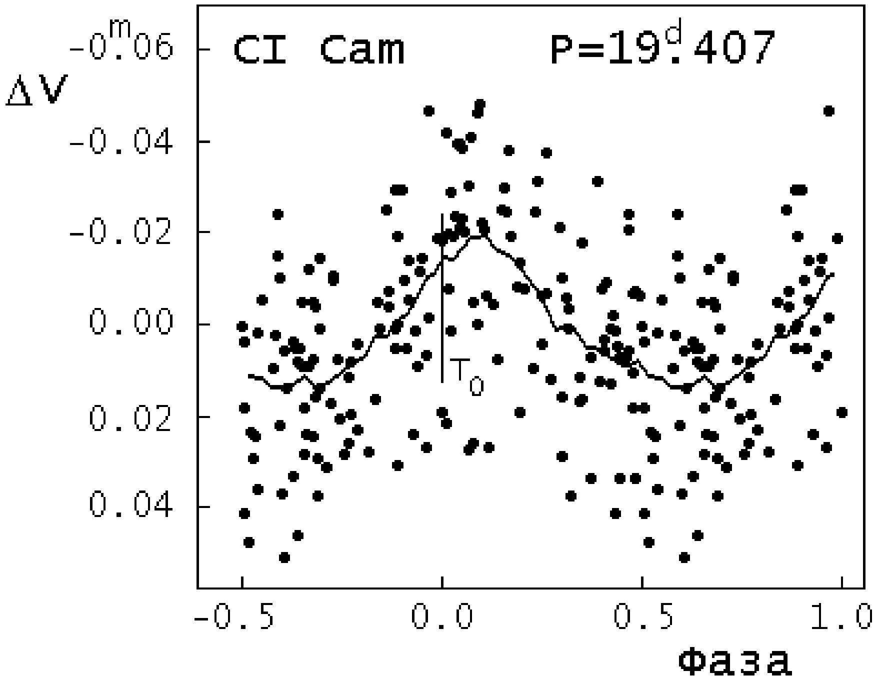

Рис. 15.

Кривая блеска в полосе V для остаточных уклонений с периодом 19.41 дня. T_0 - спектроскопическая фаза нижнего соединения источника эмиссии He II. Каждая точка на графике – среднее за ночь значение. Средняя точность одного наблюдения составляет $0^m.01 - 0^m.02$.

При обработке спектров 1-м Цейсса САО, полученных со спектрографом UAGS, мы обнаружили большие систематические ошибки в определении лучевых скоростей. В индивидуальных спектрах шкала длин волн, определяемая дисперсионной кривой по спектру лампы, произвольно смещается в диапазоне 300 км/с. Для повышения точности измерения лучевой скорости линии He II λ4686 Å пришлось использовать дифференциальный метод определения лучевой скорости относительно стационарных "ветровых" линий Fe II в ее окрестностях. Фрагмент спектра высокого разрешения (рис. 18) показывает в окрестностях линии He II удобные неблендированные линии Fe II λ4629 Å и λ4731 Å. Тесную бленду He I λ4713 Å мы использовали как контрольную линию для оценки точности измерений лучевой скорости и для проверки стабильности скоростей линий Fe II. Линия He I не показывает доплеровского смещения и фазовой зависимости от 19-дневного периода (рис. 17 б). Средняя точность лучевой скорости He I по спектрам со спектрографом UAGS составила 23 км/с.

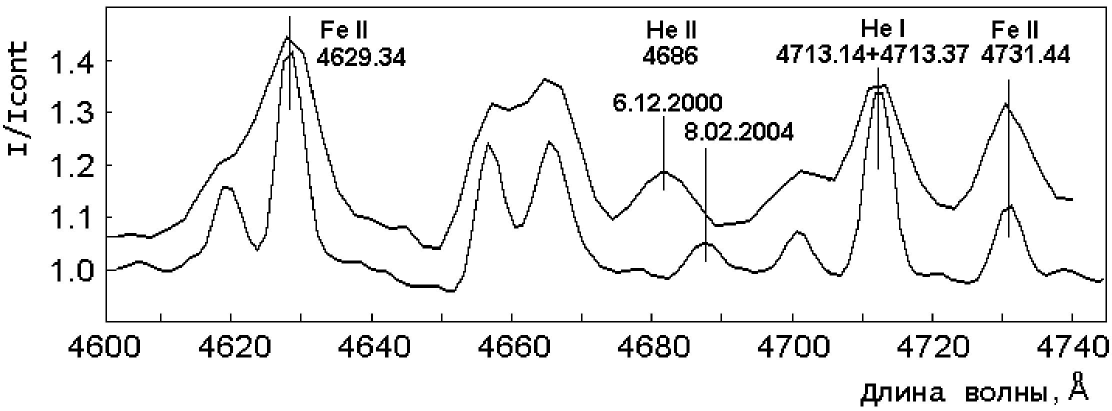

Рис. 16.

Совмещение двух спектров (БТА/UAGS) в районе эмиссии HeII λ4686Å. Видно доплеровское смещение линии HeII на 400 км/с.

В спокойном состоянии линия He II λ4686 Å очень слаба и временами видна на уровне шума. В четырех спектрах она не обнаружена. Измерения лучевой скорости столь слабой линии могут быть неточными, и для контроля точности мы оценили в каждом спектре качество ее профиля в 10-кратной шкале. Если профиль имеет симметричную колоколообразную форму и большую интенсивность, ему давалась оценка 10, если линия видна как слабая флуктуация на уровне шума, то 1, несимметричные или искаженные шумами в различной степени профили имеют промежуточные оценки. На кривой лучевой скорости (рис. 17) эти оценки отражены кружками разного радиуса. Чем больше радиус кружка, тем выше качество профиля и, таким образом, точность лучевой скорости. На рис. 17 показаны только наблюдения в спокойном состоянии. Средняя точность лучевой скорости линии He II приблизительно в 2 раза ниже, чем He I, и составляет 50 км/с.

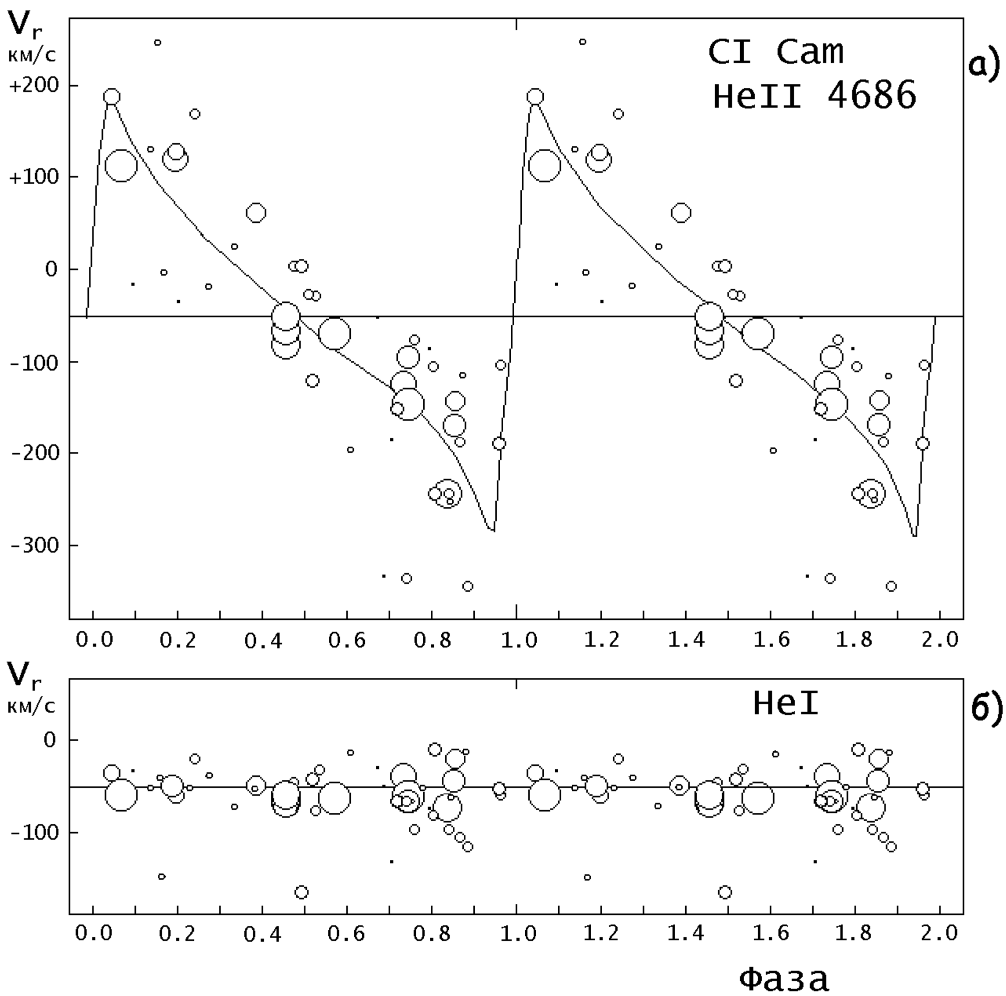

Рис. 17.

Лучевые скорости линии He II (а) и бленды He I (б) в зависимости от фазы орбитального периода 19.407 дня. Размер кружка зависит от качества измеряемого профиля линии HeII и точности измерения лучевой скорости (объяснение в тексте). Сплошной линией показана теоретическая кривая лучевой скорости с принятыми спектроскопическими элементами.

Кривая лучевой скорости CI Cam по линии He II 4686 Å (рис. 17а) имеет пилообразную форму, что свидетельствует об эллиптической орбите и о том, что прохождение периастра этой орбиты наступает вблизи нижнего соединения источника эмиссии He II (долгота восходящего узла орбиты $\omega \approx 270^o$). Такая интерпретация кривой лучевых скоростей сомнений не вызывает: у CI Cam реализуется вариант "C" из учебника Мартынова (1971), рис. 88, причем по форме кривой видно, что эксцентриситет орбиты компактного компонента CI Cam очень близок к значению 0.6, показанному в этом варианте.

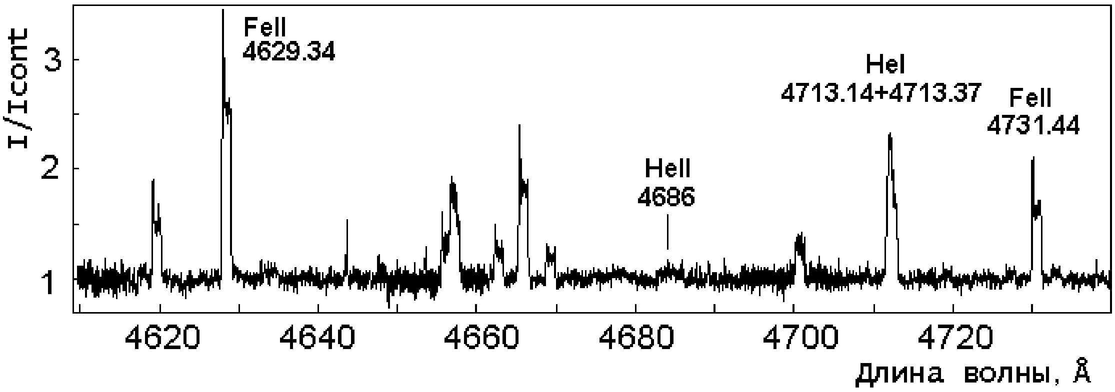

Рис. 18.

Спектр высокого разрешения (БТА/NES) в районе эмиссии He II $\lambda 4686$ Å. Отмечены опорные ветровые линии FeII для определения точных относительных скоростей.

Скорости линии He II, измеренные во вспышке, не зависят от орбитальной фазы и близки к –100 км/с.

Численные данные по лучевым скоростям и эквивалентным ширинам линий He II и He I приведены в табл. 4. В 1–м столбце табл. 4 даны юлианские даты (гелиоцентрические), во 2-м – фазы периода 19.4 дня, в 3-м – лучевые скорости эмиссии He II, в 4-м – лучевые скорости эмиссии He I, в 5-м – оценка качества профиля He II, в 6-м и 7-м — эквивалентные ширины эмиссии He II и He I, соответственно.

Таблица 4. Лучевые скорости и эквивалентные ширины линий HeII λ4686 Å и HeI λ4713 Å

JD hel. 24...	Фаза	V_r HeII	V_r HeI	Q	EW HeII	EW HeI
50908.260	0.490	-93	-85	10	-33.27	-17.11
50909.190	0.538	-116	-81	10	-38.82	-20.15
50910.200	0.590	-106	-106	10	-47.24	-22.42
50923.250	0.262	-59	-74	10	-4.74	-1.27
50950.307	0.656	-86	-79	10	-1.59	-1.35
51150.338	0.964	-104	-59	3	-0.53	-1.80
51204.333	0.746	-96	-66	7	-0.28	-1.94
51399.525	0.804	-106	-81	3	-0.19	-1.56
51400.510	0.855	-143	-21	6	-0.28	-2.05
51423.566	0.043	187	-36	5	-0.43	-1.03
51424.551	0.094	-16	-33	2	-0.31	-2.40
51426.582	0.198	128	-59	5	-0.60	-2.27
51464.542	0.154	247	-41	1	-0.37	-2.16
51465.434	0.200	-34	-51	2	-0.28	-1.10
51485.653	0.242	169	-21	3	-0.16	-1.68
51488.447	0.386	61	-50	6	-0.33	-1.50
51514.288	0.718	-151	-66	4	-0.23	-1.35
51844.500	0.733	-124	-40	8	-0.32	-1.18
51864.448	0.761	-76	-98	3	-0.31	-1.35
51885.319	0.836	-244	-74	9	-	-
52176.467	0.839	-244	-97	3	-0.52	-1.40
52177.402	0.887	-344	-116	3	-0.45	-1.11
52192.586	0.669	-51	-29	2	-0.20	-1.40
52293.428	0.866	-188	-106	3	-0.80	-1.64
52299.268	0.167	-4	-149	1	-0.33	-1.23
52300.409	0.225	-	-51	0	0.00	-2.12
52310.470	0.744	-146	-62	10	-1.04	-1.35
52327.251	0.609	-196	-16	1	-0.35	-1.55
52531.573	0.137	129	-51	1	-0.20	-1.5
52542.554	0.703	-184	-132	2	-0.13	-1.68
52598.190	0.570	-70	-63	10	-0.28	-1.41
52683.344	0.958	-190	-52	4	-0.30	-2.28
52906.476	0.455	-81	-65	9	-0.37	-2.14
52906.492	0.456	-66	-68	9	-0.38	-2.12
52906.508	0.457	-51	-60	9	-0.40	-2.22
52965.435	0.494	4	-166	4	-0.70	-2.80
53019.304	0.269	-19	-39	1	-0.05	-1.52
53023.278	0.474	4	-46	3	-0.18	-1.37
53054.190	0.067	113	-60	10	-0.33	-1.60
53082.346	0.518	-121	-43	4	-0.18	-1.83
53300.435	0.756	-	-66	0	0.00	-1.48
53301.449	0.808	-243	-11	4	-0.41	-1.90

Таблица 4 (продолжение)

JD hel. 24...	Фаза	V_r HeII	V_r HeI	Q	EW HeII	EW HeI
53357.286	0.685	-332	-49	2	-0.28	-1.82
53358.336	0.739	-336	-66	3	-0.15	-2.05
53359.354	0.792	-86	-74	2	-0.21	-2.00
53360.365	0.844	-251	-61	1	-0.20	-2.22
53389.253	0.332	24	-71	1	-0.11	-2.10
53390.279	0.385	-	-51	0	0.00	-1.92
53417.296	0.777	-	-51	0	0.00	-2.41
53419.239	0.878	-114	-14	1	-0.27	-2.92
53451.245	0.527	-29	-77	3	-0.33	-2.73
53593.513	0.856	-171	-51	7	-0.49	-1.40

Таблица 5. Спектроскопические элементы CI Cam

$Sp.$	B4 III-V[e]
P_{orb}	19.407 $\pm$0.020 дня
K_x	230 $\pm$50 км/с
$K_{B[e]}$	$<$ 5 км/с
e	0.62$\pm$0.07
ω	$\approx 270^o$
T_0	JD 2452199.0
$a \cdot sin(i)$	$48 \cdot 10^6$ км
$f_x(M)$	12 $M_\odot$

Методом, описанным в книге Миннарта (1971), мы определили приблизительные спектроскопические элементы орбиты (табл. 5). Полуамплитуда кривой лучевых скоростей K_x = 230 $\pm$50 км/с. Наилучшим образом представляющая наблюдения модельная кривая лучевых скоростей, нанесенная сплошной линией на рис. 17 а, дает эксцентриситет орбиты 0.62. Большая полуось орбиты $a \cdot sin(i) \approx 69$ $R_\odot$. При этом высота периастра над центром главного компонента – B[e]-звезды составляет

$h \cdot sin(i) \approx 22$ R$_\odot$. Параметр h ограничивает оценку радиуса B[e]-звезды. Так как радиусы сверхгигантов составляют 34–46 R$_\odot$ (Страйжис, 1982), главный компонент CI Cam может быть сверхгигантом лишь в случае малого наклонения орбиты, $i < 35^o$, и это следует только из условия, что орбита должна проходить над его поверхностью. Радиус звезды класса B4 III-V может быть в пределах 3.6–5.9R$_\odot$. Так что определенный нами спектральный класс звезды не противоречит орбитальным элементам ни при каких углах наклонения орбиты.

Момент нижнего соединения источника эмиссии He II JD 2452199.0 $\pm 0^d.2$. Фазы кривой блеска на рис. 15 (стр.66) вычислены относительно этого момента, и фаза нижнего соединения отмечена на этом рисунке как T_0. Как видно, фаза максимума блеска наступает через 0.09 P (1.75 $\pm 0^d.63$ дня) после нижнего соединения – фактически при достижении максимальной скорости удаления объекта, движущегося по орбите. (Заметим, что пик рентгеновского излучения во вспышке приходится на орбитальную фазу $0^p.30$, и что в пике вспышки 1998 г. интенсивность эмиссии He II 4686 Å увеличилась в 300 раз.)

Причина малоамплитудной орбитальной переменности блеска пока не ясна, но очевидно, что повышенная яркость системы наблюдается не точно в периастре, а через некоторое время после сближения компактного объекта с B-звездой. При сближении плотность звездного ветра и скорость движения компактного компонента увеличиваются. Компактный компонент окружен аккреционным диском (который излучает в линии He II), и это могло бы привести к изменениям блеска системы. Звездный ветер в системе CI Cam не сферически симметричен, и его медленный компонент концентрируется к экваториальной плоскости B-звезды. Модели профилей в оптически тонких линиях, которые формируются "дискообразным ветром", рассчитанные в работе Зикграфа (2003), при наклонениях оси вращения звезды 45–60^o напоминают профили "ветровых" линий CI Cam, которые имеют трехпиковую структуру (Мирошниченко и др., 2002). Связь такой структуры с околозвездным диском уже обсуждалась Мирошниченко и др. (2002). Заметным отличием реальных профилей от модельных является то, что красный пик заметно слабее голубого, но это отличие может быть объяснено как раз внутренним поглощением околозвездного вещества и частичным перекрытием "дискообразного ветра" самой B-звездой. По нашему мнению рассогласование фаз фотометрической кривой и кривой лучевых скоростей можно объяснить тем, что наибольшая яркость системы наблюдается в момент прохождения компактным компонентом экваториальной плоскости B-звезды, где взаимодействие между ее плотным экваториальным ветром и компактным компонентом должно быть максимальным. А этот момент может и не совпадать с моментом прохождения периастра из-за несовпадения оси орбиты и оси вращения звезды.

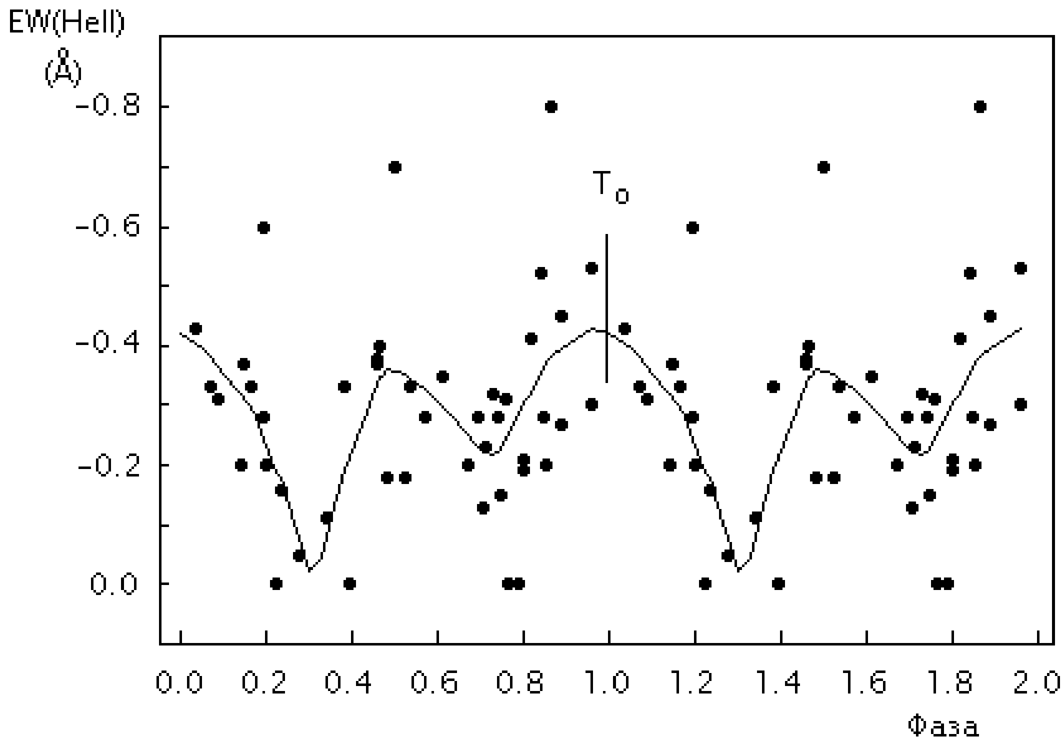

Рис. 19.

Фазовая зависимость эквивалентной ширины линии He II λ4686 Å. Сплошная линия - сглаженная усредненная методом скользящего среднего зависимость. T_0 - спектроскопический момент нижнего соединения источника эмиссии He II. Эквивалентная ширина линии определена с точностью не хуже 50%.

Из фазовой зависимости эквивалентной ширины эмиссии HeII следует, что один из локальных максимумов этого параметра наблюдается около момента T_0. Зависимость имеет форму "двойной волны" с двумя локальными минимумами около $\phi = \pm 0^p.25$ (рис. 19). Около фаз минимумов получены и те спектры, в которых нет следов эмиссии He II. Эта зависимость имеет большой разброс, и неясно, насколько статистически значимыми являются описанные детали. Поэтому, прежде чем искать объяснение зависимости, следует уточнить ее большим количеством наблюдений. Один вывод из фазовой зависимости эквивалентной ширины линии He II очевиден: исчезновение линий не связано с затмением компактного компонента B-звездой, и такого затмения в ожидаемой фазе не наблюдается.

Отсутствие доплеровских смещений сильных линий (H, He I, Fe II), превышающих несколько км/с, является надежным наблюдательным фактом. "Ветровые" линии B-звезды должны как-то отражать ее движение по орбите. Это может означать, что масса компактного компонента в системе CI Cam в 46 раз меньше массы главного компонента – B[e] звезды (из соотношения $K_{B[e]}/K_x = M_x/M_{B[e]}$ следует $q = K_{B[e]}/K_x > 230/5$). Скорость экваториального ветра у CI Cam, измеренная по профилям линий железа, всего 32 км/с (Робинсон и др., 2002). В то же время, структура этих профилей в спокойном состоянии, как показывают спектры высокого разрешения, очень стабильна. Тот факт, что движение компактного компонента не нарушает структуру столь медленного звездного ветра, также может свидетельствовать о малой массе компонента. Известно, что функция масс спутника в двойной системе является абсолютным нижним пределом массы главного компонента (Черепащук, 2003). Использовались формулы для вычисления функции масс, взятые из работы Черепащука (2001). Функция масс компактного компонента CI Cam $f_x(M) = 12M_{\odot}$, следовательно, является *нижним пределом* массы B[e]-звезды. В настоящей работе по бальмеровским абсорционным линиям мы установили, что главным компонентом системы CI Cam является звезда спектрального класса B4 III–V. Масса такой звезды ожидается не более 7 солнечных, а радиус не более 6 солнечных. Так что фотосферный спектр звезды противоречит динамической оценке ее массы. Это противоречие, по нашему мнению, означает, что B-звезда в системе CI Cam не является нормальной звездой главной последовательности, а является далеко проэволюционировавшей звездой пониженной светимости. Очевидно, ее маломассивный компактный компонент в начальной точке эволюции имел большую массу, чем теперешний главный компонент. Он прошел свой путь эволюции до компактного состояния с потерей почти всей своей массы, которая частично была передана наблюдаемой теперь B[e]-звезде.

Наши наблюдения несут информацию и о природе компактного компонента. Так как доплеровские смещения главного компонента системы, измеренные по его ветровым линиям с помощью высокодисперсных спектров, явно не превышают 10 км/с, из отношения полуамплитуд лучевых скоростей можно сделать вывод (пока предварительный), что масса компактного компонента по крайней мере в 46 раз меньше массы главного компонента, при этом $M_x sin^3(i) < 0.26 M_\odot$. Это неравенство следует из уравнения (12) из работы Черепащука (2001). Отсюда следует, что при наклонении орбиты $i > 38^o$ масса компактного объекта ниже чандрасекаровского предела, и тогда компактный объект является белым карликом. При меньшем наклонении орбиты объект может быть нейтронной звездой. Источником слабой эмиссии He II, вероятно, является аккреционный диск вокруг компактного компонента.

Первые результаты определения фотометрического периода 19.4 дня были опубликованы нами на всероссийской конференции ВАК-2004 "Горизонты науки" в Москве, а также в Интернете на сайте http://jet.sao.ru/~bars. Первое сообщение об открытии орбитального периода 19.4 дня содержится в "Astronomer's Telegram" (Барсукова и др., 2005а). Спектральные наблюдения 19-дневного периода и кривые блеска и лучевых скоростей опубликованы на конференции "Звезды с B[e]-феноменом" в Нидерландах на о. Влиеланд (Барсукова и др., 2005б). 19-дневный период CI Cam был подтвержден на этой конференции фотометрическими наблюдениями в докладе С. Кларка. Подробная статья по семилетним спектральным наблюдениям CI Cam опубликована в "Астрономическом журнале" (Барсукова и др., 2006а).

Рентгеновские наблюдения во вспышке и в спокойном состоянии (Орландини и др., 2000, Ишида и др., 2004) также свидетельствуют, что вторичным компонентом в системе CI Cam является белый карлик, а вспышка 1998 г. – ядерный взрыв накопившегося на его поверхности в результате аккреции водорода. Гипотеза о белом карлике в литературе обосновывается следующими аргументами (Орландини и др., 2000). (1) Двухтемпературный тепловой спектр рентгеновского излучения во вспышке и продолжительность вспышки около недели, согласующиеся с расчетами Ибена (1982) ядерного взрыва на поверхности горячего белого карлика массой $\approx 1\ M_{\odot}$. (2) Отсутствие быстрой переменности (в рентгеновских лучах и в оптическом диапазоне). (3) Наблюдение в радиолучах расширяющейся оболочки, объясняемой выбросом слоев, богатых гелием и водородом, в результате термоядерного взрыва (хорошо подтверждается появлением пьедесталов линий H и He I во вспышке).

Приведем оценку мощности оптической вспышки CI Cam. Известно, что система поярчала во вспышке не менее, чем на $3^m V$. Для расстояния 1.5 кпк светимость CI Cam в спокойном состоянии примерно $1{\cdot}10^{37}$ эрг/с. Тогда вклад вспышки в оптике не менее 10^{38} эрг/с. Самые яркие быстрые новые в M31 имеют в пике вспышки болометрическую светимость $4 \cdot 10^{38}$ эрг/с. Таким образом, энергетика вспышки CI Cam в оптике близка к энергетике классических новых.

5. Основные выводы исследования CI Cam

1) Обнаружена связь между амплитудой изменения потоков эмиссионных линий в спектре CI Cam во вспышке и потенциалами возбуждения этих линий.

2) Во вспышке обнаружен выброс газа со скоростью 1200 км/с.

3) Найдена быстрая переменность потоков излучения гелиевых и неко-

торых линий железа, по-видимому, связанная с изменениями рентгеновского потока в спокойном состоянии.

4) Обнаружено запаздывание вспышки запрещенной линии [N II] $\lambda5755$Å на 210 $\pm$20 дней относительно пика вспышки в оптическом, рентгеновском и радио диапазонах.

5) В линиях водорода и в некоторых линиях FeII обнаружено повторное поярчание с максимумом, наступившем через 500 дней после пика вспышки, – реакция среды на вспышку, а затем в течение 4-х лет структура околозвездной оболочки стабилизировалась.

6) Определена орбита компактного компонента в системе CI Cam с периодом 19.41 $\pm$0.02 дня с эксцентриситетом 0.62. На кривой блеска наблюдается малоамплитудная волна с орбитальным периодом. Сделана динамическая оценка массы для B[e]-звезды в системе CI Cam $M(B[e]) > 12M_{\odot}$.

7) По абсорбционным водородным линиям классифицирован главный компонент CI Cam как звезда спектрального класса B4 III-V. Спектроскопически определяемое расстояние до звезды B4 III-V составляет 1.1–1.9 кпк.