

УДК 524.338.5-56

ПУЛЬСАЦИИ КОМПОНЕНТА КЛАССА В[e] В СИСТЕМЕ СИ ЖИРАФА

© 2009 В. П. Горанский¹, Е. А. Барсукова²

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ, Университетский пр-т, 13, Москва, 119992, Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 1 февраля 2008 г.; принята в печать 25 февраля 2008 г.

СИ Cam — известная В[e]-звезда и рентгеновский транзиент, которая в 1998 г. испытала мощную вспышку во всех диапазонах электромагнитных волн. В результате интенсивного фотометрического мониторинга в полосе V установлена причина быстрой переменности СИ Cam на шкале нескольких часов — пульсации компонента класса В4 III-V. Высококачественная ПЗС-фотометрия проводилась на 50-см менисковом телескопе системы Максутова Крымской станции ГАИШ МГУ в декабре 2006 г. в спокойном состоянии звезды. Методы анализа — дискретное Фурье-преобразование и моделирование кривой блеска. В амплитудном спектре звезды доминируют два пика, соответствующие периодам 0.41521 и 0.26647 дня, отношение которых близко к 3:2. Возбуждены по крайней мере две моды пульсаций. Есть признаки резонанса между модами.

Ключевые слова: *звезды - переменные и пекулярные*

1. ВВЕДЕНИЕ

СИ Cam (MWC 84, KPD 0415+5552, LS V +55°16, IRAS 04156+5552, XTE J0421+560) — В[e]-звезда, которая стала известной благодаря мощной вспышке во всех диапазонах длин волн от радио до рентгена в апреле 1998 г. Координаты звезды на эпоху 2000.0: $4^h 19^m 42^s.11$, $+55^\circ 59' 57''$. В[e]-звезды — это звезды класса В с сильными бальмеровскими эмиссионными линиями, разрешенными эмиссионными линиями низкого возбуждения предпочтительно металлов низкой ионизации в оптическом спектре (например, Fe II), запрещенными линиями [Fe II] и [O I] в оптическом спектре, а также с сильными инфракрасными избытками в ближнем или среднем инфракрасном диапазоне из-за горячей околозвездной пыли [1]. Эти спектральные особенности присущи разным классам звезд: Ae/Be-звездам Хербига, В-сверхгигантам, компактным планетарным туманностям, симбиотическим звездам и потому описываются как В[e]-феномен. Наиболее яркие В[e]-сверхгиганты неотличимы по своим фотометрическим и спектральным характеристикам от LBV — самых ярких голубых переменных звезд в галактиках. Спектральный класс яркого компонента СИ Cam — В4 III-V [2, 3].

Рентгеновская вспышка предполагает присутствие в системе компактного компонента. Исследователи СИ Cam в рентгеновском диапазоне приводят доказательства того, что компактным компо-

нентом является белый карлик, а вспышка 1998 г. “может быть связана с термоядерным взрывом на поверхности горячего белого карлика массой $1 M_{\odot}$ ” [4]. Так что “вспышка СИ Cam является вспышкой новой звезды” [5]. После вспышки у СИ Cam наблюдалась расширяющаяся с замедлением биполярная облачная радиоструктура [6], имеющая форму оболочки с поярчением к краю. Структура напоминала ударную волну, проходящую по плотной околозвездной среде. Многие наблюдательные факты (см., например, [2]) свидетельствуют в пользу механизма классической новой, существенное отличие от которого состоит в том, что донор является массивной горячей звездой, аккреция вещества на белый карлик происходит из плотной околозвездной оболочки и звездного ветра, а продукты взрыва распространяются не в вакууме, а формируют ударную волну в плотной оболочке.

В работе [7] сообщалось об открытии компактного компонента СИ Cam по доплеровскому движению слабой эмиссионной линии HeII 4686Å. В работах [2, 3] определены орбитальные элементы компактного компонента: орбитальный период $19^d 407$; эксцентриситет орбиты 0.62; полуамплитуда лучевой скорости 230 км/с; функция масс главного компонента $12 M_{\odot}$. Величина функции масс является нижним пределом оценки массы, так что главный компонент системы — массивная звезда. Результаты спектроскопии также свидетельствуют в пользу предположения о белом карлике как о компактном компоненте системы.

Новое интригующее открытие сделано в работе [8] по спектроскопическим наблюдениям высокого разрешения — ускорение в ветровых эмиссионных линиях. Узкие разрешенные линии FeII, формирующиеся в плотной области оболочки звезды, которые ранее считались стационарными, медленно и постепенно смещаются. За 7.9 года наблюдений лучевая скорость изменилась от -42.3 до -55.7 км/с. При этом форма профилей и полуширина линий ($\text{FWHM} = 75$ км/с) не меняются. Во вспышке звезды интенсивности этих линий резко увеличились синхронно с рентгеновским и оптическим излучением. Удивительно то, что точно так же смещается запрещенная эмиссионная линия [NII] 5754.59\AA , которая формируется в наиболее удаленных, разреженных областях оболочки. В течение вспышки интенсивность этой эмиссии не менялась и соответствовала спокойному уровню. Но через 20 дней после рентгеновского максимума она начала возрастать, а через 210 (± 20) дней достигла своего максимума [2]. Расстояние от звезды до области формирования этой линии оценивается в 150–200 астрономических единиц. Трудно представить регулярное ускорение такой области разреженного газа. Возможное объяснение этого феномена состоит в том, что главный компонент — массивная В[e]-звезда вместе со своим спутником — белым карликом и околосредней оболочкой движутся вокруг третьего массивного компонента неизвестной природы с периодом, превышающим 40 лет, что вызывает доплеровское смещение линий. Остается открытым вопрос о том, какой вклад вносит третий компонент в суммарный блеск системы. До сих пор не ясно также, какой вклад вносит главный компонент.

2. ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ СИ Cam

Кроме вспышки амплитудой не менее 3^m5 в фильтре R, у СИ Cam наблюдается переменность в спокойном состоянии с амплитудой до 0^m30 в полосе V. По наблюдениям, полученным еще до вспышки [9], в работе [10] был определен период 11^d7 с амплитудами периодической составляющей 0^m16 в фильтре В, 0^m13 в V и 0^m10 в R. После вспышки наблюдались медленные квазициклические изменения среднего блеска с характерным временем $1200\text{--}2000^d$ [2, 3, 11]. ПЗС-наблюдения в сезон 1999 г. в спокойном состоянии [12] не подтвердили 11-дневный период и показали неправильный характер переменности блеска с амплитудой 0^m2 , медленный тренд и мини-вспышку. Затем в кривой блеска СИ Cam в фильтре V был обнаружен периодический компонент с орбитальным периодом 19^d407 и

с полной амплитудой 0^m03 [2, 3, 7]. Этот период подтверждается также по независимому ряду фотометрических наблюдений [13]. В работе [14] найдены также изменения блеска с периодом 372 ± 15^d , однако, вероятно, этот период связан с сезонной разрывностью наблюдательного ряда с периодом 365^d .

Подробное исследование фотометрической активности СИ Cam содержится в работах [15, 16]. По результатам многоцветных фотометрических наблюдений выявлен переменный вклад различных спектральных компонентов и исследовано влияние очень сильной эмиссии H_α и других эмиссий на показатели цвета. Оптические изменения очень малой амплитуды (порядка 0^m02 за ночь) зарегистрированы в этих работах в течение 4 ночей. Они имели “форму горбов на временной шкале около часа, но без когерентного компонента” [15] (очевидно, здесь констатируется сходство со сверхгорбами катаклизмических переменных и отсутствие стабильного по фазе периодического колебания блеска). Отмечается сходство поведения СИ Cam и микроквара LS 5039. Сделан вывод, что изменения яркости происходят в окрестности компактного объекта.

В 2005–2006 годах мы провели фотометрический мониторинг СИ Cam высокой точности с продолжительностью слежения от 1 до 13 часов в ночь. Максимальная амплитуда переменности в пределах ночи достигала 0^m07 с характерным временем в несколько часов. Как оказалось, эта переменность не похожа на фликеринг или сверхгорбы катаклизмических переменных, быстрою переменность микрокваров или других компактных объектов, а более напоминает пульсации звезд спектрального класса В.

3. НАБЛЮДЕНИЯ

Регулярные фотометрические наблюдения СИ Cam проводятся в ГАИШ со времени вспышки 1998 года Н.В. Метловой и сопровождаются спектральными наблюдениями среднего разрешения в САО РАН (Е.А. Барсукова, Н.В. Борисов, А.Н. Буренков). Результаты наблюдений изложены в работах [2, 3], текущие фотометрические кривые блеска и показателей цвета в системе UBVR, включая и оригинальные наблюдения настоящего исследования, можно просмотреть в Интернете с Java-совместимым браузером по адресу <http://jet.sao.ru/~goray/cicam.htm>, а таблицы наблюдений (полная коллекция, включая ряды настоящего мониторинга) содержатся в файле <http://jet.sao.ru/~goray/cicam.all>. Столбцы в таблице соответствуют JD hel.—2400000, V, B, U, R, а данные мониторинга помечены индексом Pi.

Фотометрический ПЗС-мониторинг CI Cam высокой точности проводился нами на 50-см меннискосом телескопе АЗТ-5 Крымской станции ГА-ИШ МГУ в 2005 и 2006 г.г. Использовалась ПЗС-матрица MEADE Pictor-416 с фильтром системы V, установленная в прямом фокусе телескопа. Телескоп АЗТ-5 рассчитан для фотографических наблюдений с фильтрами системы UBV и для бесщелевой призмной спектроскопии с полем зрения диаметром 2°. Фокусное расстояние системы 2000 мм, масштаб изображения 103"/мм. ПЗС была установлена в прямом фокусе системы на оптической оси. Размер кадра ПЗС в такой конфигурации составил 15' × 10'. Экспозиции звездных кадров составляли 2–5 минут в зависимости от прозрачности неба и высоты объекта над горизонтом. Экспозиция подбиралась таким образом, чтобы сигнал от центральных пикселей изображения CI Cam был на уровне середины динамического диапазона матрицы, то есть около 30000 ADU. Телескоп работал в автоматическом режиме без гидирования. Изображения звезд очень медленно, в шкале часов смещались по ПЗС, и 2–3 раза в ночь кадр центрировался вручную. Для калибровки наблюдений использовались кадры нулевого уровня освещенности с нулевой экспозицией (байеса), темноты и плоского поля. Кадры плоского поля сняты в каждую ночь по сумеречному небу с неподвижным телескопом. Экспозиции плоского поля подбирались так, чтобы средний отсчет был также на уровне середины динамического диапазона матрицы. Те кадры, на которых обнаруживались треки звезд, были отбракованы. Обработка наблюдений производилась с помощью программы В. П. Горанского WinFITS апертурным методом с автоматической коррекцией профилей изображений звезд за дефекты — горячие пиксели и следы космических частиц.

Первые ряды мониторинга продолжительностью до 1.7 часа были получены с 31 июля по 14 августа 2005 г. (10 ночей, 228 наблюдений) и с 10 по 31 августа 2006 г. (20 ночей, 423 наблюдения). Эти наблюдения показали переменность на шкале около часа с полной амплитудой 0^m04 внутри ночи и переменность с амплитудой до 0^m12 от ночи к ночи. Со 2 по 26 декабря 2006 г. мы провели более длительный мониторинг в период видимости объекта всю ночь, используя для этого все время телескопа и все возможности ясной погоды. Всего было 18 ночей, в которые было выполнено 2366 наблюдений. Ясной погоды было достаточно много, и отдельные ряды мониторинга за ночь по длительности достигали 13.2 часа. Полная амплитуда изменений блеска составила 0^m16, а максимальная амплитуда изменений блеска за ночь составила 0^m07.

Первичная обработка была выполнена с привязкой к звезде сравнения GSC 3723.104 ($V = 12^m38$). Дисперсия кривой блеска CI Cam в разные ночи менялась в пределах $\sigma = 0^m0017 - 0^m0044$, среднее значение $\langle \sigma \rangle$ по всем ночам составило 0^m0032. Дисперсия кривой блеска определялась после вычитания ночного тренда, определенного методом скользящего среднего. Оценки дисперсии характеризуют точность наших наблюдений. На кривой блеска CI Cam кроме медленных изменений блеска на шкале в несколько часов были видны быстрые колебания с периодом 0^d05063180 с полной амплитудой 0^m0040. Эти же колебания мы выявили и в контрольных звездах. GSC 3723.104 (= C2 [16]) оказалась переменной звездой типа δ Sct [17]. В ее кривой блеска удалось выявить 6 периодических компонентов с амплитудами большими, чем 0^m0015. Затем мы измерили заново все кадры (3017 шт.) с новой, более слабой звездой сравнения GSC 3723.392 ($V = 12^m83$) и с 5 контрольными звездами, 3 из которых оказались переменными [17]. Однако по двум оставшимся контрольным звездам нам удалось установить постоянство блеска новой звезды сравнения. Она в среднем на 1^m2 слабее переменной звезды. При измерениях со слабой звездой сравнения дисперсия немного возросла, ее величины в разные ночи менялись в пределах $\sigma = 0^m0019 - 0^m0059$, а средняя величина по всем ночам составила $\langle \sigma \rangle = 0^m0039$. В окончательных таблицах наблюдений учтена также систематическая поправка $\Delta V = 0^m12$ для приведения в однородную систему данных Н. В. Метловой, полученных одновременно на фотоэлектрическом UBV-фотометре В. М. Лютого.

Кривые блеска за все три сезона показаны на Рис. 1. Для третьего сезона мы приводим наблюдения контрольной звезды GSC 3723.80 ($V = 12^m40$). Всего в 3-й сезон у нас имеется 2026 наблюдений этой звезды (звезда была на краю кадров, а на 340 кадрах оказалась за краем). Дисперсия наблюдений этой звезды постоянного блеска составила $\sigma = 0^m0058$.

На Рис. 1 расчетные моменты максимумов блеска орбитального периода CI Cam отмечены меткой "Мах". Как правило, в этом положении отмечаются локальные максимумы блеска. Средний уровень блеска значительно менялся от сезона к сезону. В декабре 2006 г. между JD 2454073 и 2454076 произошло резкое ослабление среднего уровня блеска на 0^m10. В последующие 20 дней происходил постепенный выход из этого минимума на прежний уровень, и при этом наблюдались колебания уровня блеска. Это и другие подобные ослабления блеска наблюдались также Н.В. Метловой.

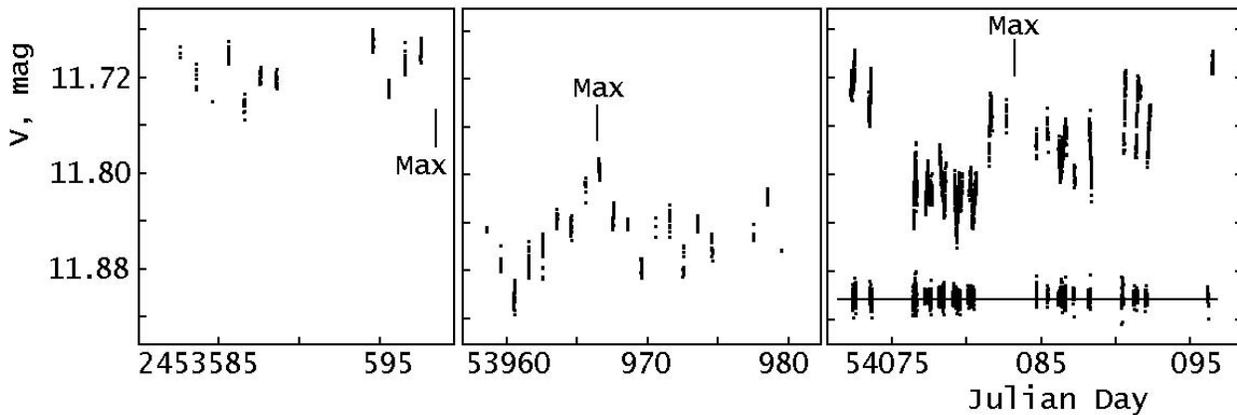


Рис. 1. Сезонные кривые блеска CI Sam 2005–2006 годов (слева — в августе 2005 г., в середине — в августе 2006 г., справа — в декабре 2006 г.). Для декабрьского сезона 2006 г. внизу показана кривая блеска контрольной звезды GSC 3723.80 (сдвиг вдоль шкалы звездной величины произвольный).

Такие спады и медленная переменность усложняют анализ быстрой переменности, наблюдающейся внутри ночи. Принадлежность быстрых изменений блеска внутри ночи именно CI Sam не вызывает сомнений, так как они не видны у контрольной звезды. Их реальность также не вызывает сомнений, так как их максимальная амплитуда в 12 раз превышает точность измерений более слабой контрольной звезды и в 18 раз превышает точность измерений самой переменной звезды.

4. МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для частотного анализа наблюдений использовалось дискретное Фурье-преобразование для временных рядов с произвольным распределением наблюдений по времени [18] и программа В.П. Горанского EFFECT, реализующая этот метод. Сначала мы очистили этот ряд наблюдений от низкочастотного шума с частотами $f < 0.2$ цикла в сутки (с/d), связанного с медленными изменениями блеска, орбитой компактного компонента и описанным ранее спадом блеска. Использовался метод Фурье-разложения и процедура “отбеливания” (prewhitening). Под “отбеливанием” понимается вычитание из наблюдаемой кривой блеска сглаженной по фазам периодической волны (средней кривой блеска). Эти же процедуры и методы использовались для выделения из кривой блеска отдельных периодических компонентов. CI Sam имеет спектр с сильными эмиссионными линиями, и это усложняет корректный учет уравнения цвета инструментальной системы и вынос за атмосферу фотометрических величин, а также учет эффекта Форбса, который связан с выносом за атмосферу фотометрических величин звезд с различающимся распределением энергии в спектре. К тому же для учета эффекта Форбса и приведения наблюдений

из инструментальной системы в стандартную требуются многоцветные наблюдения, но наблюдения на АЗТ-5 проводились только в фильтре V. Поправки за эффект Форбса зависят от зенитного расстояния, на котором проводилось каждое наблюдение. Для его учета мы вычли из наблюдений периодический тренд с периодом, равным звездным суткам.

Для оценки значимости оставшихся в амплитудном спектре пиков был использован эмпирический метод Теребижа [19]. Метод основан на статистическом исследовании искусственных хаотических рядов, полученных путем перемешивания оригинальных рядов наблюдений, так что каждому моменту времени оригинального ряда ставится в соответствие случайное значение звездной величины, выбранное из этого же ряда. В результате вычисления амплитудного спектра хаотического ряда, при котором реализуется около миллиона случайных кривых блеска с произвольными периодами, вычисляется функция распределения параметра полуамплитуды. В программе предусмотрен анализ функции распределения, в результате которого производятся оценки уровней амплитудного спектра с частотой встречаемости пиков в 90, 99, 99.9 и 99.99%. На амплитудных спектрах реальных наблюдательных рядов звезды (Рис. 2) для сравнения эти уровни хаотического ряда нанесены горизонтальными прямыми линиями, а цифрами справа указана соответствующая им частота встречаемости. Эти уровни принято называть уровнями значимости пиков в амплитудном спектре.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Амплитудные спектры CI Sam в диапазоне периодов $1^d.0-0^d.05$, полученные в результате последовательного отбеливания периодических составляющих, соответствующих самым высоким пикам,

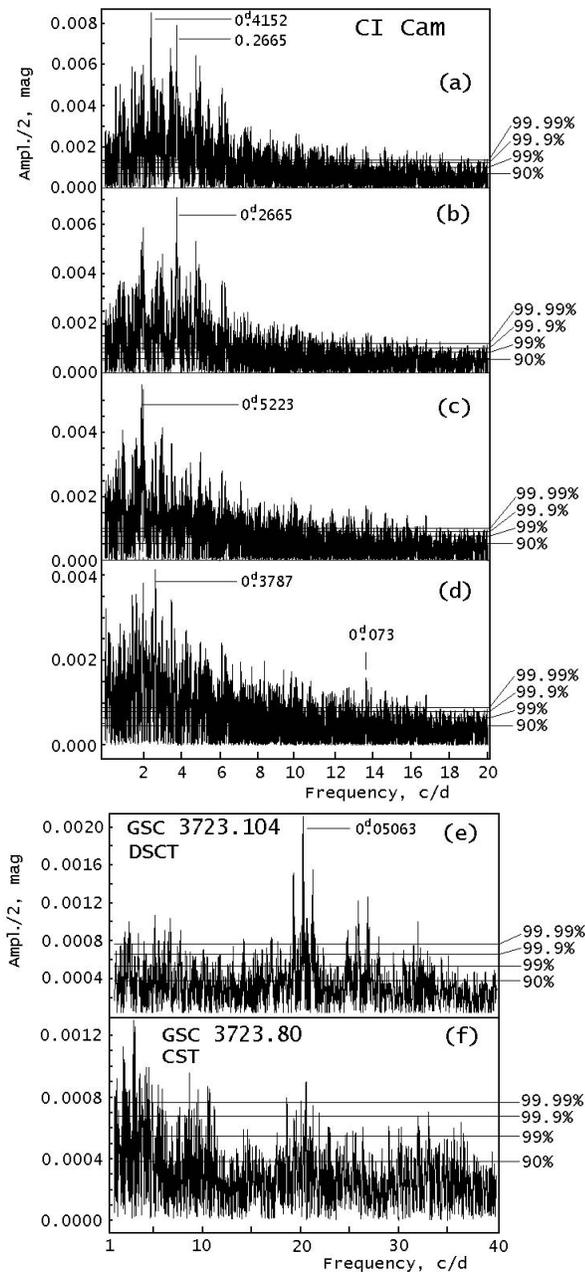


Рис. 2. Амплитудные спектры полного ряда наблюдений CI Cam. а) Спектр первоначального ряда, очищенный от низкочастотных компонентов. Последующие спектры (b-d) получены после "отбеливания" 1-й, 2-й и 3-й периодических составляющих кривой блеска. Уровни значимости отмечены горизонтальными линиями и цифрами справа. Для сравнения приведены спектр малоамплитудной переменной звезды типа δ Sct GSC 3723.104 (e) и спектр контрольной звезды постоянного блеска GSC 3723.80 (f).

показаны на Рис. 2 (a-d). Эти спектры получены по всем 3017 наблюдениям 2005–2006 годов. Каждый пик в спектре сопровождается двумя или более суточно-сопряженными компонентами, которые значительно подавлены, так как в наблюдениях содержатся суточные ряды продолжительностью

более 0.5 суток. Так что каждая волна в кривой блеска формирует гребенку пиков в амплитудном спектре, причем частоты этих пиков отличаются на единицу. После вычитания каждой волны из спектра мощности исчезает гребенка пиков. Мы выделили 6 основных волн из кривой блеска (приведены в Таблице 1), которые формируют "лес" пиков в диапазоне частот 1–7 с/d, при этом уровень остаточного шума в этом диапазоне остается значительным. В остаточном ряде после вычитания этих составляющих еще остаются неправильные колебания, разложение которых на малоамплитудные компоненты возможно. Доминируют же два периода $0^d.4152$ и $0^d.2665$, причем амплитуда 1-го пика превосходит амплитуду 2-го.

Отдельно проделаны вычисления для третьего сезона, в который входит 2366 наблюдений. Это наиболее продолжительный и однородный ряд, и отдельное его исследование представляет интерес.

Основные периодические компоненты этого ряда и их параметры показаны в Табл. 2. Здесь, как и в предыдущих расчетах, доминируют те же два периода $0^d.2667$ и $0^d.4153$, но на этот раз амплитуды пиков одинаковы. Эти два колебания стабильны по фазе. Эфемериды для волн пульсаций следующие:

$$Max\ hel. = 2454090.6388 + 0^d.41521E_1 \quad (1);$$

$$Max\ hel. = 2454090.6561 + 0^d.26647E_2 \quad (2),$$

где $Max\ hel.$ — нормальный гелиоцентрический момент максимума, а E_1 и E_2 — число эпох (колебаний), совершившихся от момента, приведенного в формуле, до момента на предсказываемую дату. Стабильность колебания с периодом $0^d.415$ можно иллюстрировать также тем, что при учете первых двух сезонов его амплитуда даже увеличивается.

Для сравнения мы приводим амплитудные спектры еще двух звезд из поля CI Cam: GSC 3723.104, пульсирующей переменной звезды типа δ Sct по 2366 наблюдениям 3-го сезона и GSC 3723.80, звезды постоянного блеска по 2026 наблюдениям 3-го сезона. Они подсчитаны в диапазоне периодов $1^d.0 - 0^d.025$. У переменной звезды гребенки пиков видны на более высоких частотах, 20–35 с/d (Рис. 2e). Причем уровень спектра в диапазоне, в котором проявляет активность CI Cam (1–7 с/d), на порядок ниже, чем уровень спектра CI Cam (Рис. 2f). Амплитуда доминирующего колебания GSC 3723.104 в 4 раза меньше, чем амплитуда каждого из двух доминирующих колебаний CI Cam. Причем средняя полная амплитуда этой волны GSC 3723.104 ($0^m.0040$) равна дисперсии этого ряда. Частотный анализ абсолютно надежно выделяет эту волну по столь большому числу наблюдений и дает величину периода с точностью в 7-м знаке. У CI Cam полная амплитуда быстрой переменности превышает дисперсию в 18

Таблица 1. Периодические составляющие, выделенные из полного двухлетнего ряда

Период, сут.	Точность, сут.	Частота, цикл/сут.	Полная амплитуда, зв. вел.
0.415214	0.000034	2.40840	0.020
0.266471	0.000014	3.75275	0.015
0.522317	0.000080	1.91455	0.012
0.378742	0.000055	2.64032	0.009
0.287579	0.000032	3.47731	0.006
0.704050	0.00019	1.42035	0.006
0.228356	0.000020	4.37913	0.006

Таблица 2. Периодические составляющие, выделенные из наблюдений третьего сезона

Период, сут.	Точность, сут.	Частота, цикл/сут.	Полная амплитуда, зв. вел.
0.4152	0.0007	2.408	0.019
0.2667	0.0003	3.750	0.017
0.5216	0.0017	1.917	0.008
0.2874	0.0007	3.479	0.007
0.2288	0.0004	4.370	0.005
0.3784	0.0012	2.643	0.005
0.3310	0.0009	3.021	0.004

раз, а каждая из 2-х основных составляющих эту переменность волн превышает дисперсию наблюдений в 5 раз. Уровень амплитудного спектра звезды постоянного блеска в диапазоне 1–7 с/d тоже почти на порядок ниже, чем у CI Cam. Важно, однако, заметить, что в этом диапазоне уровень пиков в спектрах малоамплитудной переменной звезды и постоянной звезды превышает предельные уровни пиков соответствующих хаотических рядов и доходит до 0^m0013 . Это означает, что в реальных наблюдениях присутствуют систематические тренды с характерными временами, соответствующими данному частотному диапазону, причем эти тренды имеют инструментальную природу или связаны с явлениями в земной атмосфере. Наблюдаемые пики амплитудного спектра рассматриваемых двух звезд являются Фурье-разложением этих трендов на гармонические составляющие. Таким образом, наша методика наблюдений накладывает предел для этого диапазона частот на обнаружение периодических составляющих по полной амплитуде,

равный 0^m0026 . Амплитуды периодических компонентов, приведенные в Табл. 1 и 2, превышают этот предел.

Графики фазовых кривых блеска для двух доминирующих колебаний CI Cam показаны на Рис. 3а и 4а. Для представления волны с периодом 0^d415 на Рис. 3а из исходного ряда наблюдений была вычтена волна с периодом 0^d266 . И наоборот, на Рис. 4а представлена волна с периодом 0^d266 , и при этом вычтена волна с периодом 0^d415 . Форма кривой блеска с периодом 0^d415 сильно асимметрична с горбом на нисходящей ветви в фазе $\phi = 0.35-0.40$, а кривая блеска с периодом 0^d266 , наоборот, более симметрична и близка к синусоиде. Это особенно заметно на средних кривых блеска, которые представлены на Рис. 5. На этом рисунке показаны все средние кривые блеска для 3-го сезона, параметры которых приведены в Табл. 2.

На Рис. 3б и 4б представлены также фазовые кривые блеска контрольной звезды GSC 3723.80,

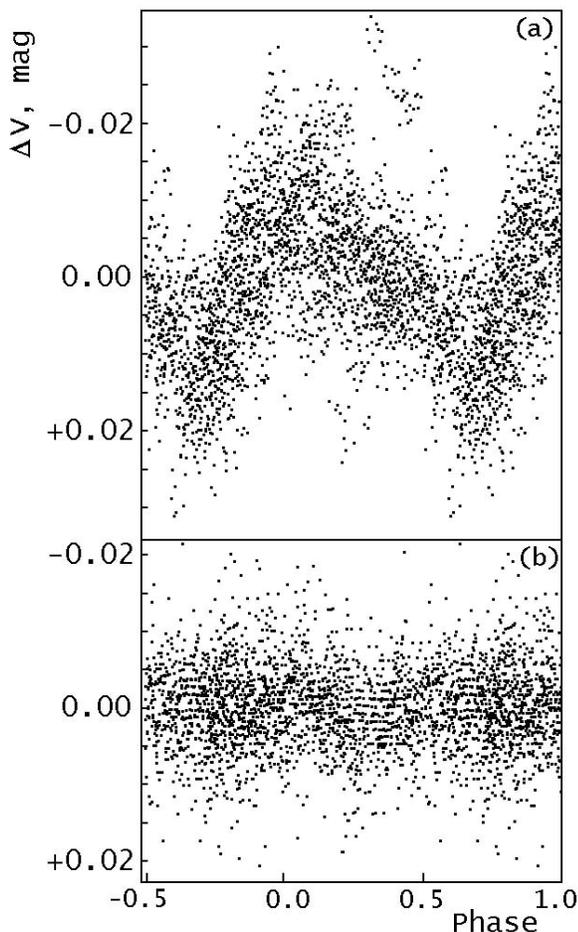


Рис. 3. а) Фазовая кривая блеска CI Cam для волны с периодом $0^{\text{d}}.415$. Ночь JD 2454085 выпадает из кривой блеска в среднем на $0^{\text{m}}.03$. б) Фазовая кривая блеска контрольной звезды GSC 3723.80. Для вычисления фаз использовались расчетные элементы (1).

вычисленные с теми же элементами, что и кривые блеска CI Cam. Очевидно, что у контрольной звезды эти колебания никак не проявляются.

Кроме отмеченных в Табл. 2 семи периодических компонентов с амплитудами выше $0^{\text{m}}.004$, возможно выделение из кривой блеска CI Cam и других компонентов с меньшими амплитудами. В кривой блеска остаточного ряда, полученного после вычитания 7 компонентов наибольшей амплитуды, есть слабые колебания различных частот. Так что возможно дальнейшее Фурье-разложение кривой блеска. А в амплитудном спектре окончательного ряда еще присутствует множество пиков, имеющих высокую значимость. В этом спектре можно выделить самую высокую частоту, соответствующую периоду $0^{\text{d}}.07334$ с полной амплитудой $0^{\text{m}}.002$. Средняя кривая блеска для этого самого короткого периода также приведена на Рис. 5. На Рис. 6 представлены наблюдаемые кривые блеска 3-го сезона (точки) и модель (сплошная линия),

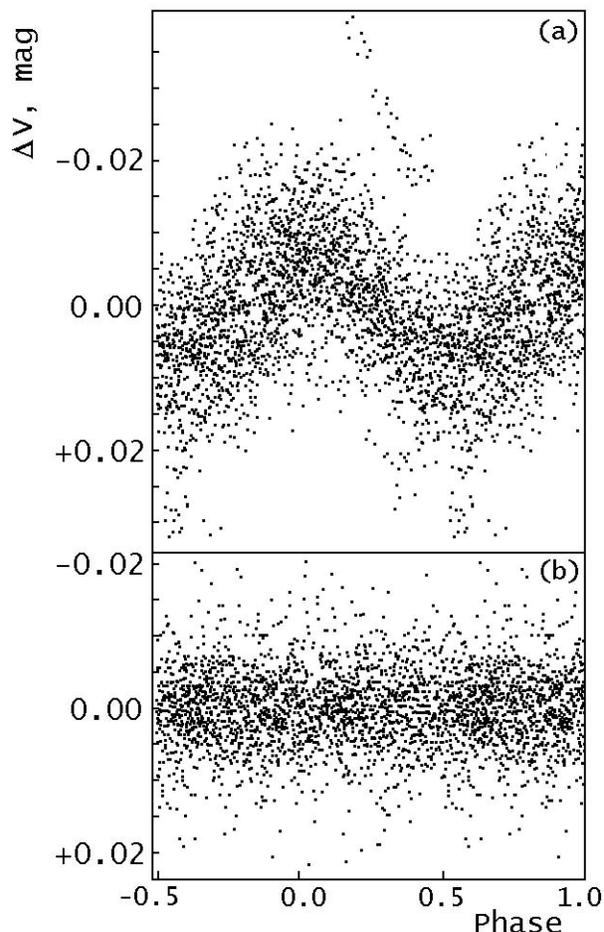


Рис. 4. а) Фазовая кривая блеска CI Cam для волны с периодом $0^{\text{d}}.266$. Ночь JD 2454085 выпадает из кривой блеска в среднем на $0^{\text{m}}.03$. б) Фазовая кривая блеска контрольной звезды GSC 3723.80. Для вычисления фаз использовались расчетные элементы (2).

представляющая сумму семи волн периодических составляющих, приведенных в Таблице 2 и показанных на Рис. 5 (за исключением самой короткопериодической волны $0^{\text{d}}.07334$). Видно, что модель удовлетворительно представляет наблюдения, за исключением ночи JD 2454085, в которую реальные точки расположены на $0^{\text{m}}.03$ выше модельной кривой блеска. Заметно также, что в даты JD 2454090 и 2454092, когда колебания достигли максимальной амплитуды $0^{\text{m}}.070$, модель плохо описывает наблюдения в экстремумах. Амплитуда модели в эти даты заметно меньше, чем наблюдаемая.

Мы проделали численные эксперименты с наблюдательными данными 3-го сезона для выяснения, насколько устойчиво найденное мультипериодическое решение для кривой блеска, и как оно зависит от метода очистки от медленных трендов и спада. Например, были вычислены средние звездные величины за ночь, и в наблюдения были

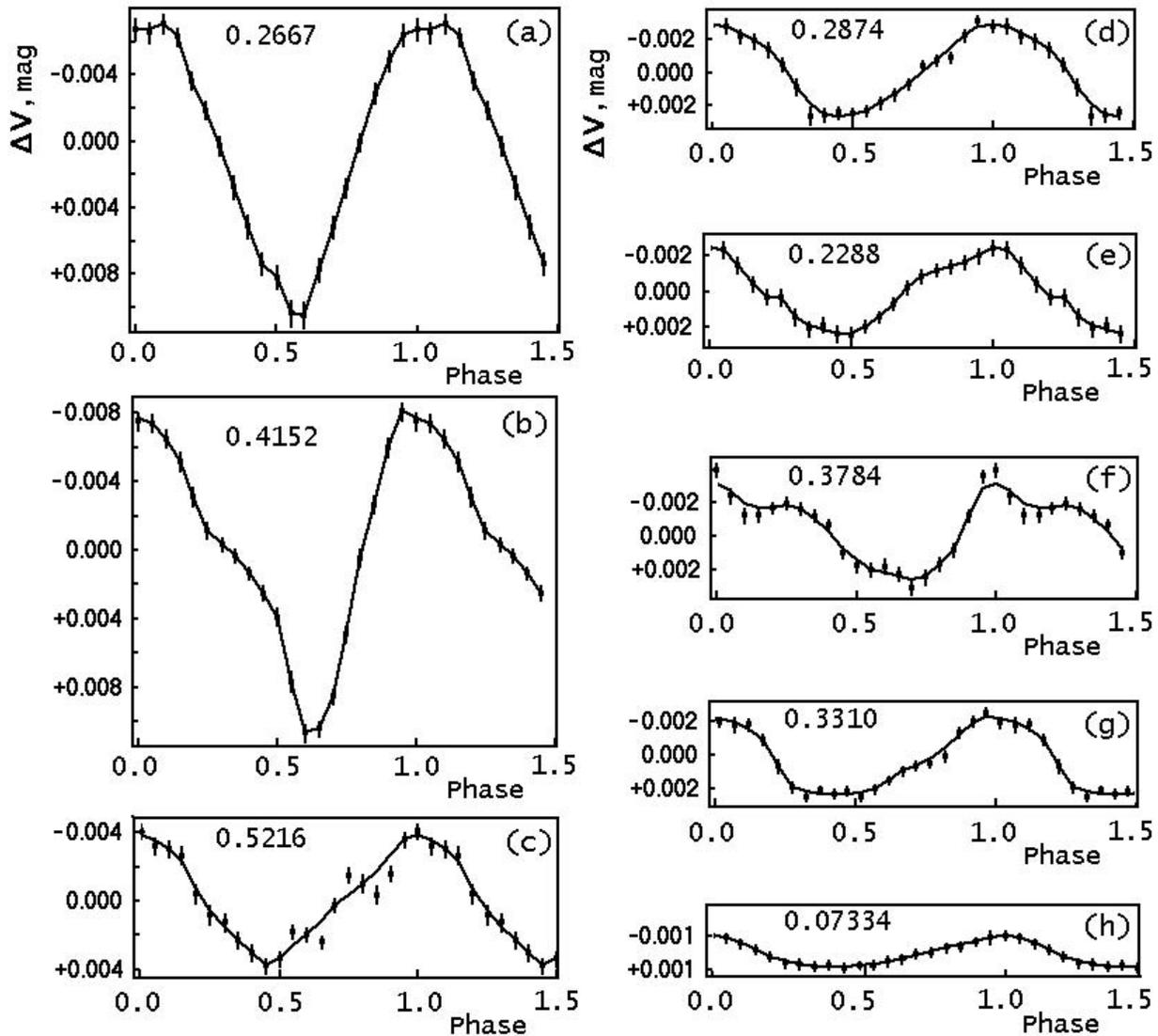


Рис. 5. Средние кривые блеска периодических составляющих для третьего сезона наблюдений, параметры которых представлены в Таблице 2. На графиках указаны периоды волн в сутках.

внесены поправки, такие, чтобы средние величины оказались на общем, нулевом уровне. Или, например, сложный тренд за сезон, видимый на экране компьютера как ряд точек, представлялся плавной непрерывной линией произвольно на глаз. Во всех случаях две волны с периодами 0^d2667 и 0^d4153 и с наибольшими амплитудами выделяются надежно, и их параметры и формы кривых блеска не зависят от способа обработки данных. Периоды 0^d5216 , 0^d2874 и 0^d3784 выявляются в другой последовательности, их амплитуды и форма кривых блеска зависят от представления данных. Другие волны в некоторых случаях не выявляются совсем.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанный феномен быстрой переменности СИ Сам мы объясняем мультипериодическими пульсациями В[e]-звезды. Отношение периодов двух колебаний с наибольшей амплитудой $0^d2667 : 0^d4153 = 0.642$ и близко к $2 : 3$. Они доминируют в амплитудном спектре. Период третьей волны, амплитуда которой значительно меньше двух основных волн, равен 0^d5216 и находится в отношении 1.956 (то есть близко к $2 : 1$) с периодом 0^d2667 второй волны. Фактически периоды 3-х наибольших по амплитуде волн связаны соотношением $2 : 3 : 4$. Форма кривой блеска третьей волны в отличие от всех остальных временами меняется, что заметно даже на усредненной кривой блеска на Рис. 5. Поэтому фазовую стабильность этого

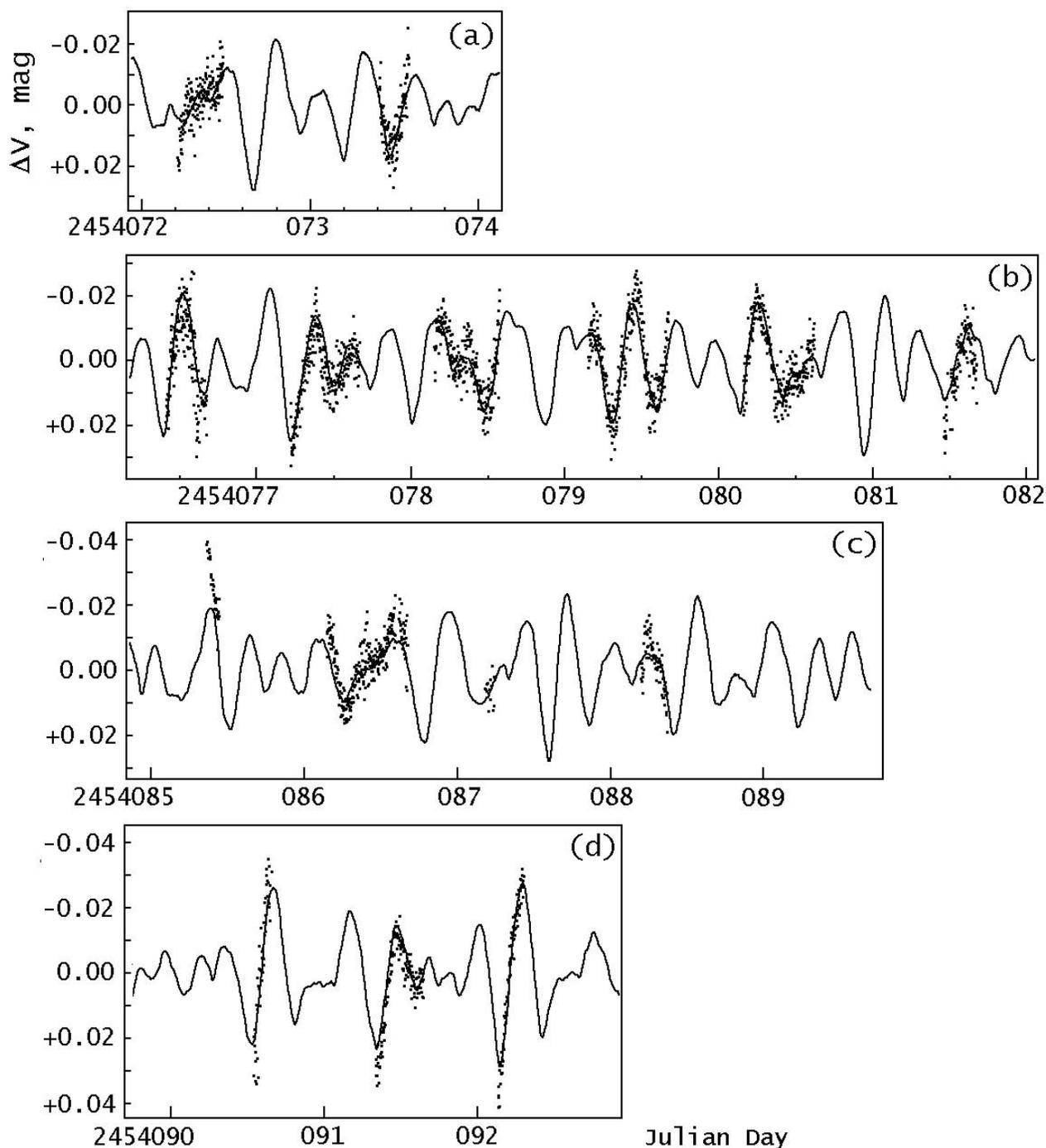


Рис. 6. Наиболее длительные ряды наблюдений 3-го сезона (точки) и их модельное представление суммой волн с периодами, представленными в Табл. 2. Используются средние кривые блеска волн (Рис. 5, кроме периода $0^d.07334$).

колебания невозможно установить даже за один наблюдательный сезон.

Когда периоды колебаний относятся как целые числа, наступает резонанс. При резонансе фазы максимумов или минимумов разных волн точно совпадают достаточно длительное время. В этом случае при совпадении фаз не соблюдается правило простого сложения амплитуд, и амплитуда

суммарной волны становится больше арифметической суммы двух волн. На Рис. 7 показано, как модель, представляющая сумму только двух доминирующих волн, накладывается на кривые блеска с максимальной амплитудой в JD 2454090–2454092. Сложная модельная картина с двумя максимумами и глубоким минимумом повторяется с периодом $0^d.82$ (приблизительно два периода $0^d.4153$ или три

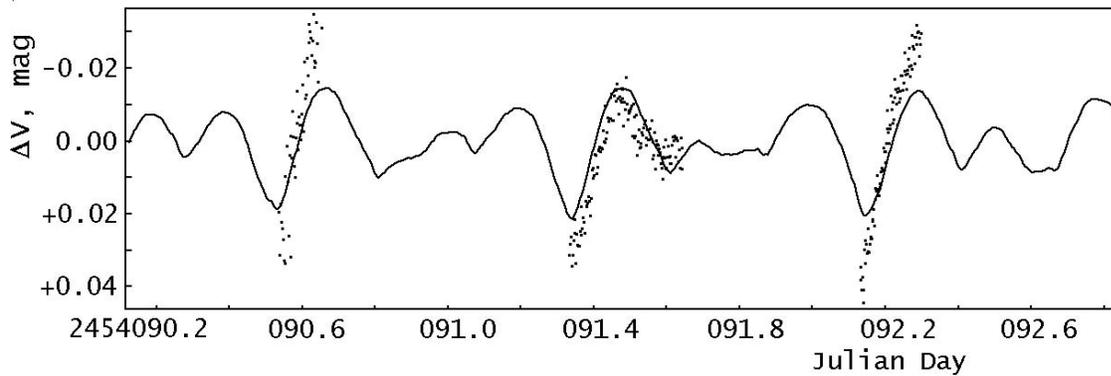


Рис. 7. Признак резонанса двух колебаний с наибольшей амплитудой: амплитуда наблюдаемых волн при совпадении этих колебаний по фазе превышает модельную амплитуду, которая равна сумме двух составляющих.

периода $0^d.2667$). При Фурье-разложении резонансного колебания, кроме частот двух волн, выделяется еще много “частот взаимодействия”, которые создают сложную картину частотного спектра, но, тем не менее, сумма волн с учетом этих компонентов меньшей амплитуды представляет наблюдения лучше (см. тот же по времени фрагмент Рис. 6 внизу). В частности, такой “частотой взаимодействия” может быть и третья волна. По-видимому, мини-вспышка, наблюдавшаяся в работе [12], как раз и является резонансным наложением двух или трех волн.

Кратное отношение пульсационных периодов наблюдается у звезд типа RR Lyr со смешанными модами. В некоторых работах [20–22] эффект Блажко у переменных звезд типа RR Lyr трактуется как резонанс 1:2 между основным тоном и 3-м обертоном (то есть между радиальными пульсационными модами). Признаком резонанса является то же увеличение амплитуды выше суммарной амплитуды двух волн при совпадении фазы максимумов этих волн. Долгопериодическая амплитудная модуляция (эффект Блажко) была воспроизведена в линейных газодинамических расчетах [21], но воспроизвести ее в нелинейных модельных расчетах не удается. Волна третьего обертона у звезд с эффектом Блажко проявляется только в узком диапазоне фаз основного тона около максимума блеска и на восходящей ветви. В других фазах вторичная волна не проявляется. Поэтому звезды с эффектом Блажко имеют очень сложные спектры мощности, и их кривые блеска еще не удалось удовлетворительно представить суммой конечного числа периодических компонентов. На этом основании гипотеза резонанса радиальных мод сейчас оспаривается многими исследователями (см., в частности, [23]). Для объяснения эффекта Блажко в настоящее время используется также гипотеза наклонного магнитного ротатора. В целом эффект Блажко объясняют 6 гипотез [24]. В работе [25]

было показано, что признаки резонанса наблюдаются у звезд типа RR Lyr, пульсирующих одновременно в основном тоне и первом обертоном с соотношением периодов, близким к 4:3 (тип RRd), при этом доминирует волна первого обертона. Авторами настоящей работы у переменной звезды типа RR Lyr V79 в шаровом скоплении M3 2007 г. было зарегистрировано событие обратной смены мод с пульсациями в двух этих модах, и при этом доминировала волна основного тона [26]. Фазовая кривая блеска выглядела так же, как у звезд с эффектом Блажко. Волна первого обертона проявилась с максимальной амплитудой около фазы максимума волны основного тона.

Итак, признаками резонанса (в отличие от обычных биений) являются: (1) кратность периодов волн, (2) превышение амплитуды колебаний над простой суммой составляющих это колебание волн, (3) зависимость вклада вторичной волны от фазы основной волны (вторичная волна наиболее сильна, когда ее максимум совпадает с максимумом основной волны).

Звезды типа δ Sct, пульсирующие в нерадиальных модах, такие признаки не проявляют, и их кривые блеска хорошо представляются суммой нескольких волн. Так что пульсации В-звезды в системе CI Cam напоминают эффект Блажко и пульсации звезд типа RR Lyr в двух радиальных модах и также могут оказаться радиальными пульсациями.

Пульсации у звезд спектрального класса В встречаются часто. Известно два типа нерадиальных пульсаций — в р-модах у звезд ранних подклассов класса В (тип β Cep) и g-модах у звезд поздних подклассов (тип медленно пульсирующих В-звезд, SPB) [27]. Все это звезды главной последовательности. В распределении звезд по наблюдаемым частотам (Рис.2 из [27]) есть два пика с

максимумами на 5.5 и 0.8 с/d, которые соответствуют двум типам пульсаций, причем промежуточные частоты встречаются исключительно редко. Две основные частоты CI Cam 2.408 и 3.753 с/d попадают как раз в пробел между распределениями частот для двух типов пульсаций.

В фотометрическом исследовании Ве-звезд [28] рассматривалась выборка из 84 объектов. Ве-звездами считаются звезды класса В (за исключением сверхгигантов), которые имеют в спектре или когда-либо имели бальмеровскую эмиссию. Появление этой эмиссии связано с присутствием кеплеровского экваториального околозвездного диска, подпитывающегося во время дискретных эпизодов потери массы. Кратковременная переменность обнаружена у 74% звезд раннего подкласса и 31% звезд промежуточного или позднего подкласса Ве-звезд. Среди этих объектов обнаружено 7 мультипериодических, 21 монопериодическая пульсирующая звезда и 26 непериодических звезд. В Табл. 1 и 2 в работе [28] в диапазоне частот 1.8–3.7 с/d, где нормальные В-звезды практически не встречаются, мы насчитали 14 звезд Ве. В этот диапазон попадают доминирующие частоты CI Cam. Как показала спектроскопия Ве-звезды μ Cep [29], нерадиальные пульсации в комбинации с большой экваториальной скоростью вращения являются возможным механизмом потери массы (хотя сама звезда μ Cep — единственный экземпляр, который показывает такое поведение). Интересны результаты исследования [30] двух пульсирующих Ве-звезд V1446 Aql (B2 IVe) и NW Ser (B2.5 IIIe), типичные частоты которых расположены в диапазоне 1.126 и 3.304 с/d. Этот диапазон частично перекрывает диапазон частот, обнаруженных у B[e]-компонента CI Cam. Для этих звезд в работе [30] построены теоретические модели в диапазонах масс (7.0–9.5) M_{\odot} , радиусов (5.8–9.5) R_{\odot} и скоростей вращения на экваторе (250–330) км/с. В случае V1446 Aql предсказаны только g-моды высокого порядка, в то время как NW Ser — кандидат в “гибридный” пульсатор, для которого возможна нестабильность двух типов: и β Cep, и SPB. Радиальные пульсации при таких массах и скоростях вращения невозможны. Тем не менее, гипотеза о радиальных пульсациях у B[e]-компонента CI Cam еще имеет право на существование, так как это далеко проэволюционировавшая звезда большой массы (более 12 M_{\odot}), испытавшая обмен масс в системе с компонентом, который в настоящее время является белым карликом, но первоначально имел большую массу. Так что B[e]-компонент может и не иметь большую скорость вращения. К тому же газовый диск CI Cam трактуется не как кеплеровский, а как дискообразный звездный ветер [31]. Во всяком

случае, гипотезу о радиальных пульсациях CI Cam желательно проверить модельными расчетами.

Пульсации у звезд с B[e]-феноменом еще не известны, и настоящее исследование — первое, в котором такие пульсации открыты. Нужно отметить, что вопрос о возможных пульсациях B[e]-звезд обсуждался на конференции “Звезды с B[e]-феноменом” (состоявшейся на острове Влиеланд в Голландии в 2005 г.) в связи с формированием около В-звезд газовых дисков и переносом вещества из звезды в околозвездный кеплеровский диск [32].

7. ВЫВОД

По данным прецизионной ПЗС-фотометрии мы обнаружили, что быстрая переменность CI Cam в шкале нескольких часов представляет собой мультипериодические пульсации компонента В4 III-V в этой системе. Доминируют колебания в двух модах, 0^d2667 и 0^d4153 с соотношением периодов 2:3. Колебания стабильны по фазе на временной шкале в полтора года.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку грантами 05-02-19710ЯФ, 06-02-16865, 07-02-00630 и 07-02-00909.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. J. G. L. M. Lamers, F.-J. Zickgraf, D. de Winter, et al., *Astronom. and Astrophys.* **340**, 117 (1998).
2. Е. А. Барсукова, Н. В. Борисов, А. Н. Буренков и др., *Астрон. ж.* **83**, 745 (2006).
3. E. A. Barsukova, N. V. Borisov, A. N. Burenkov, et al., in *Stars with the B[e] Phenomenon*. Ed. by M. Kraus, and A. S. Miroshnichenko, ASP Conf. Series **355**, 305 (2006).
4. M. Orlandini, A. N. Parmar, F. Frontera, et al., *Astronom. and Astrophys.* **356**, 163 (2000).
5. M. Ishida, K. Morio, and Y. Ueda, *Astrophys. J.* **601**, 1088 (2004).
6. A. J. Mioduszewski, M. P. Rupen, *Astrophys. J.* **615**, 432 (2004).
7. E. A. Barsukova, N. V. Borisov, A. N. Burenkov, et al., *Astron. Tel.* № 416 (2005).
8. E. A. Barsukova, V. G. Klochkova, V. E. Panchuk, et al., *Astron. Tel.* № 1036 (2007).
9. Yu. K. Bergner, A. S. Miroshnichenko, R. V. Yudin, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 221 (1995).
10. A. S. Miroshnichenko, *Odessa Astron. Observ. Publ.* **7**, 76 (1994).
11. Е. А. Барсукова, Н. В. Борисов, В. П. Горанский и др., *Астрон. ж.* **79**, 309 (2002).

12. T. Kato and M. Uemura, *Inform. Bul. Var. Stars* № 5081 (2001).
13. J. S. Clark, in *Stars with the B[e] Phenomenon*. Ed. by M. Kraus and A. S. Miroshnichenko, ASP Conf. Series **355**, 269 (2006).
14. J. Z. Yan and Q. Z. Liu, *Astron. Tel.* № 820 (2006).
15. V. Simon, C. Bartolini, A. Guarnieri, et al., *New Astronomy* **12**, 578 (2007).
16. V. Simon, C. Bartolini, A. Guarnieri, et al., *Open European Journal on Variable Stars* **75**, 24 (2007) (<http://var.astro.cz/oejv/>).
17. V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, *Variable Stars, Supplement* **7**, № 15 (2007) (<http://www.astronet.ru/db/varstars/>).
18. T. J. Deeming, *Astrophys. and Space Sci.* **36**, 137 (1975).
19. В. Ю. Теребиж, *Анализ временных рядов в астрофизике* (Наука, Москва, 1992).
20. K. J. Borkowski, *Acta Astron.* **30**, № 4, 393 (1980).
21. P. Moskalik, *Acta Astron.* **36**, 333 (1986).
22. В. П. Горанский, *Астрон. ж.* **66**, 84 (1989).
23. H. A. Smith, J. M. Matthews, K. M. Lee, et al., *Astronom. J.* **107**, 679 (1994).
24. R. F. Stellingwerf, in *Multiple Periodic Variable Stars*. Proc. of IAU Coll. № 29, Ed. by W. S. Fitch. (D. Reidel Publishers, 1976) p. 153.
25. В. П. Горанский, *Переменные звезды* **22**, 914 (1988).
26. V. P. Goranskij and E. A. Barsukova, *Astron. Tel.* № 1120 (2007).
27. P. De Cat, in *Radial and Nonradial Pulsations as Probes of Stellar Evolution*, IAU Coll. № 185. Ed. by C. Aerts, T. R. Bedding, and J. Christensen-Dalsgaard, ASP Conf. Series **259**, 196 (2002)
28. J. Gutierrez-Soto, J. Fabrigat, J. Suso, et al., *Astronom. and Astrophys.* **476**, 927 (2007).
29. T. Revinus, D. Baade, S. Stell, et al., *Astronom. and Astrophys.* **369**, 1058 (2001).
30. J. Gutierrez-Soto, J. Fabrigat, J. Suso, et al., *Astronom. and Astrophys.* **472**, 565 (2007).
31. F.-J. Zickgraf, *Astronom. and Astrophys.* **408**, 257 (2003)
32. S. Owocki, in *Stars with the B[e] Phenomenon*. Ed. by M. Kraus and A. S. Miroshnichenko. ASP Conf. Series **355**, 219 (2006).

PULSATIONS OF THE B[E]-TYPE COMPONENT IN THE CI CAMELOPARDALIS SYSTEM

V.P. Goranskij, E.A. Barsukova

CI Cam is a well-known B[e]-type star and an X-ray transient, which underwent a powerful outburst in all parts of electromagnetic spectrum in 1998. An extensive V-band photometric monitoring revealed that rapid variability of CI Cam on the time scale of several hours is due to the pulsations of the B4 III-V type component. High-precision CCD photometry of the star was performed with the 50-cm Maksutov (meniscus) telescope of the Crimean station of the Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University in December 2006 during the quiescent state of the star. The data are analyzed using the methods of discrete Fourier transform and by modeling of the light curve. The amplitude spectrum of the star is dominated by two peaks corresponding to the periods of 0.41521 and 0.26647 days with the period ratio close to 3:2. At least two pulsation modes are excited and the star exhibits signs of the resonance between modes.

Key words: *stars: variable and peculiar*