

CQ Cephei — самая загадочная из двойных систем типа Вольфа-Райе

Т.А. Карташева¹, М.А. Свечников²

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

² Уральский государственный университет, Екатеринбург, ул.Ленина 51, 620083

Поступила в редакцию 10 марта 2005 г.; принята к печати 17 марта 2005 г.

Сделана попытка увязать результаты фотометрических, поляриметрических и спектральных исследований CQ Cep между собой, а также с результатами изучения ее (O-C)-диаграммы, что позволило, по мнению авторов, решить основные загадки системы.

1. Объяснены аномалии в поведении блеска CQ Cep. Стала понятной причина появления у нее низкоамплитудных ($\approx 0^m.2$) кривых блеска. Показано, что только решение кривой блеска системы июля-августа 1937 г. может дать уверенные оценки относительных элементов и наклонности орбиты системы.

2. Дана интерпретация общего хода (O-C)-диаграммы CQ Cep как фрагмента долгопериодического гармонического колебания, обусловленного движением “WR+O”-пары вокруг центра тяжести тройной системы. Доказана реальность существования ветвей на исходной и остаточной (O-C)*-диаграммах, появление которых связано с вхождением WR-компонента в состояние повышенной активности. Дана характеристика двух фаз последней (фазе разбухания оболочки и фазе сброса материи). Анализ ветвей остаточной (O-C)*-диаграммы позволил получить сведения о сдвигах нуля-пункта отсчета фаз (ΔT_{0i}) и скачкообразных, знакопеременных изменениях орбитального периода системы (ΔP_i), сопутствующих выбросам материи.

3. Проанализированы результаты всех спектроскопических исследований CQ Cep, посвященных поиску линий спутника. Показано, что только в спектрах высокого разрешения возможно обнаружение и точное измерение положения O-абсорбций. Отмечено, что видимость линий спутника изменяется со временем и с длиной волны, ухудшаясь с ростом λ . Указаны причины этих зависимостей. На примере наших спектров CQ Cep 1981-82 г. показано, что O-абсорбции лучше всего наблюдаются во второй фазе повышенной активности WR-звезды – в фазе сброса материи.

4. С учетом тройственности системы проведена ревизия относительных и абсолютных элементов “WR+O”-пары CQ Cep.

Ключевые слова: двойные; затменные звезды; Вольфа-Райе-звезды; индивидуально: CQ Cep — фотометрия, поляриметрия, исследование (O-C)-диаграммы, спектроскопия, спектрофотометрия

CQ CEPHEI — THE MOST MYSTERIOUS OF WOLF-RAYET TYPE BINARY SYSTEMS, by **T.A. Kartasheva, M.A. Svechnikov**. The paper presents an attempt to co-ordinate the results of CQ Cep photometric, spectral and polarimetric investigations together with the results of its (O-C) diagram study in order to find a solution of the CQ Cep enigmas.

1. Anomalies in the CQ Cep brightness behavior are explained. The cause of appearing light curves of low amplitude ($\approx 0^m.2$) is accounted for. It is shown that only the solution of the light curve of July–August 1937 can give reliable estimates of relative elements of the system and its orbit inclination.

2. An interpretation is given of the general run of the (O-C) diagram as a fragment of long-term harmonic oscillation affected by the “WR+O” pair moving around the gravity center of a triple system. The existence of branches on the initial and residual (O-C)* diagrams is proved and referred to the WR component entering a higher activity state. Characteristic properties of the two phases of the higher activity state (the phase of envelope swelling and the phase of matter ejection) are given. Analysis of the branches of the residual (O-C)* diagram allowed obtaining data on a zero point shift of the phase reckoning (ΔT_{0i}) and jump-like, sign alternating changes of the orbital period of the system (ΔP_i) accompanying matter ejection.

3. The results of all spectroscopic investigations of CQ Cep devoted to detection of companion lines are analyzed. It is shown that the detection and accurate measurement of positions of O absorptions is possible in spectra of high resolution only. It is noted that visibility of the companion lines undergoes changes depending upon the time and wavelength, deteriorating with rising λ . The causes of those relations were pointed out too. By way of example of our CQ Cep spectra of 1981-1982 it is shown that O absorptions are best observed at the second phase of enhanced activity of the WR-star, that is, at the phase of matter ejection.

4. The relative and absolute elements of the CQ Cep “WR+O” pair are revised taking into account the triplicity of the system.

Key words: stars: binaries: eclipsing – stars: Wolf-Rayet – stars: individual: CQ Cephei

1. Введение

CQ Cep (HD 214419) (WN7 + O9.5; $V = 8^m.9$; $P = 1^d.64$) — одна из четырех затменно-двойных систем с компонентом типа Вольфа-Райе, поставляющих нам сведения о физических характеристиках ядер WR-звезд и их оболочек. Кроме того, это единственная затменно-двойная система с WR-компонентом, относящимся к подгруппе WNL (поздних WR-звезд азотной последовательности), обладающих повышенной светимостью, повышенным содержанием водорода и занимающих, вероятно, особое место в эволюции массивных звезд. Наконец, это самая тесная из WR-двойных (расстояние между центрами звезд $\approx 20 R_{\odot}$), где оболочка WR-звезды одновременно является общей оболочкой системы.

Блеск и спектр системы значительно меняются со временем. В связи с этим исследователи сталкиваются с тремя основными проблемами:

- 1) искажениями формы и изменениями амплитуды кривой блеска системы, с колебаниями блеска от цикла к циклу, со вспышками (решение искаженных кривых блеска не дает уверенных оценок наклона орбиты и относительных элементов системы);
- 2) крайней сложностью формы (O-C)-диаграммы CQ Cep, затрудняющей ее интерпретацию, а следовательно, и понимание того, как ведет себя со временем орбитальный период системы;
- 3) отсутствием в подавляющей части спектров CQ Cep абсорбций O-спутника, что создает неуверенность в оценке абсолютных элементов системы и спектрального класса спутника.

Наши поляриметрические исследования CQ Cep (Карташева и др., 1998, 2000) показали, что линейная поляризация системы (P) испытывает значительные долговременные (на шкале годы) изменения. Резкие изменения среднего уровня поляризационных кривых ($\Delta P \approx 1\%$) сопровождаются столь же резкими вариациями амплитуды фазово-зависимых изменений поляризации. Обнаружение аналогичного поведения P еще у двух довольно тесных WR-двойных систем (CX Cep и

HD 211853) (Карташева, 2002а,б) позволило нам заключить, что коренной причиной долговременного изменения их поляризации является физическая активность WR-компонентов, проявляющаяся в эпизодическом разбухании WR-оболочек и последующих сбросах самых внешних слоев последних (Карташева и Свечников, 2003). Получение этих новых доказательств существования у CQ Cep эпизодических крупномасштабных сбросов материи, с одной стороны, подтвердило наше предположение о причинах ветвистости ее (O-C)-диаграммы, с другой стороны, позволило дать объяснение многим загадкам поведения блеска и спектра системы. Увязыванию результатов многосторонних исследований CQ Cep посвящена данная статья.

2. Аномалии в поведении блеска CQ Cep

Аномалии формы кривой блеска системы (асимметрия ветвей в обоих минимумах, сдвиг максимумов и вторичного минимума от их нормальных положений по фазе, неравенство максимумов, различие ширин минимумов), изменения этих аномалий со временем и с длиной волны обсуждались неоднократно (Хилтнер, 1950; Чугайнов, 1960; Гусейнзаде, 1967; Халиуллин, 1972; Карташева, 1972; Антохина и др., 1982; Стикланд и др., 1982, 1984; Харвиг, 1987; Демиркан, 1997). В самых ранних фотометрических исследованиях системы (Хилтнер, 1950; Чугайнов, 1960) они объяснялись изменениями интенсивности эмиссий, вносящих существенный вклад в общий блеск системы. Однако узкополосные фотоэлектрические наблюдения CQ Cep в полосах, свободных от эмиссионных линий, выполненные Халиуллиным и Черепашуком в 1968 и 1970 гг. (Халиуллин и Черепашук, 1970; Халиуллин, 1972), дали кривые блеска, ничем не отличающиеся от широкополосных. Последнее свидетельствовало о том, что само излучение в непрерывном спектре ответственно за аномалии формы кривой блеска системы.

Кроме того, всеми наблюдателями CQ Cep от-

Таблица 1: Наблюдательные данные по нестабильности блеска CQ Сер от цикла к циклу

Наблюдатель	$\Delta m^*_{\text{макс.}}$				Примечания	Ссылка
	U	B	V	R		
Хилтнер IX-X, 1947	0 ^m 04	—	0 ^m 04	—		Хилтнер, 1950
Чугайнов X-XII,1958, VII-X,1959	0.07	0.06	0.07	—		Чугайнов, 1960
Гусейнзаде X,1964, V-IX,1965	0.18	0.10	0.15	—		Гусейнзаде, 1967,1969
Халиуллин и Черепашук IX-X,1968	—	—	—	—	Опубликованы средние кривые блеска. Журнала наблюдений нет	Халиуллин, Черепашук, 1970
Карташева II-V,1969	0.04	до вспышки:		—		Карташева, 1972
		0.04	0.04			
	0.35	вспышка:		—		
		0.13	0.14	—		
Халиуллин VII-X,1970,	—	—	—	—	Опубликованы средние кривые блеска. Журнала наблюдений нет	Халиуллин, 1972
Карташева I-X,1975	—	—	0.17	—	Узкополосные наблюдения $\lambda_{\text{max.}} = 5000\text{Å}$, $\Delta\lambda = 103\text{Å}$	Карташева, 1976,1987
Карташева VII-X,1976	—	—	0.07	—	Узкополосные наблюдения $\lambda_{\text{max.}} = 5000\text{Å}$, $\Delta\lambda = 103\text{Å}$	Карташева, 1987
Антохина и др. VI-VIII,1980, V,1981	0.08	0.08	0.08	0.08	Наблюдений мало. Редкие фазы наблюдались дважды	Антохина и и др., 1982
Стикланд и др. IX,1981	—	—	—	—	Журнала наблюдений нет	Стикланд и др., 1982, 1984
Харвиг II-IX,1982	0.15	0.15	0.10	0.10		Харвиг, 1987
Килинк 1991-92	—	0.07 :	0.06 :	—	Журнала наблюдений нет. $\Delta m^*_{\text{макс.}}$ грубо оценены по разбросу на кривых блеска	Килинк, 1994
Демиркан и др. IV-XII,1995 VI-VIII,1996	0.08 :	0.06 :	0.08 :	—	Журнала наблюдений нет. $\Delta m^*_{\text{макс.}}$ грубо оценены по разбросу на кривых блеска	Демиркан и др., 1997

мечалась нестабильность блеска системы от цикла к циклу (Δm^*) (Хилтнер, 1950; Чугайнов, 1960; Гусейнзаде, 1967; Стикланд и др., 1984; Харвиг, 1987). Этот эффект максимально проявился в широкополосных наблюдениях Гусейнзаде (1967, 1969) и в наших наблюдениях 1975 года, выполненных в узкой полосе, свободной от эмиссий (Карташева, 1976, 1987). Последнее позволило заключить, что внутренняя переменность блеска системы также связана с вариациями излучения в самом континууме. В табл.1 мы приводим оценки этого эффекта. Из этой таблицы следует, что для большей части фотоэлектрических наблюдений CQ Сер (при точности наблюдений $\pm 0^m 01 - \pm 0^m 02$) $0^m 04 \leq \Delta m^*_{\text{макс.}} \leq 0^m 08$. Однако для ряда наблюдений эта оценка возрастает примерно вдвое (Гусейнзаде, 1969; Карташева, 1972, 1976; Харвиг, 1987). Этот вывод об эпизодическом возрастании внутренней переменности блеска системы от цикла к циклу будет использован нами в дальнейшем. Здесь же, вероятно, следует напомнить о кратковременных ($\Delta t \approx 2^h$) вспышках излучения системы, достигающих $0^m 15 - 0^m 20$ в синей и желтой областях спектра и $0^m 35$ в ближнем ультрафиолете, описанных в работах Карташевой (1972) и Курочкина (1979).

Наконец, кривой блеска CQ Сер свойственна резкая амплитудная нестабильность. До сих пор этот вопрос не получил должного внимания, хотя неоднократно нами поднимался (Карташева и Свечников, 1988, 1996). Уже то, что самая первая сводная кривая блеска системы, построенная Гапошкиным (1944) по 1800 оценкам блеска (фотографические наблюдения 1901 – 1942 гг.), существенно отличается по амплитуде ($0^m 34$) от современных кривых ($\geq 0^m 4$), наводило на раздумья. Опубликованные же в 1979 году Курочкиным фотографические кривые блеска CQ Сер июля-августа 1937 и августа – сентября 1938 года (Курочкин, 1979), различающиеся в два раза по амплитуде ($\approx 0^m 2$ и $\approx 0^m 4$ соответственно), определенно показали, что кривая блеска системы время от времени испытывает резкие уменьшения амплитуды. Обе кривые относились к одной серии наблюдений, что позволило Курочкину, произведя наложение кривых, сделать заключение о том, что “различия касаются высот максимумов, в минимумах точки практически совпадают.” В современных наблюдениях CQ Сер эффект амплитудной нестабильности, правда, меньшего масштаба, проявился в наблюдениях Антохиной и ее коллег (1982), получивших UVVR-кривые блеска системы в 1.5 раза меньшей амплитуды по сравнению с другими современными ее кривыми.

Кроме того, в наблюдениях Стикланда и его коллег (1984) была обнаружена зависимость ам-

плитуды кривой блеска системы от длины волны. В инфракрасной области спектра (в J, K и L-полосах) они получили кривые блеска CQ Сер с амплитудой в 1.5 – 2 раза меньшей, чем в видимой области и ультрафиолете. Авторы объяснили это тем, что сама протяженная атмосфера системы дает дополнительное излучение в континууме (третий блеск), вклад которого растет с длиной волны, достигая 22% в J и 45% в K-полосе.

Совместное рассмотрение данных фотометрических, поляриметрических и спектральных исследований CQ Сер позволяет объяснить основные аномалии, отмеченные в поведении блеска системы.

Результаты, полученные в работах Курочкина (1979), Антохиной и ее коллег (1982), подтвердили наше предположение о составном характере современных, высокоамплитудных ($\geq 0^m 4$) кривых блеска CQ Сер, где лишь половина амплитуды обусловлена эллипсоидальностью звезд и эффектом их затмений (Карташева, 1974; Карташева и Свечников, 1974, 1996). Дополнительный блеск, изменяющийся с фазой и ответственный за вторую половину амплитуды суммарной кривой, мы относили к оболочке. Последняя, по нашим предположениям, имела довольно однородную и низкую по плотности составляющую, не проявляющуюся в затмениях, но дающую в силу своей большой протяженности существенный вклад в излучение системы в непрерывном спектре (блеск L_3), и горячее плазменное уплотнение между компонентами системы. Возникшее в результате взаимодействия звездных ветров, это уплотнение, по нашему мнению, должно было проявлять себя и как экранирующий, и как светящийся объект (блеск L_*) и отвечать за все аномалии формы суммарной кривой блеска. (В главе 3 данной работы, после интерпретации разностной [(O-C₂) – (O-C₁)]-диаграммы CQ Сер, мы сможем дать уточненную модель оболочки системы.)

Обнаруженная во всех наблюдениях системы нестабильность блеска от цикла к циклу (Δm^*) может свидетельствовать о том, что в системе идет постоянный сброс микрооболочек, обусловленный физической активностью WR-компонента. Резкие эпизодические возрастания Δm^* , а также появление кратковременных вспышек свидетельствуют, вероятно, о вхождении WR-звезды в фазу повышенной активности, характеризующуюся усиленными сбросами самых внешних частей ее оболочки. Существование таких сбросов подтверждается поляриметрическими исследованиями (Карташева и др., 1998, 2000) и ветвистостью (O-C)-диаграммы системы (Карташева и Свечников, 1991).

Если вспомнить, что, согласно результатам по-

ляриметрических наблюдений CQ Сер (Карташева и др., 1998), этим усиленным сбросам материи предшествует рост в 2 раза электронной плотности WR-оболочки, то появляется возможность дать объяснение и резким эпизодическим уменьшениям амплитуды кривой блеска системы. Действительно, рост электронной плотности оболочки должен привести к двум следствиям: 1) исчезновению свечения плазменного сгустка (L_*), рассеянного разбухшей оболочкой, 2) увеличению блеска WR-оболочки (L_3). Поскольку всегда в центральных частях обоих минимумов блеск $L_*=0$ (плазменное уплотнение затмевается или O-звездой, или ядром WR-звезды), то в сочетании со следствием 1) становится понятен результат, полученный Курочкиным (1979) при наложении кривых блеска системы июля-августа 1937 г. и августа-сентября 1938 г. В пользу того, что дополнительное свечение L_* перестало искажать кривую блеска CQ Сер июля-августа 1937 г., говорит и то, что ее первый максимум занял свое нормальное положение по фазе (0°:25). Этого нельзя сказать о втором максимуме (0°:75), так как экранирующее действие плазменного сгустка сохранилось и проявилось в фазах 0°:53 – 0°:92. Это хорошо видно на рис.36 из работы Карташевой и Свечникова (1996), где на кривую блеска системы, полученную в июле-августе 1937 г., наложена теоретическая кривая.

Данная Стикландом и его коллегами (1984) интерпретация обнаруженной ими зависимости амплитуды кривой блеска CQ Сер от длины волны, вероятно, верна, так как имеет подтверждение в спектральных исследованиях системы — видимость абсорбций O-спутника в сильной степени зависит от выбора спектральной области исследования и ухудшается, вплоть до исчезновения линий, с ростом длины волны (Карташева, 1996). Что касается аномального распределения энергии в свечении оболочки (блеск L_3), то его можно объяснить, если предположить, что помимо внутренней высокоионизованной (грубо говоря, электронной) оболочки система имеет мощную внешнюю газо-пылевую оболочку, рассеивающая способность которой сильно изменяется с λ ($\sim \lambda^{-4}$). Именно в этом, вероятно, состоит причина резкого покраснения третьего блеска. Справедливость нашего предположения подтверждается поляризационными исследованиями системы. Из данных табл. 4 работы Карташевой и Свечникова (2003) видно, что помимо межзвездной поляризации (P_I) в постоянную составляющую поляризации CQ Сер (P_0) значительный вклад вносит дополнительный источник (P_0^*), поляризация которого по величине не уступает P_I .

Из всего вышеизложенного следует, что кривая блеска CQ Сер июля-августа 1937 г. — единствен-

ная кривая, не искаженная блеском L_* . Ее решение, вероятно, может дать правильные оценки относительных элементов и наклонности орбиты системы.

Нами были выполнены два пробных решения кривой блеска CQ Сер июля-августа 1937 года (Карташева и Свечников, 1988, 1996). В решениях использовалась лишь часть кривой (фазы 0°:92 – 0°:0 – 0°:53), не искаженная экранированием света компонентов плазменным уплотнением. Минимумы решались отдельно. Впервые предполагалось, что размеры обоих компонентов в качестве затмевающих и светящихся объектов разные. Решение проводилось методом Мерилла – Рессела в предположении об однородном распределении яркости по диску звезд. Первое решение (Карташева и Свечников, 1988) не удовлетворило нас тем, что дало нереально малое отношение блеска компонентов ($L_{WR}/L_O = 0.49$). Коренным отличием второго решения (Карташева и Свечников, 1996) было введение третьего блеска (L_3), который мы приписывали свечению оболочки в континууме. Кроме того, мы опирались на оценку отношения блеска компонентов, полученную из спектрофотометрических исследований системы ($L_{WR}/L_O=1.8$) (Карташева, 1996). В табл. 2 представлено наше второе решение кривой блеска CQ Сер июля-августа 1937 года, полученное с помощью найденного отношения блеска компонентов и табл.2 из работы Карташевой и Свечникова (1996), содержащей набор решений, соответствующих различным значениям L_3 . В целом, решение представляется нам вполне удовлетворительным. Однако полученное значение наклонности орбиты системы существенно отличается от значения, следующего из поляризационных исследований ($i_{пол.} = 80^\circ$) (Карташева и др., 2000). Превышение оценки $i_{пол.}$ над $i_{фот.}$ отмечено у многих WR-двойных систем (Харрис и Хилдитш, 1997, табл.5). Причина этого пока не совсем ясна, хотя в своей работе по поляриметрическим исследованиям WR-двойных систем (Карташева и Свечников, 2003) мы показали, что подобное разногласие обнаруживается только у систем с нестабильными кривыми поляризации. Как следует из опыта поляриметрических исследований CX Сер (Карташева, 2002б; Карташева и Свечников, 2003), предпочтение в этом случае надо отдавать той оценке $i_{пол.}$, которая следует из анализа кривой поляризации, отражающей наиболее спокойное состояние системы (кривой с самым низким средним уровнем поляризации \bar{P}). Вероятно, для CQ Сер мы еще не получили надежной кривой поляризации, соответствующей наиболее спокойному состоянию с $\bar{P} \approx 4.5\%$. На возможность достижения системой такого состояния указывают

Таблица 2: Относительные элементы CQ Сер, полученные из решения кривой блеска системы июля-августа 1937 года (Карташева и Свечников, 1996)

(при $L_{WR} + L_O = 1$):	(при $A = 1$):
$L_3 = L_{WR\text{обол.}} = 0.27,$	$a_{WR\text{св.}} = 0.56, a_{WR\text{тем.}} = 0.28,$
$L_{WR\text{фот.}} = 0.375,$	$a_{O\text{св.}} = 0.58, a_{O\text{тем.}} = 0.42.$
$L_{WR} = 0.645,$	
$L_O = 0.355.$	
$i = 59^\circ 5$	$J_{WR}/J_O = 1.13$

$L_{WR} = L_{WR\text{фот.}} + L_{WR\text{обол.}}$ — блеск WR-звезды, L_O — блеск O-компонента,
 A — радиус относительной орбиты системы,
 $a_{\text{св.}}$ и $a_{\text{тем.}}$ — большие полуоси компонентов в качестве светящихся и затмевающих объектов,
 i — наклонность орбиты,
 J_{WR}/J_O — отношение поверхностных яркостей компонентов:
 $J_{WR}/J_O = (L_{WR\text{фот.}} a_{O\text{св.}}^2) / (L_O a_{WR\text{св.}}^2).$

наблюдения Хилтнера (1950) и Шаховского (1964) (см. рис. 3 из работы Карташевой и др., 2000). Не исключено, что решение кривой блеска системы июля-августа 1937 года, выполненное современными методами, уменьшит разногласие, обнаруженное в оценках наклонности орбиты системы, полученных из фотометрических и поляриметрических исследований. В главе 5, в связи с интерпретацией (O-C)-диаграммы CQ Сер, будет проведено уточнение соотношения блеска компонентов системы, что повлечет за собой уточнение ее относительных элементов.

3. Интерпретация (O-C)-диаграммы CQ Сер

Вся история исследования (O-C)-диаграммы системы подробно изложена во вводящей части статьи Карташевой и Свечникова (1989). Продолжают ее три наши более поздние работы (Карташева и Свечников, 1989, 1991, 2000), основные результаты которых изложены кратко ниже.¹

Привлечение к исследованию не только наблюдаемых моментов главного минимума, но и наблюдаемых моментов вторичного минимума, то есть совместное рассмотрение (O-C₁) и (O-C₂)-диаграмм CQ Сер, показало, что, хотя обе зависимости имеют вид выпуклых парабол, полного согласия между их ходом нет (см. рис. 1а из работ Карташевой и Свечникова, 1989 и 2000). Это свидетельствовало о том, что помимо основной причины уклонений наблюдаемых моментов минимумов (“O”) от расчетных (“C”), связанной с изме-

нением орбитального периода системы, существуют другие, дополнительные. Именно это побудило нас начать исследование (O-C)-диаграммы CQ Сер с рассмотрения разностной [(O-C₂) - (O-C₁)]-диаграммы, свободной как от уклонений, связанных с изменением орбитального периода, так и от уклонений, возникающих в том случае, если система имеет третье тело. Достоинством разностной диаграммы является то, что на ней происходит удвоение амплитуды эффекта, вызываемого движением линии апсид, что способствует обнаружению последнего. Однако в тесных двойных системах [(O-C₂) - (O-C₁)]-диаграмма отражает еще и разницу искажений моментов главного и вторичного минимумов околозвездным газом, что осложняет обнаружение упомянутого выше эффекта.

Внимательное рассмотрение разностной [(O-C₂)-(O-C₁)]-диаграммы CQ Сер (рис. 1) показало, что циклическое колебание, связанное с движением в системе линии апсид, присутствует и налагается на линейный ход рассматриваемых разностей:

$$[(O - C_2) - (O - C_1)] = 0^d034 - 0^d0000029 \cdot E + 0^d02\cos(295^\circ0 + 0^\circ03 \cdot E)$$

(период апсидального движения $U = 54$ годам, эксцентриситет орбиты системы $e = 0.02$).

Представляя в 1989 году данную выше интерпретацию разностной диаграммы (Карташева и Свечников, 1989), мы исключали из рассмотрения отскочившие вверх значения (O-C₂) - (O-C₁), относящиеся к периоду 1933 - 1950 гг. (“аномальная область”). Это вносило некоторый произвол в интерпретацию и вызывало сомнения в ее правильности. На данный момент на [(O-C₂) - (O-C₁)]-диаграмме (см. рис. 1, нижняя часть), вероятно, завершилось второе нарушение линейно-

¹ В табл. 1 из Приложения 1 к данной статье содержится дополнение к списку наблюдаемых моментов минимумов CQ Сер, представленному в работах Карташевой и Свечникова (1989, 1991, 2000).

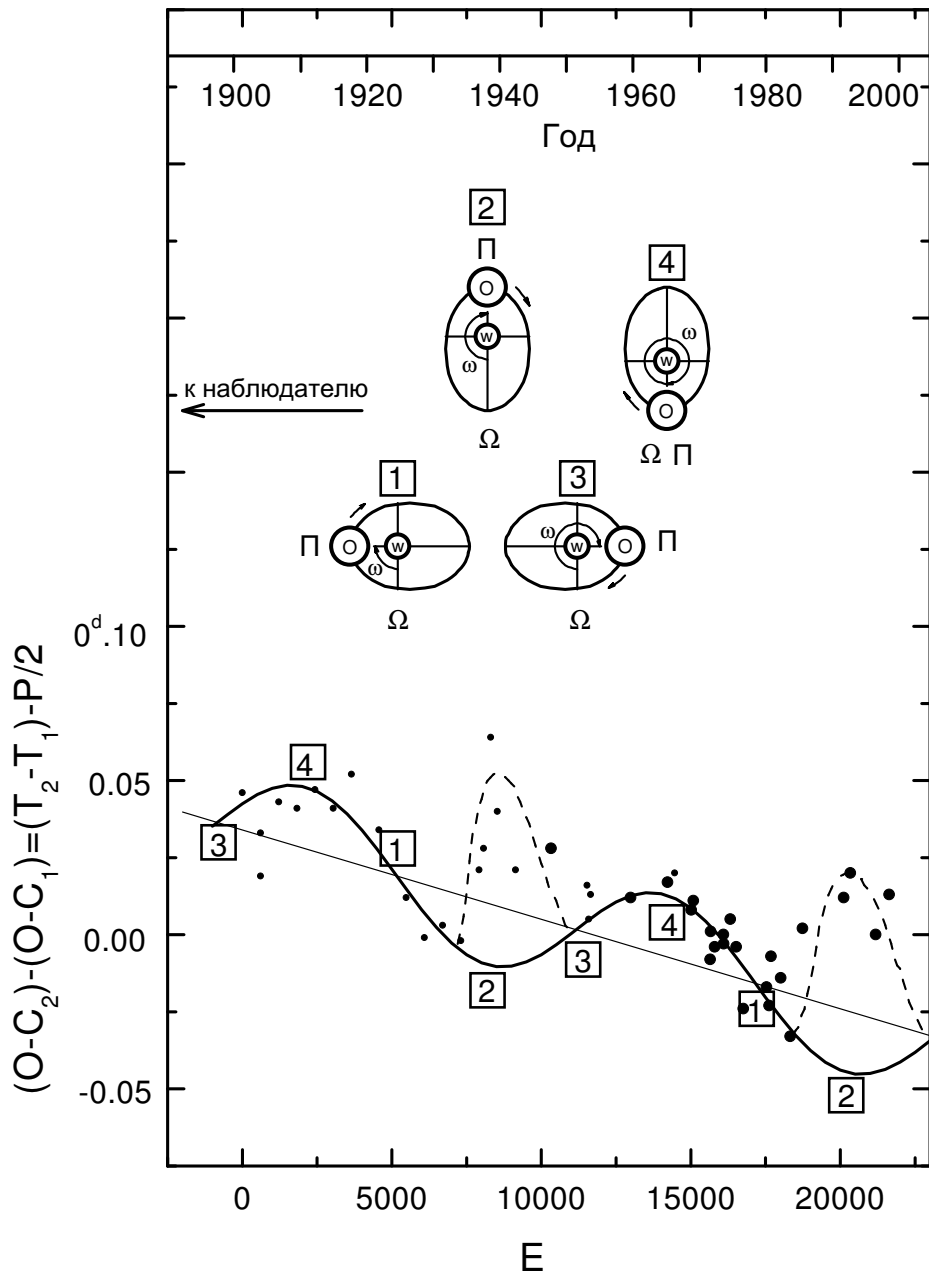


Рис. 1: Разностная $[(O - C_2) - (O - C_1)]$ -диаграмма CQ Сер (нижняя часть рисунка). Результаты фотографических наблюдений представлены точками, фотоэлектрических — заполненными кружками. Жирной линией дано теоретическое представление разностной диаграммы наклонной косинусоидой: $[(O - C_2) - (O - C_1)] = 0^{\text{d}}034 - 0^{\text{d}}0000029 \cdot E + 0^{\text{d}}02 \cos(295^{\circ} + 0^{\circ}03 \cdot E)$, тонкой линией — линейный ход моментов вторичного минимума относительно моментов главного минимума, штрихами — ход $[(O - C_2) - (O - C_1)]$ — разностей внутри “аномальных областей”. В верхней части рисунка каждой узловой точке циклического колебания разностей поставлено в соответствие определенное расположение эллиптической орбиты системы (П — периастр, Ω — восходящий узел, ω — долгота периастра). Для наглядности эллиптичность орбиты системы завышена.

го хода разностей, создавшее вторую “аномальную область” (1986 г. — \approx 2003 г.). Ее максимум отстоит ровно на 54 года от максимума первой “аномальной области”. Обе “аномальные области” показывают одинаковую амплитуду всплеска $(O-C_2) - (O-C_1)$ -разностей ($\approx 0^d07$) и одинаковую продолжительность по времени (≈ 17 лет, что лишь немного больше четверти периода апсидального движения). Эти последние результаты одновременно подтвердили и существование у CQ Сер движения линии апсид с периодом $U=54$ года, и правильность нашего понимания причины появления “аномальных областей” на разностной диаграмме как следствия движения линии апсид в системе (Карташева и Свечников, 2000). Действительно, в каждом орбитальном цикле CQ Сер в момент максимального сближения компонентов на эллиптической орбите должен происходить выброс материи из заполняющего свою внутреннюю критическую полость Роша O-компонента. Однако искажения моментов вторичного минимума (WR-зв. впереди), сопутствующие этому явлению, будут наблюдаться лишь при определенном сочетании фаз орбитального и апсидального циклов. Для этого необходимо выполнение двух условий: 1) момент выброса газа (т. е. момент прохождение через периастр) должен опережать момент вторичного минимума и 2) выброшенная материя должна быть видна в проекции на O-звезду, что при $i \approx 60^\circ$ реально. В моменты двух всплесков на разностной $[(O-C_2)-(O-C_1)]$ -диаграмме CQ Сер максимальное сближение компонентов приходилось примерно на элонгацию, предшествующую вторичному минимуму. (Это хорошо видно на верхней части рис.1, где каждой узловой точке циклического колебания поставлено в соответствие определенное расположение эллиптической орбиты системы.) Материя, выброшенная в это время из O-звезды, имея достаточную скорость для преодоления WR-ветра, за четверть орбитального периода действительно могла сместиться и, проецируясь на O-звезду, дать поглощение на кривой блеска за центром вторичного минимума, оттянув время его наступления. Это искажение должно наблюдаться, уменьшаясь по величине, примерно одну четверть апсидального периода и пропасть, когда прохождение системой периастра придется примерно на момент вторичного минимума. Так оно и происходит.

Реальность выведенных нами параметров апсидального движения мы проверили, используя их для определения констант внутренней структуры компонентов (констант апсидального движения k_2), характеризующих степень концентрации вещества к центрам звезд (Карташева и Свечников, 1998). Их величина ($k_{2WR} \approx k_{2O} \approx \bar{k}_2 = 0.0003$) оказалась примерно на порядок меньше k_2 для

звезд главной последовательности и близкой к величине $k_2 \delta$ Ori (A) и V1765 Cyg — самых продвинутых в эволюционном плане двойных систем с движением линии апсид. Близость CQ Сер к эволюционно продвинутым системам очевидна. В той же работе (Карташева и Свечников, 1998) мы проанализировали причины, вызвавшие движение линии апсид в системе. Расчеты показали, что на 80% это движение обусловлено классическими эффектами (приливным взаимодействием и вращением компонентов).

Чтобы объяснить линейный ход разности $(O-C_2) - (O-C_1)$, вероятнее всего предположить существование в оболочке WR-звезды газового уплотнения, располагавшегося в эпоху наблюдений (XX век, начало XXI) возле WR-звезды со стороны второй критической точки Лагранжа L_2 . Уплотнение перемещается относительно WR-звезды и ее оболочки в направлении вращения звезд в системе, вероятно, за счет импульса, полученного им при выбросе из WR или O-звезды. Проецируясь в фазах вторичного минимума на диск WR-звезды (см. рис. 2: справа от ее центра — в первой половине XX века, на центр — в середине века и слева от центра — во второй половине века), газовое уплотнение давало поглощение на кривой блеска системы, приводящее в первой половине века к запаздыванию моментов вторичного минимума, во второй половине века — к его более раннему наступлению. Газовое уплотнение должно располагаться во внутренних частях оболочки и представлять довольно стабильное образование. Это следует из того факта, что сбросы внешних частей оболочки, неоднократно наблюдавшиеся у системы в течение XX века, свидетельством чему являются ветвистость $(O-C)$ -диаграммы системы (Карташева и Свечников, 1989), эпизодическое возрастание нестабильности блеска системы от цикла к циклу (см. гл. 2) и поведение поляризации (Карташева и др., 1998), никак не отразились на линейном ходе разности $(O-C_2)-(O-C_1)$, а следовательно, на движении газового сгустка.²

Таким образом, интерпретация деталей разностной $[(O-C_2) - (O-C_1)]$ -диаграммы системы привела нас к уточнению структуры WR-оболочки системы. От предположения о существовании го-

² Случаи расположения газового уплотнения между звездами пары или сбоку от O-звезды (искажение моментов главного минимума) кажутся нереальными, первый — из-за необходимости газовому уплотнению двигаться против направления вращения звезд в паре, второй — из-за расположения сгустка в самых внешних, нестабильных слоях оболочки. Проецирование на диск WR-звезды внешнего по отношению к “WR+O”-паре тела тоже представляется маловероятным, так как требует, чтобы орбита последнего лежала строго в плоскости орбиты двойной системы.

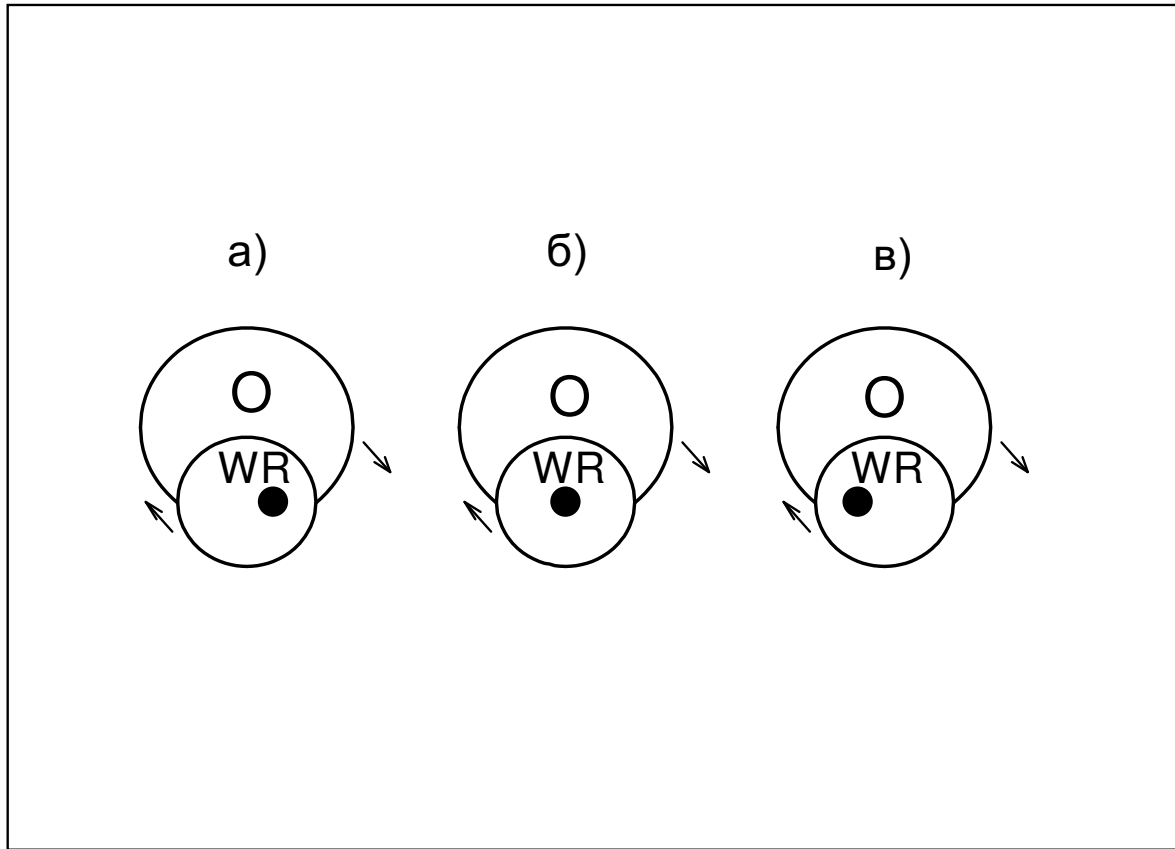


Рис. 2: Вторичный минимум CQ Сер. Три положения газового уплотнения (заполненный кружок) соответствуют началу — а), середине — б), концу — в) XX века. Стрелками показано направление вращения компонентов относительно центра тяжести системы.

рячего плазменного уплотнения между звездами пары, проявляющего себя и как светящийся, и как экранирующий объект, приходится отказаться. Дрейф уплотнения, образованного сталкивающимися звездными ветрами, да еще в направлении, обратном вращению звезд в системе, представляется нереальным. Вероятно, более правильным является предположение Лонга и др. (1983), развитое далее Стикландом и др. (1984), о существовании в системе горячей зоны возле поверхности O-звезды, обращенной к WR-компоненту (см. рис. 21 из работы Стикланда и др., 1984). Возникающая в результате взаимодействия звездных ветров WR и O-компонента эта горячая зона ответственна только за дополнительный блеск L_* (см. главу 2), изменяющийся с фазой орбитального периода и с течением времени, а в период разбухания WR-оболочки пропадающий вследствие полного его рассеяния. За искажения моментов вторичного минимума вне “аномальных областей” ответственно поглощение, создаваемое газовым уплотнением в WR-оболочке, располагающимся возле WR-

звезды со стороны L_2 . Внутри “аномальных областей” на эти искажения налагаются дополнительные, обусловленные сильным поглощением в фазах за вторичным минимумом, создаваемым газом, выброшенным из O-компонента при сближении звезд на эллиптической орбите (кривые блеска июля-августа 1937 г. и августа-сентября 1938 г. (Курочкин, 1979), кривые блеска системы, полученные Демирканом и др. в 1995-1996 гг. (Демиркан и др., 1997)). Эти последние поглощения следует отличать от ложных, отмечаемых также за вторичным минимумом блеска (Гусейнзаде, 1969; Карташева, 1976; Харвиг, 1987), и обусловленных наложением наблюдений разных ночей в период усиления активности WR-компонента (Карташева, 1987).

Исправление (O-C₁) и (O-C₂)-диаграмм за движение линии апсид, а (O-C₂) еще и за искажение наблюдаемых моментов вторичного минимума околозвездным газом, привело в хорошее согласие (O-C₁)_{испр.} и (O-C₂)_{испр.}-диаграммы системы (см. рис. 3а работы Карташевой и Свечни-

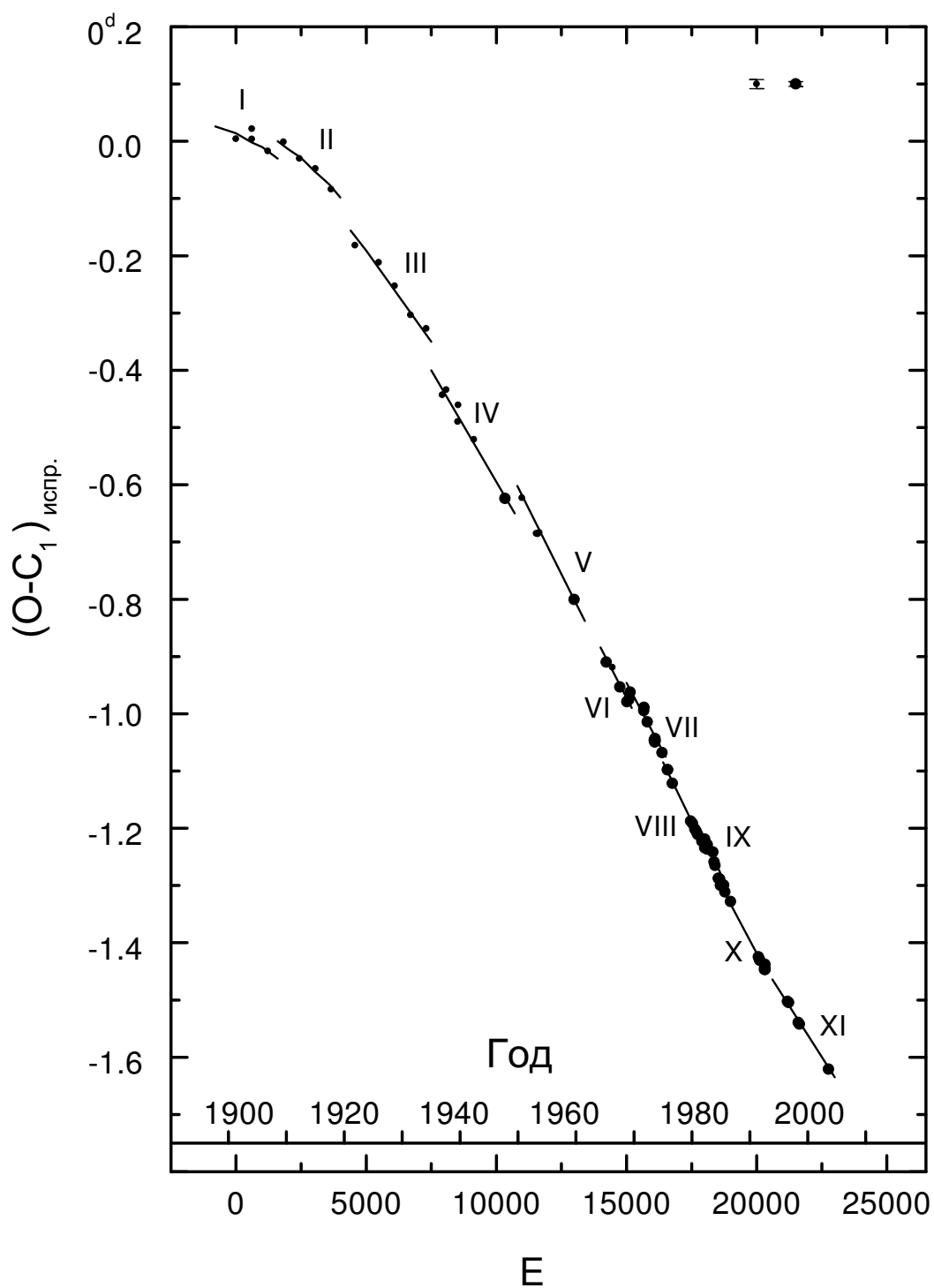


Рис. 3: $(O-C_1)_{\text{испр.}}$ -диаграмма CQ Сер, полученная после исправления $(O-C_1)$ -разностей за движение линии апсид. $(O-C_1)$ -уклонения вычислялись с использованием формулы: $T_{\text{minI}}(J.D.) = 2415500^{\text{d}}.780 + 1^{\text{d}}.641323 \cdot E$. Результаты фотографических наблюдений представлены точками, фотоэлектрических — заполненными кружками. Линиями дано теоретическое представление выделенных ветвей отрезками парабол.

Таблица 3: Временные характеристики одиннадцати ветвей, выделенных на $(O-C_1)_{испр.}$ -диаграмме CQ Ser

Номер ветви	E(нач.) E(кон.)	JD(нач.) JD(кон.) (2400000 ^d + ...)	Годы	Длительность ветвей (в годах)
I	0	15500 ^d 780	1901.32	
	1219	17502.391	1906.08	>4.76
II	1828	18501.107	1909.53	
	3656	21501.366	1917.75	>8.22
III	4570	23001.441	1921.85	
	7311	27500.174	1934.17	>12.32
IV	7921	28501.266	1936.91	
	10331	32456.668	1947.74	>10.83
V	10985	33530.091	1950.68	
	12988	36817.474	1959.68	>9.00
VI	14222	38842.756	1965.22	
	15089	40265.718	1969.12	>3.90
VII	15148	40362.570	1969.38	
	16367	42363.242	1974.86	>5.48
VIII	16576	42706.249	1975.80	
	18008	45056.495	1982.24	>6.44
IX	18011	45061.433	1982.25	
	18407	45711.353	1984.03	>1.78
X	18532	45916.497	1984.59	
	20335	48872.363	1992.68	>8.09
XI	21183	50267.432	1996.60	
	22762	52858.962	2003.60	>7.00

кова, 1989). Вместе с тем было отмечено, что сводная $(O-C_{1(2)})_{испр.}$ -диаграмма распалась на ряд ветвей. В настоящей работе мы провели более тщательное исследование эффекта ветвистости. Для этого мы ограничились рассмотрением только $(O-C_1)_{испр.}$ -уклонений (см. рис.3), так как $(O-C_2)_{испр.}$ -разницы показывают больший разброс. В табл.3 содержатся временные характеристики одиннадцати выделенных ветвей (примерное время начала и конца ветвей, их продолжительность). E — число циклов, прошедших от начальной эпохи $T_0 = 2415500^d.780$ при $P=1^d641323$.

На рис.4 $(O-C_1)_{испр.}$ -диаграмма CQ Ser сопоставлена с результатами фотометрических и поляриметрических исследований системы: с оценками Δm_{\max}^* , характеризующими нестабильность блеска системы от цикла к циклу (см. табл.1), а также с оценками среднего уровня кривых линейной поляризации системы \bar{P} . Последние представлены в табл. 4. Для ранних низкоточных измерений поляризации CQ Ser, не обнаруживающих ее изменений с фазой орбитального периода, даны средние за время наблюдений оценки \bar{P} (наблюдения Хилтнера (1950,1951), Домбровского и Новоцадовой (1953), Шаховского (1964)).

Из сводного рис. 4 видно, что:

1) появление V и XI ветвей на $(O-C_1)_{испр.}$ -диаграмме системы сопровождалось резким повышением степени поляризации излучения системы и резким ростом амплитуды ее поляризационной кривой (наблюдения Домбровского и Новоцадовой (1953), наблюдения 1994 года Карташевой и др. (1998));

2) появление VI, VII, VIII и IX ветвей совпало с резким повышением нестабильности блеска системы от цикла к циклу ($\Delta m_{\max}^* > 0^m.08$) (наблюдения 1964 г. Гусейнзаде (1969), наблюдения 1969 и 1975 гг. Карташевой (1972, 1976), наблюдения 1982 г. Харвига (1987));

3) оценка $(O-C_1)_{испр.}$, приходящаяся на начало IV ветви, получена по кривой блеска системы с резко (в 2 раза) заниженной амплитудой (наблюдения июля-августа 1937 г., Курочкин (1979)). Наблюдения июня 1980 – мая 1981 г. Антохиной и др. (1982), давшие кривые блеска в 1.5 раза меньшей амплитуды, чем обычные кривые блеска CQ Ser, непосредственно предшествовали образованию IX ветви.

Из всего вышеизложенного следует, что ветви, обнаруженные на $(O-C_1)_{испр.}$ -диаграмме системы,

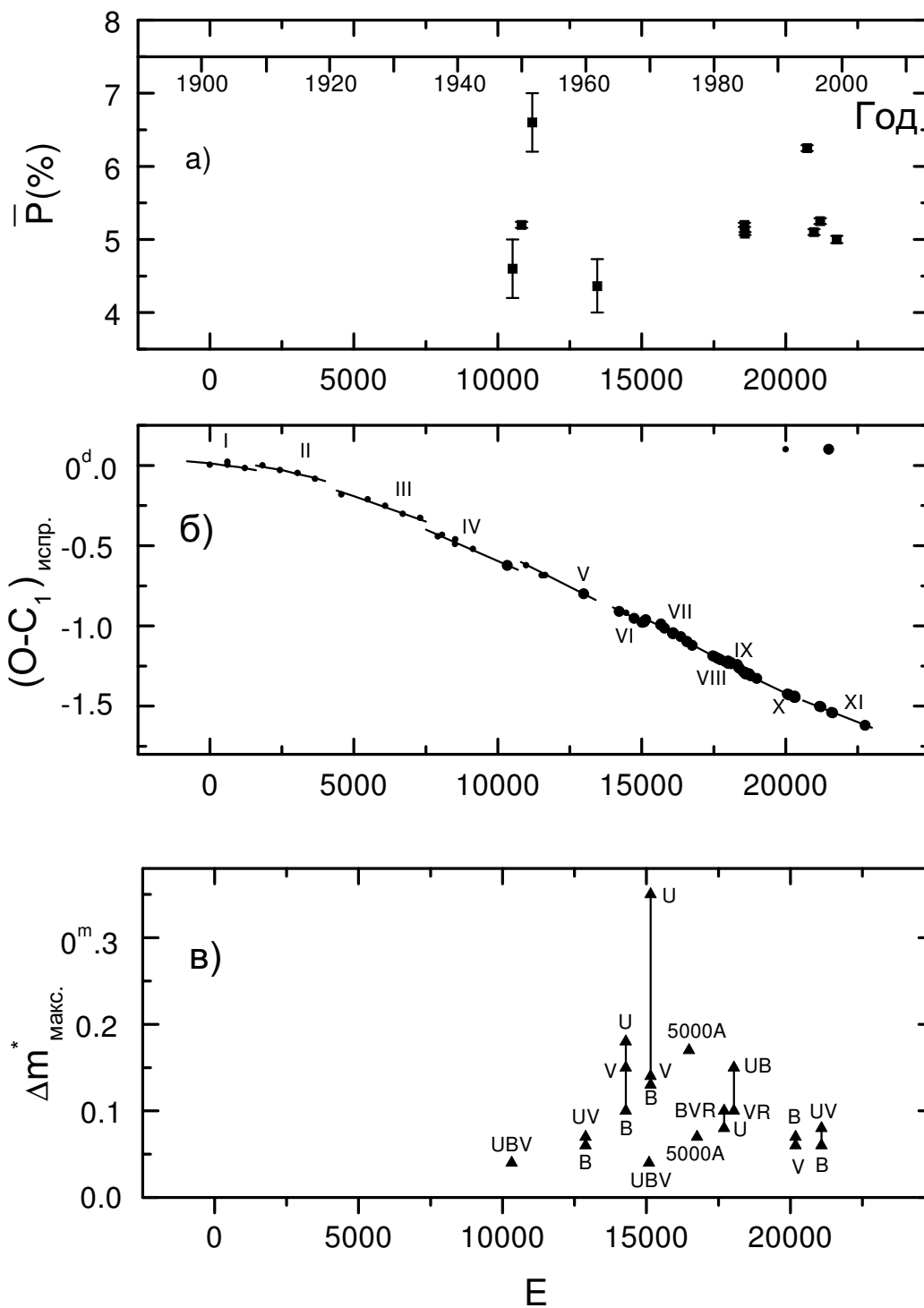


Рис. 4: Сопоставление $(O - C_1)_{испр.}$ -диаграммы *CQ Ser* с результатами поляриметрических и фотометрических исследований системы: а) — оценки средних уровней кривых линейной поляризации *CQ Ser* (\bar{P}) (результаты наблюдений 1948–1999 гг.); б) — $(O - C_1)_{испр.}$ - диаграмма системы; в) — оценки $\Delta m_{макс.}^*$, характеризующие нестабильность блеска системы от цикла к циклу (результаты фотоэлектрических наблюдений системы 1947–1996 гг.)

Таблица 4: Оценки среднего уровня кривых линейной поляризации CQ Сер

$\overline{J.D.}$	\bar{E}	\bar{P} (%)	Ссылка
2432755	10512	4.6	Хилтнер, 1950
2433266	10824	5.2	Хилтнер, 1951
2433875	11195	6.6	Домбровский и Новочадова, 1953
2437580	13452	4.36	Шаховской, 1964
2445974	18566	5.2	Дриссен и др., 1986
2446005	18585	4.99	Пиирола и Линналоото, 1988
2449549	20744	6.25	Карташева и др., 1998
2449940	20983	5.1	Харриес и Хилдитш, 1997
2450289	21195	5.25	Карташева и др., 1998
2451240	21775	5.0	Карташева и др., 2000

реальны и отражают вхождение WR-компонента в состояние повышенной активности. Результаты поляриметрических исследований (Карташева и др., 1998) позволяют выделить в этом состоянии две фазы. Первая — фаза разбухания WR-оболочки — характеризуется:

- 1) резким повышением амплитуды кривой поляризации системы, отражающим рост электронной концентрации во внутренних частях оболочки;
- 2) резким повышением среднего уровня поляризационной кривой CQ Сер, отражающим, вероятно, рост концентрации частиц и мелких пылинок во внешних частях оболочки;
- 3) резким уменьшением (в 1.5 – 2 раза) амплитуды кривой блеска системы, что, вероятно, связано с существенным или полным рассеянием распухшей оболочкой излучения горячей зоны вблизи поверхности O-звезды.

За фазой разбухания WR-оболочки следует вторая фаза — фаза сброса самых внешних ее слоев, длящаяся около 1,5 – 2 лет.

1. Амплитуда и средний уровень поляризационной кривой системы возвращаются примерно к прежним оценкам, что свидетельствует о восстановлении значений электронной плотности во внутренних частях оболочки и концентрации частиц и мелких пылинок во внешних ее частях.

2. На кривой поляризации CQ Сер появляется аномалия — пропадает первый максимум (O-звезда впереди), что, вероятно, связано с резким поярчением O-компонента (ростом вклада неполяризованного света, ведущим к падению степени поляризации системы).

3. Кривая блеска системы восстанавливает свою обычную амплитуду ($\geq 0^m 4$) и становится резко нестабильной от цикла к циклу ($\Delta m_{\text{макс}}^* > 0^m .08$).

4. Естественным следствием поярчения O-

компонента должно быть появление в спектре системы его абсорбций. Действительно, наши спектры CQ Сер 1981–1982 гг., полученные после фотометрических наблюдений Антохиной и др. (1982), результаты которых свидетельствовали о вхождении системы в период повышенной активности WR-компонента, показали O-абсорбции. Подробнее об этом будет сказано в главе 4.

Имеющиеся наблюдения не дают, однако, однозначного ответа на вопрос, с какой именно фазой повышенной активности WR-звезды связано образование новой ветви на (O-C)–диаграмме системы. Нужны дополнительные многосторонние и, желательно, синхронные наблюдения CQ Сер.

Чем же обусловлен общий ход (O-C)_{испр.}-диаграммы CQ Сер? Представляет ли ее форма отрезок выпуклой параболы, то есть отражает вековое уменьшение орбитального периода системы, или же это фрагмент долгопериодического гармонического колебания, обусловленного движением “WR+O”–пары вокруг центра тяжести тройной системы?

Разные варианты первой возможности были изучены нами в упомянутых уже работах Карташевой и Свечникова (1989, 1991), а также в работах Антохиной и др. (1982, 1987), Уокера и др. (1983), Крейнера и Тремко (1983, 1985). Однако интерпретация общего хода (O-C₁₍₂₎)_{испр.}-диаграммы CQ Сер как следствия векового уменьшения ее орбитального периода предполагала перетекание массы от более массивного компонента к менее массивному, а следовательно, требовала, чтобы масса WR-компонента превышала массу O-звезды ($q = m_{WR}/m_O > 1$). Наши же спектроскопические исследования системы, выполненные по спектрам, полученным в 1981–1982 гг. и показавшим уверенное присутствие абсорбций O-спутника, дали $q = m_{WR}/m_O = 0.83$ (Карташева

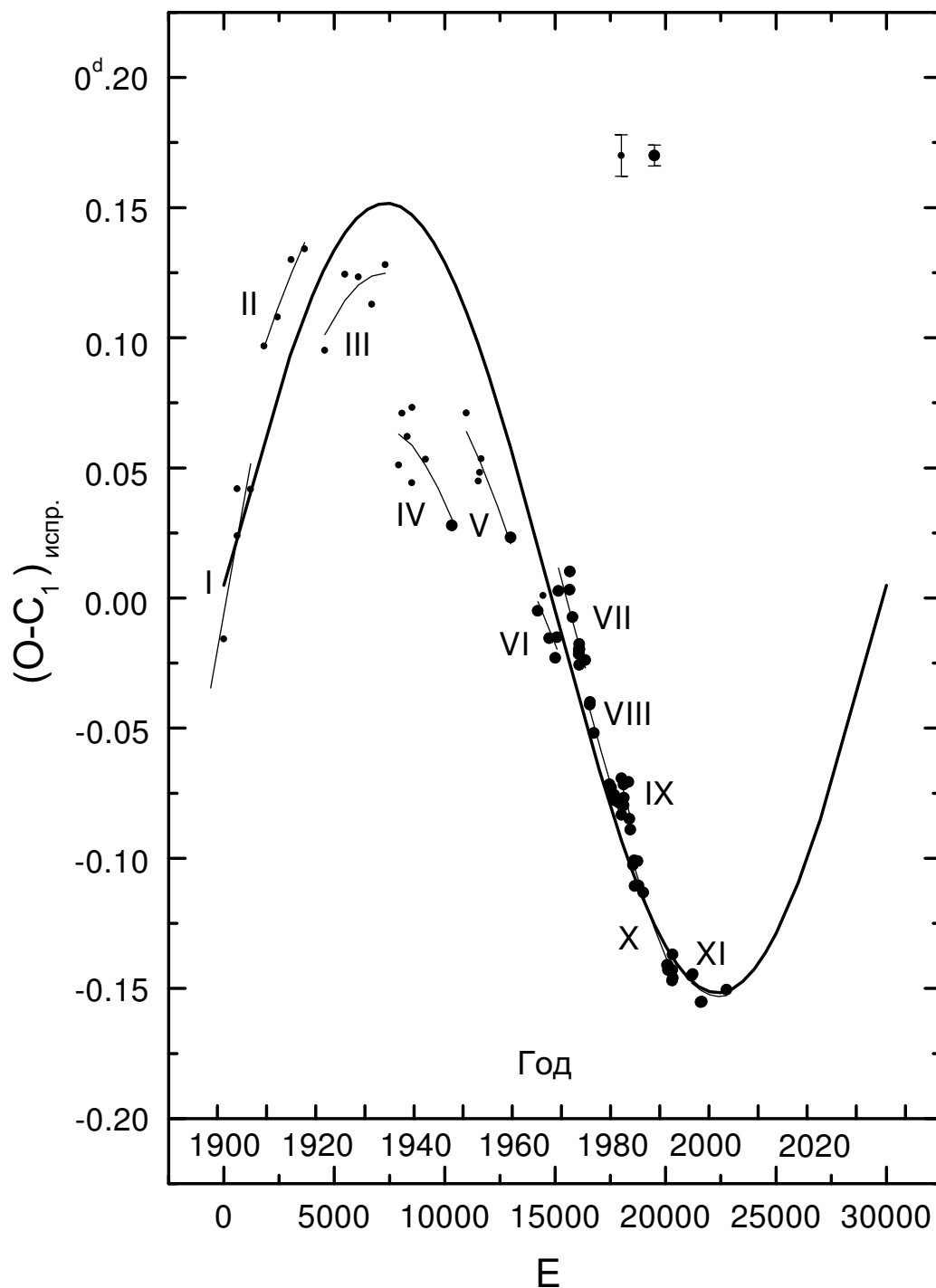


Рис. 5: $(O-C_1)_{\text{испр.}}$ -диаграмма CQ Сер, полученная после исправления $(O-C_1)$ -уклонений за движение линии апсид. $(O-C_1)$ -разности вычислялись с использованием формулы $T_{\text{мин. 1}} = 2415500^{\text{d}}800 + 1^{\text{d}}641258 \cdot E$, содержащей уточненные значения начальной эпохи и орбитального периода системы. Результаты фотографических наблюдений представлены точками, фотоэлектрических — заполненными кружками. Жирной линией дано теоретическое представление диаграммы косинусоидой, тонкими линиями — теоретическое представление ветвей отрезками парабол.

и Снежко, 1985б), то есть обратное соотношение масс компонентов. Последний результат долго и упорно отвергался именно из-за возникающей трудности в интерпретации общего хода (O-C)-диаграммы системы. Наши вычисления показали, что при $\dot{P} < 0$ и $m_{WR}/m_O=0.83$ для потока массы от O-звезды к WR-компоненту (\dot{m}_O), вводимого наряду с радиально-симметричным истечением материи из WR-звезды ($\dot{m}_{WR}^{(1)}$) и потоком от WR-звезды к O-компоненту ($\dot{m}_{WR}^{(2)}$), должно выполняться соотношение $\dot{m}_O > \dot{m}_{WR}^{(2)} + 1.77\dot{m}_{WR}^{(1)}$. Последнее приводило к очень высокому темпу перетекания массы от O-звезды к WR-компоненту ($\dot{m}_O=(0.6 \div 2.4) \times 10^{-4} m_\odot$ в год), что представляется маловероятным.

Вторая возможная интерпретация общего хода (O-C₁₍₂₎)_{испр.}-диаграммы CQ Сер была рассмотрена нами недавно (Карташева и Свечников, 2000). На рис.5 приведена (O-C₁)_{испр.}-диаграмма системы, подсчитанная с уточненными значениями начальной эпохи ($T_0=2415500^d800$) и орбитального периода системы ($P=1^d641258$), полученными в упомянутой выше работе вместе с выражением для гармонического колебания (O-C₁)_{испр.}-уклонений, обусловленного движением пары вокруг центра тяжести тройной системы ($((O-C_1)_{испр.} = 0^d1517 \cos(0^o012 \cdot E + 271^o830)$). В табл.5 приведены параметры долгопериодической орбиты (P' — период, a' — радиус, β — угловое расстояние между третьей звездой и “WR+O”-парой), оценка массы и спектрального класса третьей звезды (m_3 , Sp₃).

Таблица 5: *Параметры долгопериодической орбиты CQ Сер*

P' (годы)	134.9
a' (км)	4.56×10^9 (30.4 а.е.)
β''	0.008
m_3 (m_\odot)	17.2
Sp ₃	B0 V – B1 IV

Определенности в интерпретации общего хода (O-C)-диаграммы CQ Сер не было, и ответственность системы рассматривалась как весьма вероятная. Исследованное в той же работе (Карташева и Свечников, 2000) поведение со временем γ -скорости системы не отрицало возможности вхождения “WR+O”-пары в тройную систему, но и не давало окончательного решения вопроса, так как амплитуда вариаций γ -скорости CQ Сер мала и сравнима с ошибками определения лучевых скоростей (см. табл.3 и рис. 5 из работы Карташевой и Свечникова, 2000). К насто-

ящему времени ситуация изменилась. Самая последняя оценка момента главного минимума CQ Сер, полученная в 2003 году Масиежевски и Карска (2004) (см. рис.5), свидетельствует об уверенном повороте вправо (O-C₁)_{испр.}-диаграммы системы, что говорит в пользу циклического колебания (O-C₁)_{испр.}-разностей.

На рис.6 представлена диаграмма остаточных уклонений (O-C₁)^{*}, полученная после вычитания из (O-C₁)_{испр.}-разностей их гармонического колебания, связанного с движением “WR+O”-пары по долгопериодической орбите. Представление каждой из одиннадцати ветвей диаграммы остаточных уклонений линейной формулой (O-C₁)_i^{*} = $\Delta T_{0i} + \Delta P_i \cdot E$ (i — номер ветви) дало сведения о сдвигах нуля-пункта отсчета фаз (ΔT_{0i}) и скачкообразных изменениях орбитального периода системы (ΔP_i), обусловленных выбросами материи. Результаты исследования (O-C₁)^{*}-диаграммы системы приведены в трех первых столбцах табл.6. В четвертом столбце таблицы представлены относительные изменения орбитального периода ($\Delta P_i/P$). Из данных табл. 6 видно, что поправки ΔT_{0i} лежат в пределах от -0^d1734 до $+0^d1661$. Они связаны с одинаковыми для моментов главного и вторичного минимумов искажениями околосредной газовой средой, которые скачкообразно изменяются от ветви к ветви и уничтожаются в разностной [(O-C₂)-(O-C₁)]-диаграмме CQ Сер. Скачки орбитального периода системы значительны. Это позволило нам сделать предположение о том, что выброс материи происходит в плоскости орбиты перпендикулярно к линии центров звезд с фронтальной или с тыловой части одного из компонентов. Для прояснения картины на рис.7 мы сравнили (O-C₁)^{*}-диаграмму CQ Сер с (O-C₁)-диаграммой CX Сер (Курочкин, 1985) — чуть менее тесной, чем CQ Сер, затменно-двойной типа Вольфа-Райе ($P=2^d13$, $V=12^m.5$, WN6 + O8 V), а также с диаграммой остаточных уклонений (O-C₁₍₂₎)^{*}V444 Cyg ($P=4^d21$, $V=8^m.3$, WN5+O6), полученной после вычитания из ее (O-C₁₍₂₎)-диаграммы параболического хода разностей, связанного с вековым возрастанием орбитального периода системы (см. Приложение 2). Из сопоставления рис. 7а, 7б, 7в видно, что разбросы на (O-C₁)^{*}-диаграмме CQ Сер и (O-C₁)-диаграмме CX Сер близки по величине, что может служить и косвенным подтверждением ответственности CQ Сер, и не исключает возможной ветвистости (O-C₁)-диаграммы CX Сер — этой очень слабой и трудной для наблюдений системы. Разброс на (O-C₁₍₂₎)^{*}-диаграмме V444 Cyg — вдвое более широкой “WR+O”-пары — на порядок меньше, чем на двух верхних диаграммах (см. рис. 7) и составляет $\approx \pm 0^d02$, что не допускает

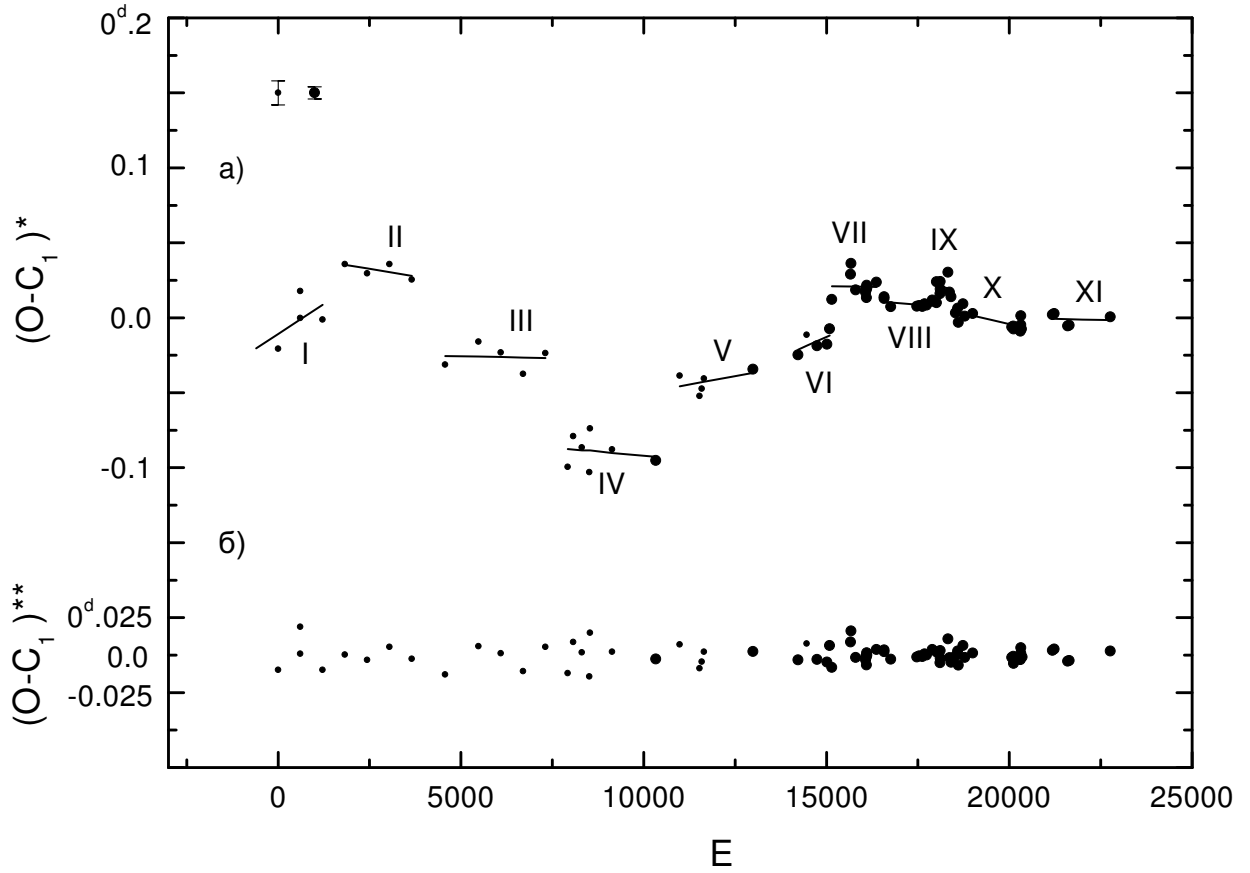


Рис. 6: Диаграмма остаточных уклонений $(O-C_1)^*$ CQ Сер, полученная после вычитания из $(O-C_1)_{испр.}$ -диаграммы гармонического колебания разностей — а). Линиями дано теоретическое представление ветвей. В нижней части рисунка представлена диаграмма итоговых остаточных уклонений $(O-C_1)^{**}$, полученная после устранения ветвистости на $(O-C_1)^*$ -диаграмме — б). Результаты фотографических наблюдений представлены точками, фотоэлектрических — заполненными кружками.

Таблица 6: Результаты анализа диаграммы остаточных уклонений $(O-C_1)^*$ CQ Сер

Номер ветви	ΔT_{0i}	ΔP_i ($\times 10^{-5}$)	$\Delta P_i/P$ ($\times 10^{-5}$)	$\Delta m_{O_i}(m_{\odot})$ ($\times 10^{-5}$)
I	-0 ^d 0108	1 ^d 60	0.97	61.0
II	+0.0426	-0.40	-0.24	2.1
III	-0.0232	-0.05	-0.03	0.3
IV	-0.0708	-0.21	-0.13	1.1
V	-0.0952	0.45	0.27	17.0
VI	-0.1734	1.11	0.67	42.2
VII	+0.0249	-0.03	-0.02	0.2
VIII	+0.0403	-0.18	-0.11	1.0
IX	+0.1661	-0.80	-0.49	4.3
X	+0.1078	-0.56	-0.34	3.0
XI	+0.0116	-0.06	-0.04	0.3
				132.5
				1.3

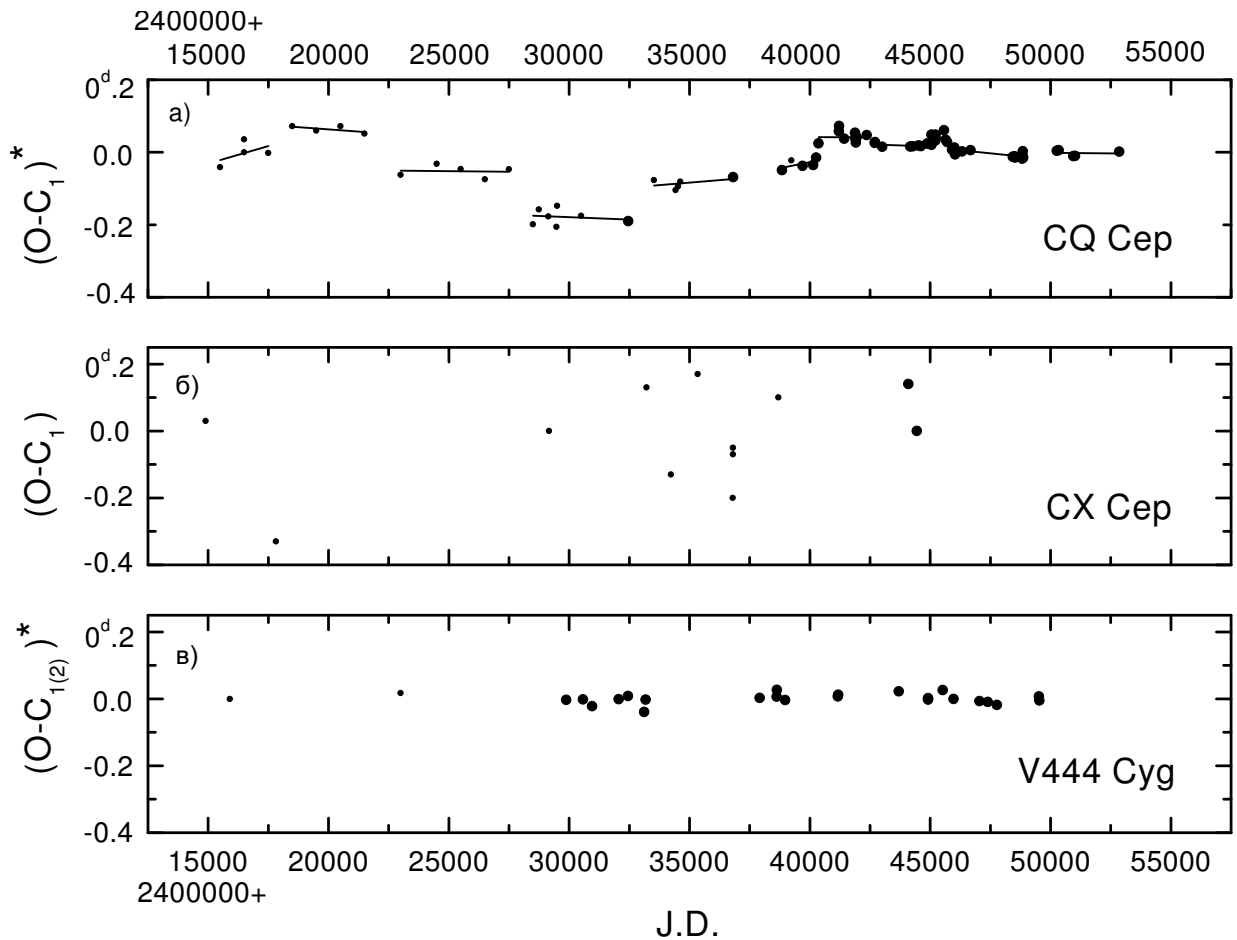


Рис. 7: Сопоставление диаграммы остаточных уклонений $(O-C_1)^*$ CQ Cep (а) с $(O-C_1)$ -диаграммой CX Cep (б) и с диаграммой остаточных уклонений $(O-C_{1(2)})^*$ V444 Cyg (в), полученной после вычитания из ее $(O-C_{1(2)})$ -диаграммы параболы параболы хода разностей. Результаты фотографических наблюдений представлены точками, фотоэлектрических наблюдений — заполненными кружками.

ее ветвистости. Отсюда можно сделать некоторые заключения о причинах выбросов из очень тесных “WR+O” — двойных систем, приводящих к ветвистости их $(O-C)$ -диаграмм. Очевидно, что в этих системах O-компонент заполняет или близок к заполнению своей внутренней критической полости Роша, и плавное перетекание материи из WR-компонента к O-звезде, которое мы наблюдаем у более широкой V444 Cyg, здесь невозможно. Добавив к этому то, что результаты и поляриметрии, и спектральных исследований CQ Cep говорят о резких изменениях в плотности оболочки, прежде всего вокруг O-компонента, можно предположить, что эпизодическое возрастание активности WR-компонента приводит к резкому разбуханию O-оболочки и последующим выбросам с фронтальной или тыловой частей O-звезды. В пятом столбце табл. 6 представлены оценки массы, выбрасываемой из O-компонента. При получении последних

использовалась формула Хуана (1956), описывающая быстрый выброс материи перпендикулярно к линии центров компонентов:

$$\Delta P/P = -2\Delta m_2/(m_1 + m_2) \pm \pm 3 \cdot [2\pi A^2(1 - e^2)^{1/2} V \Delta m_2] / [PG(m_1 + m_2)m_2],$$

где m_1 и m_2 — масса главной звезды и спутника, A — большая полуось относительной орбиты системы, e — эксцентриситет орбиты системы, V — скорость выброса материи.

В вычислениях использовалось наше решение самой низкоамплитудной кривой блеска CQ Cep (Карташева и Свечников, 1996), а также результаты наших спектроскопических исследований системы (Карташева и Снежко, 1985б)

$$(i = 59^\circ 5; A = 20.08 R_\odot, m_{WR} = 18.3 m_\odot, m_O = 22.05 m_\odot).$$

Скорость выброса материи (V) предполагалась равной 300 км/с. (Наиболее типичные скорости выброса $V=100 - 300$ км/с (Хуан, 1956).) Меньшие скорости приводили к $\Delta m_O < 0$ при выбросах с фронтальных частей O-спутника. В предпоследней строке пятого столбца табл. 6 представлена суммарная масса, выброшенная O-звездой за 100 лет, в последней строчке — оценка скорости потери массы O-спутником за год. Последняя оценка ($\Delta m_O = 1.3 \cdot 10^{-5} m_\odot$ в год) оказалась типичной для скорости потери массы WR-звездой и подтверждает наше предположение о том, что выброшенная материя поступала в O-оболочку от WR-компонента. Можно предполагать также, что ритмичность выбросов — примерно раз в десять лет (см. табл.3) — связана с пульсациями WR-звезды, возможность которых в последнее время все чаще обсуждается (см. работы Фадеева и Новиковой, 2003, 2004 и содержащиеся в них ссылки).

4. К проблеме видимости абсорбционных линий спутника в спектрах CQ Ser

Долгое время спектр CQ Ser считался одиночным (WN7 + O?). Функция масс, получаемая из решения кривой лучевых скоростей WR-компонента ($f(m) = 4.4 - 5.2 m_\odot$) (Хилтнер, 1944; Башпу и Висванадхам, 1977; Лонг и др., 1983; Стикланд и др., 1982, 1984), свидетельствовала о массивности системы. Уже в самых первых, низкодисперсионных ($D = 150 \text{ \AA}/\text{мм}$) спектрах CQ Ser, полученных и исследованных Мак Лафлином и Хилтнером (1941), были обнаружены абсорбции. Неправильное отождествление этих абсорбций с линиями спутника привело к ошибочной классификации его как звезды спектрального класса O7. Позже и Хилтнер (1944), и другие исследователи неоднократно отмечали, что все абсорбционные детали, обнаруживаемые в спектре системы, изменяют свои лучевые скорости в фазе с эмиссиями, то есть принадлежат самой WR-звезде. Выводы эти основывались на изучении спектров CQ Ser, полученных с дисперсией $40 \text{ \AA}/\text{мм}$ и ниже.

В 1980 году появилась очень краткая публикация Ниемелы (1980), содержащая вместе с кривой лучевых скоростей WR-компонента по эмиссии NIV $\lambda 4058 \text{ \AA}$ кривую, построенную по абсорбциям, измеренным на гребне эмиссии He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ и отнесенным автором к спутнику. При решении спектроскопических орбит компонентов системы Ниемела получила $q = m_{WR}/m_O = 1.21$. Несмотря на то, что результаты были получены по измерениям высокодисперсионных спектров CQ Ser ($D=15$ и $30 \text{ \AA}/\text{мм}$), они были встречены с яв-

ным недоверием. Во-первых, маловероятным показалось выделение абсорбций спутника, налагающихся на сильную эмиссионную полосу. Во-вторых, полученная по этой абсорбции γ -скорость ($\gamma_O = -220$ км/с) значительно превышала скорость галактического вращения на расстоянии CQ Ser (3.5 кпк), оцениваемую Андерхилл и др. (1990) в $-25 \text{ км/с} \div -65 \text{ км/с}$. К сожалению, более подробной публикации не последовало, и до сих пор не известно даже время получения Ниемелой этих спектров. Однако появился ряд работ (Мэсси, 1981; Антохина и др., 1982; Липунова и Черепашук, 1982; Черепашук, 1982), в которых авторы, используя полученное Ниемелой отношение масс компонентов, приходили к очень высоким оценкам массы WR-звезды ($31 m_\odot - 46 m_\odot$), ставящей ее в эволюционном плане в обособленное положение.

Наши высокодисперсионные ($D = 9 \text{ \AA}/\text{мм}$, $14 \text{ \AA}/\text{мм}$ и $28 \text{ \AA}/\text{мм}$) спектры CQ Ser были получены в августе, октябре 1981 года и августе 1982 года на II камере ОЗСП БТА. Журнал наблюдений и методика обработки спектров приведены в статье Карташевой и Снежко (1985а). Уже первый просмотр записей спектров, полученных в координатах остаточная интенсивность — длина волны, показал, что практически все эмиссионные линии в сильной степени искажены абсорбциями. Это очень хорошо видно на Рис.1 из работы Карташевой и Снежко (1985а), где на спектр CQ Ser наложен спектр одиночной звезды HD 191765 (WN6). Кроме того, значительная часть эмиссионных линий в спектре системы показала контур P Cug III типа (Билс, 1965). По этим причинам этапу позиционных измерений абсорбционных деталей спектра предшествовал этап восстановления эмиссионного контура линий. Подробно об этой процедуре, а также о методике позиционных измерений абсорбционных компонентов написано в работе Карташевой и Снежко (1985б)³ и диссертации Карташевой (1995). Тщательный анализ абсорбционного спектра CQ Ser

³ Историческая справка. Наши результаты спектроскопических исследований CQ Ser, к сожалению, были неоднозначны. Первый вариант, опирающийся на неверную интерпретацию абсорбционного спектра, был опубликован в *Астрономическом журнале* (Карташева и Снежко, 1985а). Позже абсорбционному спектру системы была дана более сложная и, на наш взгляд, более правильная интерпретация. На ее основе были выполнены повторные позиционные измерения абсорбционных деталей спектра CQ Ser, приведшие, в частности, γ -скорость O-спутника в хорошее согласие с γ_{WR} . Эти более совершенные результаты были доложены на совещании “Двойные звезды” в августе 1984 г. в Тбилиси и опубликованы в “Трудах совещания” (Карташева и Снежко, 1985б). Наиболее полно второй вариант наших спектроскопических исследований CQ Ser изложен в диссертации Карташевой (1995).

показал, что в спектре сосуществуют и переналагаются три системы абсорбционных линий: 1) абсорбции WR-звезды; 2) абсорбции, возникающие в WR-оболочке (P Cyg-абсорбции); 3) абсорбции спутника. Если в фазах первой половины периода благодаря большому различию лучевых скоростей компонентов системы (>200 км/сек) нам удалось выделить абсорбции O-спутника (H δ , H δ , He I λ 4472 Å, He II λ 4541 Å, H γ , H β , He II λ 5411 Å, He I λ 5875 Å, H α) (см. рис.2 работы Карташевой и Снежко (1985б)), то в фазах второй половины периода O-абсорбции, переместившись на синее крыло эмиссий, образовали неразрешимые бленды (шириной 12–15 Å) с абсорбциями WR-звезды. Нам помог случай — в спектре системы, полученном 1 августа 1982 г. (фаза 0^o:79), на λ 3889 Å (H δ , He I, He II) исчезли эмиссия и обе абсорбции WR-компонента, и на их месте появились три абсорбции O-спутника: He I λ 3872 Å, λ 3878 Å и H δ (см. рис. 8). Позиционные измерения последних дали единственную оценку лучевой скорости O-компонента в фазах второй половины орбитально-го периода системы.

Сейчас, после получения новых результатов, представленных в главе 3, появление в спектрах CQ Ser 1981 – 1982 гг. абсорбционных линий O-спутника вообще и описанной выше аномалии на λ 3889 Å не кажется случайностью. Наши спектральные наблюдения начались через три месяца после фотометрических наблюдений Антохиной и др. (1982), получивших UBV R -кривые блеска системы в 1.5 раза меньшей амплитуды, чем обычные ее кривые. Последнее свидетельствовало о том, что система находилась в первой фазе повышенной активности (см. главу 3). Полученные Стикландом и его коллегами в сентябре 1981 года кривые блеска CQ Ser (см. рис.1 из работы Стикланд и др., 1982) в видимой и ультрафиолетовой областях показали восстановление обычной амплитуды ($\geq 0^m.4$). Наблюдения Харвига (1987), выполненные в феврале – сентябре 1982 г. дали UBV R -кривые блеска системы с обычной амплитудой, но с завышенным разбросом оценок блеска от цикла к циклу ($\Delta m_{\text{макс.}}^* = 0^m.10 - 0^m.15$). Получить оценку $\Delta m_{\text{макс.}}^*$ для наблюдений Стикланда и его коллег было трудно, так как журнал наблюдений не опубликован, оценок блеска мало, хотя на полученной ими кривой блеска на λ 5200 Å виден разброс, превышающий $0^m.1$. Таким образом, и наблюдения Стикланда и др., и наблюдения Харвига свидетельствовали о том, что система в сентябре 1981 – сентябре 1982 гг. находилась во второй фазе повышенной активности — в фазе выброса материи. Переход ко второй фазе совершился, вероятно, вскоре после наблюдений Антохиной и ее коллег, где-то в июне-

июле 1981 г. Выбросы привели к падению плотности оболочки вокруг O-звезды и обусловили появление абсорбций спутника в спектрах системы. Наши наблюдения 1 августа 1982 г., отметившие аномалию на λ 3889 Å, были проведены, возможно, непосредственно во время очередного выброса материи. Вероятность этого усиливается тем, что в последующие две ночи в спектре системы продолжали появляться особенности. 2 августа (в фазе 0^o:42) мы наблюдали сильную эмиссию с двумя абсорбциями (фотосферной абсорбцией WR-звезды и P Cyg — абсорбцией) на λ 4254 Å (OII, SIII?). 3 августа (в фазе 0^o:995) эмиссия с P Cyg-абсорбцией пропала, а к оставшейся абсорбции WR-звезды на λ 4254 Å добавилась с красной стороны еще одна трудноотожествляемая абсорбция. Возможно, это линия SII λ 4259 Å, принадлежащая спутнику. В результате решения кривой лучевых скоростей WR-компонента, построенной по измерениям эмиссии NIV λ 4058 Å, и средней кривой лучевых скоростей O-спутника по линиям H, HeI и HeII (в предположении, что эксцентриситет орбиты системы $e=0$) мы получили спектроскопические элементы, представленные в работе Карташевой и Снежко (1985б). Мы еще вернемся к ним в конце этой главы.

Качественный анализ абсорбционного спектра спутника в сочетании с фотометрией отдельных линий дал нам оценку спектрального класса спутника O8.5–O9.5 (подробности см. в работах Карташевой и Снежко, 1985а,б). Линии O-спутника в спектре CQ Ser очень широкие (полуширина $b=4-5$ Å, что ведет к $V \sin i = 290 - 360$ км/с). Однако их ширина не может служить критерием для определения класса светимости O-звезды, так как последняя входит в тесную двойную систему, где скорости вращения компонентов и скорости их движения по орбите синхронизированы.

В 1990 году появилось спектроскопическое исследование CQ Ser, выполненное Андерхилл и др. (1990) по 22 ретиконным спектрам ($D=30$ Å/мм), полученным в 1986 – 1988 гг. на 1.83-м телескопе астрофизической обсерватории Доминиона. Основной целью исследования был поиск абсорбционных линий спутника. Именно поэтому была выбрана узкая спектральная область, “где спектр V0–O6-звезд содержит несколько изолированных и сильных абсорбционных линий (He II λ 5412 Å, He I λ 5876 Å), а эмиссионные линии WR-компонента менее сложны”. Обнаружить линии O-спутника Андерхилл и ее коллегам не удалось. Основная причина – выбор спектральной области исследования. Наш спектр CQ Ser, полученный в октябре 1987 года в области $\lambda\lambda$ 3600–6800 Å (фаза 0^o:265) (см. Рис.1 из работы Карташевой, 1996), тоже не показал абсорбций спут-

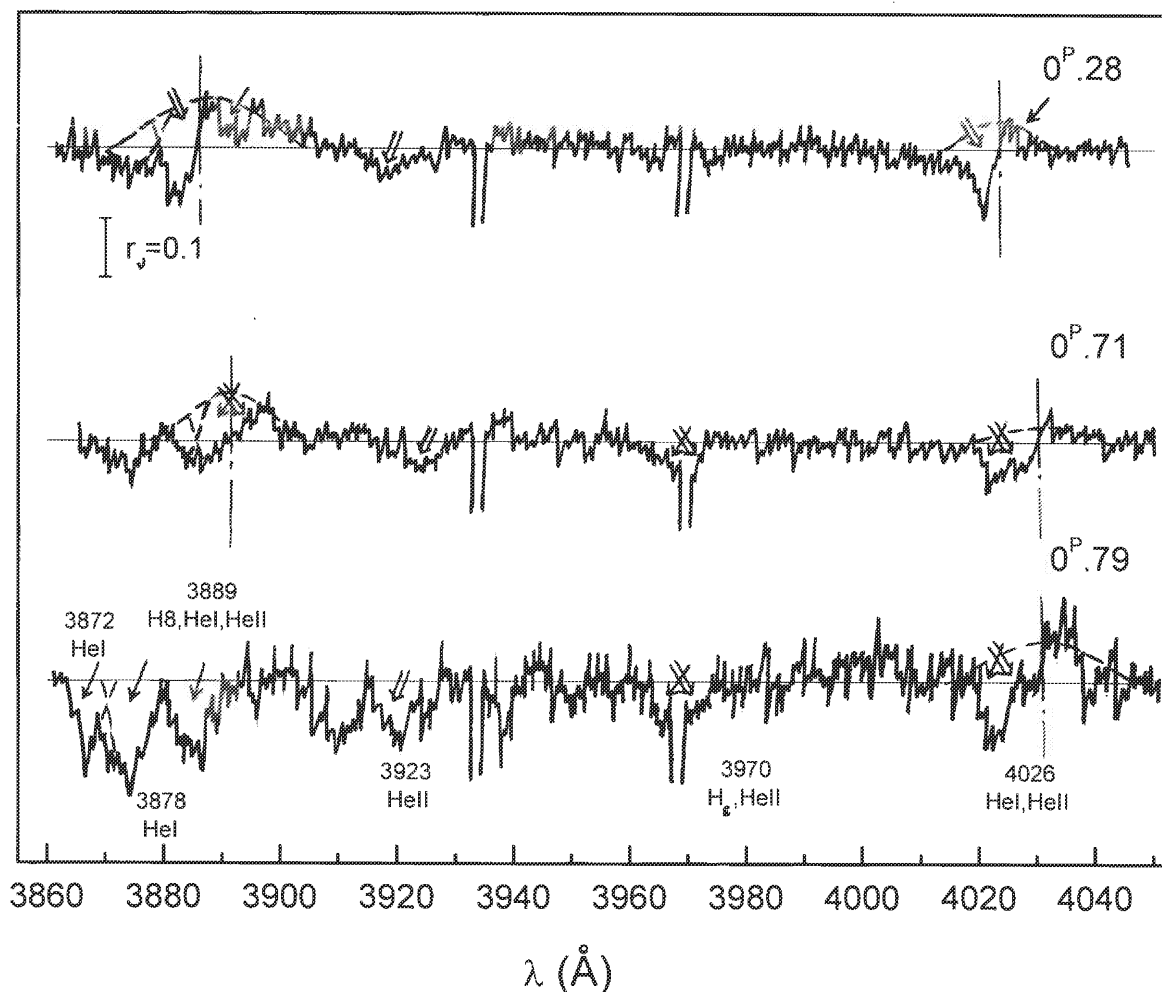


Рис. 8: Сравнение записей спектров CQ Сер ($\lambda\lambda$ 3850 – 4050Å), полученных в фазах $O^P.28$, $O^P.71$ и $O^P.79$. Стрелкой показано положение абсорбций O-спутника, широкой стрелкой — положение абсорбций WR-звезды. Жирной штриховой линией выделены P Суг-абсорбции.

ника в области $\lambda > 4472 \text{ \AA}$. Однако в синей области мы нашли четыре абсорбции спутника (H8, H δ , He II λ 4200 Å, He I λ 4472 Å). Ограничение узкой спектральной областью сказалось в работе Андерхилл и ее коллег и на интерпретации сложных абсорбционных комплексов, налагающихся на эмиссии. Абсорбционные компоненты этих комплексов трактовались ими как обусловленные проекциями на WR-ядро ряда струй. Наше спектроскопическое исследование CQ Сер, проведенное в более широкой спектральной области, включающей ближний ультрафиолет, показало наличие “чистых” WR-абсорбций, то есть абсорбций, не связанных с эмиссиями (см. рис. 9). Последние рассматривались нами, по аналогии с Of-звездами, как принадлежащие расширяющейся фотосфере WR-звезды. Один

из компонентов сложных абсорбционных комплексов, налагающихся на эмиссии, хорошо согласовался по лучевым скоростям с этими “чистыми” абсорбциями. Таким образом, этот абсорбционный компонент принадлежит самой WR-звезде и лишь накладывается на эмиссию. Второй абсорбционный компонент (с большим синим смещением) связан с WR-эмиссией и без нее не существует (P Суг-абсорбция).

К сожалению, Андерхилл была знакома только с первым, несовершенным вариантом наших спектроскопических исследований и отвергла наши результаты из-за слишком малого значения γ -скорости, полученного для O-компонента, — недостатка, который был преодолен во втором варианте (Карташева и Снежко, 1985б).

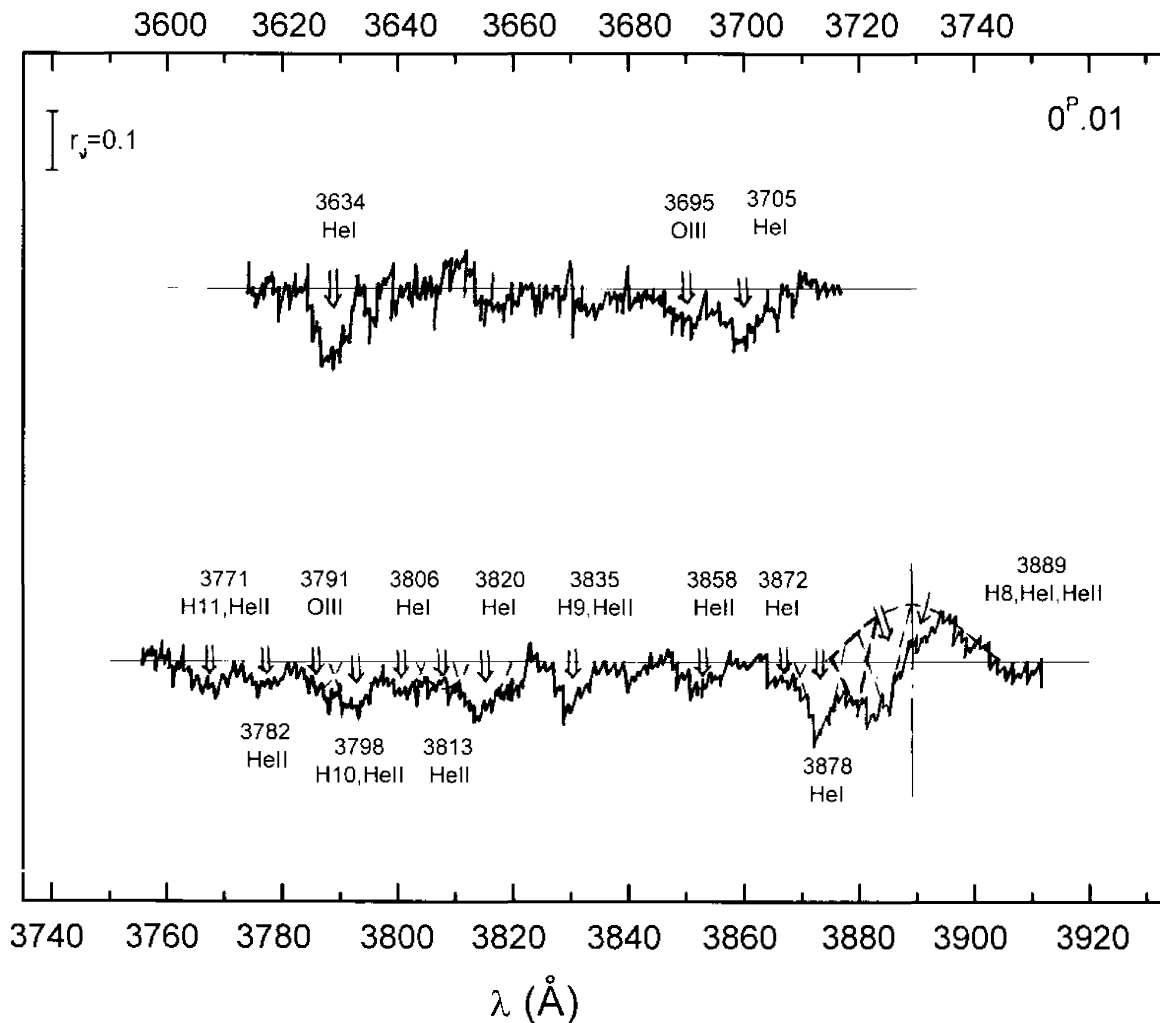


Рис. 9: Спектр CQ Сер в ближнем ультрафиолете. Стрелкой показано положение абсорбций O-спутника, широкой стрелкой — положение абсорбций WR-звезды. Жирной штриховой линией выделены P Cуг-абсорбции.

В 1995 г. были опубликованы результаты позиционных измерений CCD-спектров CQ Сер, выполненных Марченко и его коллегами (Марченко и др., 1995), а позже вышла статья Харриса и Хилдитш (1997), посвященная спектрополяриметрическим исследованиям системы, включающим и поиск абсорбций спутника. Результаты, полученные в этих работах, представляются нам ненадежными из-за недостаточно высокого разрешения использованного в них спектрального материала (1.5-3 Å). Вообще предпринятый в этих работах поиск абсорбций, показывающих антифазное движение по отношению к эмиссиям, для спектров CQ Сер не эффективен по двум причинам: 1) линейчатый спектр системы очень ослаблен добавками в континуум (блеском третьей

звезды (L_3^*), блеском WR-оболочки ($L_{WR\text{ обол.}}$), а также блеском горячей зоны вблизи поверхности O-звезды, обращенной к WR-компоненту (L_*) и по этой причине увидеть в спектре системы слабые абсорбции спутника практически невозможно; 2) сильные же O-абсорбции входят в сложные эмиссионно-абсорбционные комплексы, для выявления структуры которых требуется высокое разрешение ($R < 1 \text{ \AA}$). Даже при высоком разрешении абсорбции спутника в этих комплексах можно выделить и измерить лишь в первой половине орбитального периода, когда различие лучевых скоростей компонентов велико. Во второй половине O-абсорбции образуют неразрешаемые бленды с WR-абсорбциями. Именно по этой причине измерения лучевых скоростей по абсорбциям спутника

Таблица 7: Результаты позиционных измерений WR-эмиссии $NIV \lambda 4058 \text{ \AA}$ и абсорбций O-спутника H, He I, He II, Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$

Фаза	WR-эмиссии N IV $\lambda 4058 \text{ \AA}$	Лучевые скорости (км/сек)	
		H, He I, He II	O-абсорбции Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$
0:01	-81	0	
0.06	-223	+57	
0.10	-253	+81	
0.28	-319	+178	
0.34	-276	+148	
0.42	-163	+68	
0.45	-149	+28	
0.54	-18		-149
0.60	+109		
0.71	+211		
0.79	+244	-300	-314
0.87	+162		-228
0.88	+160		-214
0.88	+177		-250
0.95	+19		-119
0.995	-8		

Таблица 8: Уточненные спектроскопические элементы “WR+O”-пары CQ Cer

$K_{WR} = 292.3 \pm 9.7$ км/сек	$K_O = 251.9 \pm 13$ км/сек
$\gamma_{WR} = -55.4 \pm 7.7$ км/сек	$\gamma_O = -56.0 \pm 8.9$ км/сек
$q = m_{WR}/m_O = 0.86 \pm 0.06$	
$m_{WR} \sin^3 i = 12.7 m_\odot$	$m_O \sin^3 i = 14.7 m_\odot$
$A_{WR} \sin i = 9.5 R_\odot$	$A_O \sin i = 8.2 R_\odot$
$A \sin i = 17.7 R_\odot$	

где K_{WR} , K_O — полуамплитуды кривых лучевых скоростей компонентов,
 γ_{WR} , γ_O — γ -скорости компонентов,
 m_{WR} , m_O — массы компонентов,
 A_{WR} , A_O — радиусы орбит компонентов,
 A — радиус относительной орбиты системы ($A = A_{WR} + A_O$)

He I $\lambda 4472 \text{ \AA}$ и He I $\lambda 5876 \text{ \AA}$, выполненные Марченко и др. (1995) в фазах второй половины периода, представляются нам нереальными.

Теперь относительно измерений абсорбций спутника Si IV $\lambda 4089 \text{ \AA}$, $\lambda 4116 \text{ \AA}$ и He I $\lambda 4120 \text{ \AA}$ — в первой работе (Марченко и др., 1995) и He I $\lambda 4143 \text{ \AA}$ — во второй (Харрис и Хилдитш, 1997). В наших спектрах CQ Cer 1981-82 гг. He I $\lambda 4143 \text{ \AA}$ не присутствует ни в эмиссии, ни в абсорбции. Слабая эмиссия He I $\lambda 4120 \text{ \AA}$ иногда видна. Абсорбция O-спутника Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$, перемещающаяся, согласно исследованиям Марченко и др. (1995), по трем блендирующимся эмиссиям (He II $\lambda 4100 \text{ \AA}$, Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$ и He I $\lambda 4120 \text{ \AA}$), присутствует в наших спектрах CQ Cer. Однако точно измерить положение этой абсорбции труд-

но, особенно в фазах первой половины орбитального периода, когда она поочередно подавляет слабые эмиссии He I $\lambda 4120 \text{ \AA}$ и Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$. В фазах второй половины орбитального периода, когда абсорбция Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$ налагается в основном на красное крыло сильной эмиссии He II $\lambda 4100 \text{ \AA}$, ситуация улучшается. Наиболее надежно эта абсорбция измеряется тогда, когда она захватывает депрессию между эмиссиями He II $\lambda 4100 \text{ \AA}$ и Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$ и одновременно срезает верхушку эмиссии Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$ (фазы 0:54 и 0:95). В фазах же, близких ко второй элонгации (0:75 \pm 0:15), абсорбция Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$ на красном ее конце искусственно продлевается (на 2–3 \AA) гребнем эмиссии Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$, что приводит при измерениях к меньшим отрицательным лучевым скоростям.

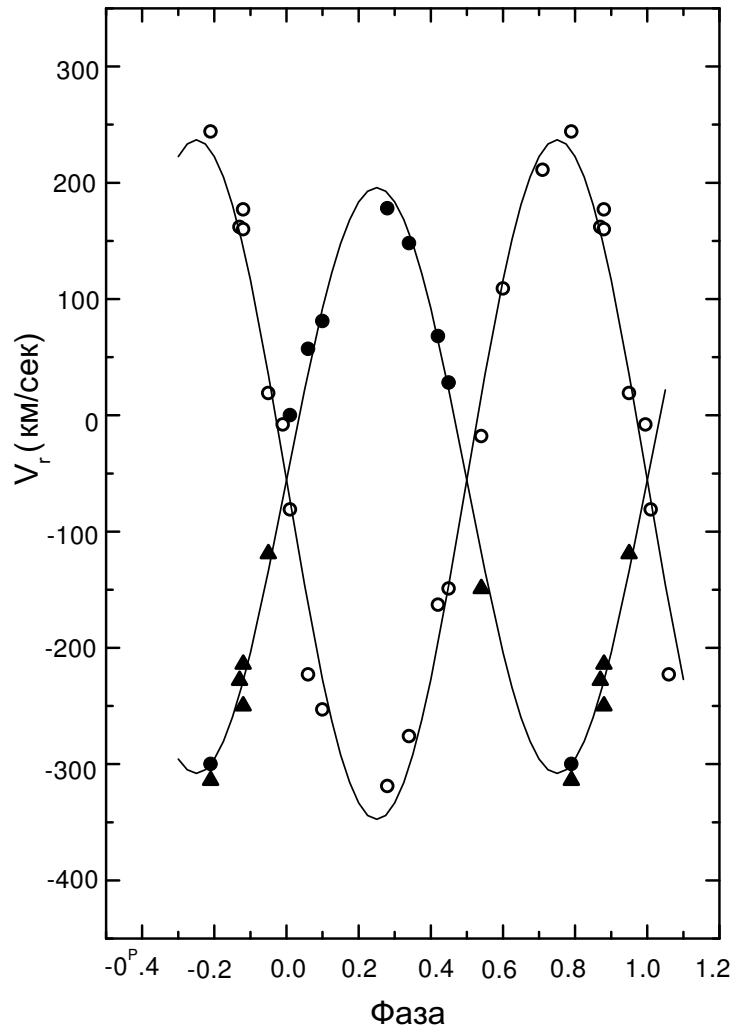


Рис. 10: Кривые лучевых скоростей WR-компонента по эмиссии NIV $\lambda 4058 \text{ \AA}$ (полые кружки), O-спутника по абсорбциям H, He I, He II (заполненные кружки) и абсорбции Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$ (заполненные треугольники). Линиями представлены теоретические кривые.

Только зная ширину O-абсорбций (8–10 \AA) и разделив эмиссионные бленды, можно правильно в этих фазах определить положение красного конца абсорбции Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$ и измерить точное ее положение. Вероятно, это возможно сделать только на спектрограммах высокого разрешения. Мы использовали открывшуюся возможность измерения лучевых скоростей O-спутника в фазах второй половины орбитального периода. В табл. 7 наши старые результаты позиционных измерений абсорбций O-спутника H, He I, He II и WR-эмиссии NIV $\lambda 4058 \text{ \AA}$ (Карташева, 1995) дополнены результатами новых измерений лучевых скоростей O-спутника по абсорбции Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$. На рис.10 показаны кривые лучевых скоростей компонентов, а в табл.8 собраны итоговые спектроскопические элементы “WR+O”-пары CQ Сер, следующие из

решения этих кривых. Как видно из табл. 7 и рис. 10, наша старая, единственная оценка лучевой скорости O-спутника в фазах второй половины орбитального периода ($0^{\text{p}}79$) хорошо согласовывается с новыми результатами.

Чтобы уверенно оценить класс светимости O-спутника “WR+O”-пары CQ Сер мы попытались отыскать в спектре системы абсорбцию O-спутника Si IV $\lambda 4089 \text{ \AA}$, которая в спектрах O-гигантов и сверхгигантов, согласно данным Конти и Алсшулера (1971), сильнее абсорбции Si IV $\lambda 4116 \text{ \AA}$. Увидеть эту линию в фазах первой половины орбитального периода, когда она налагается на сложный эмиссионно-абсорбционный комплекс, практически невозможно. Однако в фазах второй половины орбитального периода она должна быть хорошо видна, налагаясь на чи-

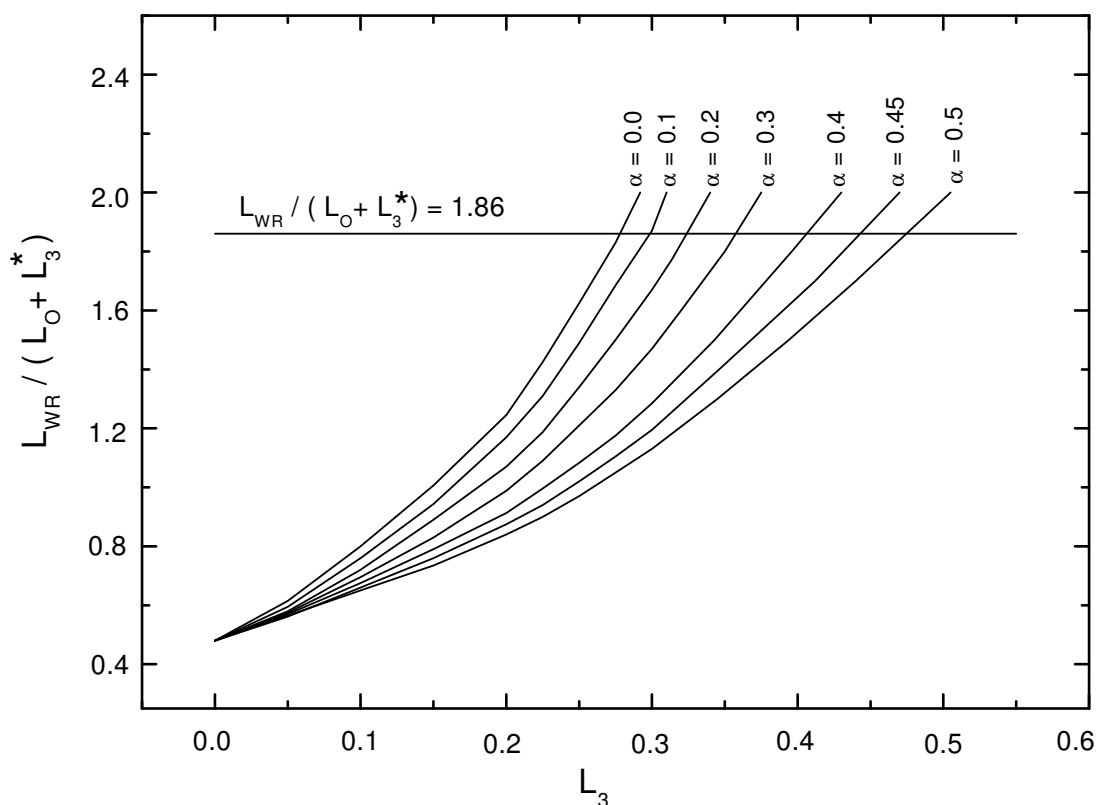


Рис. 11: Зависимости $L_{WR}/(L_O + L_3^*)$ от L_3 , полученные по данным Табл.2 из работы Карташевой и Свечникова (1996) для разных значений α — вклада блеска третьей звезды (L_3^*) в блеск L_3 . Прямая $L_{WR}/(L_O + L_3^*)=1.86$ — итог ревизии результатов спектрофотометрического исследования системы (данная статья).

стый континуум между эмиссиями N IV $\lambda 4058 \text{ \AA}$ и He II $\lambda 4100 \text{ \AA}$. Но там видны лишь ее следы в фазах 0:6 и 0:95. По этой причине мы не смогли уверенно отнести O-спутник к гигантам или сверхгигантам, и его класс светимости остается пока для нас под вопросом.

В заключение главы, вероятно, еще раз надо обратить внимание на то, что видимость абсорбций спутника изменяется и с длиной волны, о чем речь уже шла в данной главе и в главе 2, и со временем (Карташева, 1996). Первая зависимость обуславливается резким ростом с длиной волны блеска WR-оболочки, так как, помимо электронной, у системы имеется мощная газопылевая оболочка, свидетельством чему являются поляризационные исследования CQ Ser (Карташева и Свечников, 2003). Зависимость от времени связана с изменениями (и резкими, и плавными) плотности общей оболочки системы, о чем говорят опять-таки результаты наших поляризационных исследований системы (Карташева и др., 1998, 2000).

5. Ревизия относительных и абсолютных элементов “WR+O”-пары CQ Ser

До сих пор при решении кривой блеска системы июля–августа 1937 года (Карташева и Свечников, 1996) и при определении отношения блеска компонентов “WR+O”-пары из спектрофотометрических исследований системы (Карташева, 1996), мы приписывали третий блеск (L_3) свечению WR-оболочки ($L_{WR \text{ обол.}}$). Однако исследования (O-C)-диаграммы системы свидетельствуют о тройственности системы, и следовательно, блеск L_3 является суммой двух составляющих:

$$L_3 = L_{WR \text{ обол.}} + L_3^*,$$

где L_3^* — блеск третьей звезды.

Тогда формула для $q'_{\text{ЭМ}}$ — отношения блеска компонентов системы, определенного по эквивалентным ширинам эмиссионных линий (Карташева, 1996), — примет вид:

$$q'_{\text{ЭМ}} = (L_O + L_{*1981} + L_3^*)/L_{WR} = 0.85, \quad (1)$$

Таблица 9: Шесть возможных случаев расклада на составляющие полного блеска CQ Сер ($L_{WR} + L_O + L_3^* = 1$), возможные оценки абсолютной визуальной величины третьей звезды (M_{V3}) и ее спектрального класса (Sp_3).

α	L_3	L_3^*	$L_{WR\text{обол.}}$	$L_{WR\text{фот.}}$	L_{WR}	L_O	M_{V3}	Sp_3
0.1	0.295	0.030	0.265	0.380	0.645	0.320	-2 ^m 48	B2-B3 (V-IV)
0.2	0.320	0.060	0.260	0.385	0.645	0.295	-3.23	B1-B2 (V-IV)
0.3	0.355	0.110	0.245	0.395	0.635	0.255	-3.92	B0-B1 (V-IV)
0.4	0.407	0.160	0.247	0.400	0.647	0.185	-4.31	O9.5-B0 (V-IV)
0.45	0.440	0.200	0.240	0.407	0.647	0.147		
0.5	0.470	0.240	0.230	0.413	0.643	0.110		

Таблица 10: Уточненные относительные и абсолютные элементы "WR+O"-пары CQ Сер, полученные после учета тройственности системы

(при $L_{WR} + L_O + L_3^* = 1$):	(при $A = 1$):
$L_{WR} = 0.65$ ($L_{WR\text{фот.}} = 0.40$, $L_{WR\text{обол.}} = 0.25$)	$a_{WR\text{свет.}} = 0.56$, $a_{O\text{свет.}} = 0.54$
$L_O = 0.24$	$a_{WR\text{тем.}} = 0.35$, $a_{O\text{тем.}} = 0.43$
$L_3^* = 0.11$	
$L_{WR}/L_O = 2.7$	$J_{WR}/J_O = 1.55$
$M_{VWR} = -5^m84$ (Sp_{WR} : WN7)	
$M_{VO} = -4^m76$ (Sp_O : O9 \pm 0.5)	
$M_{V3} = -3^m92$ (Sp_3 : B0 - B1 (V-IV))	$A = 20.3 R_\odot$
	$a_{WR\text{свет.}} = 11.4 R_\odot$, $a_{O\text{свет.}} = 11.0 R_\odot$
$m_{WR} = 19.1 m_\odot$	$a_{WR\text{тем.}} = 7.1 R_\odot$, $a_{O\text{тем.}} = 8.7 R_\odot$
$m_O = 22.2 m_\odot$	
$m_3 = 17.3 m_\odot$	$A_{WR} = 10.9 R_\odot$, $A_O = 9.4 R_\odot$

где $L_{WR} = (L_{WR\text{фот.}} + L_{WR\text{обол.}})$ — блеск WR-звезды,

$L_{WR\text{фот.}}$ — блеск фотосферы WR-звезды,

$L_{WR\text{обол.}}$ — блеск оболочки WR-звезды,

L_O — блеск O-компонента,

L_{*1981} — блеск горячей зоны вблизи поверхности O-звезды, обращенной к WR-компоненту в наблюдениях 1981 года,

L_3^* — блеск третьей звезды,

а формула (2) той же работы преобразуется в

$$(L_{WR} + L_O + L_{*1981} + L_3^*) / (L_{WR} + L_O + L_3^*) = 1.202. (2)$$

Напомним, что формула (2) из работы Карташевой (1996) следует из сравнения амплитуд кривых блеска CQ Сер, полученных в 1937 и 1981 гг. ($L_{*1937} = 0$). Из уравнений (1) и (2) получаем:

$$L_{WR} / (L_O + L_3^*) = 1.86. (3)$$

Ниже рассмотрены шесть случаев конкретно вклада блеска третьей звезды (L_3^*) в блеск L_3 ($L_3^* = \alpha L_3$, $L_{WR\text{обол.}} = (1-\alpha) L_3$, где $\alpha = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45, 0.5$). Используя данные табл. 2 из работы Карташевой и Свечникова (1996), дающие решение кривой блеска CQ Сер 1937 года при

разных значениях L_3 для каждого из шести случаев были подсчитаны отношения $L_{WR} / (L_O + L_3^*)$ при разных значениях L_3 , и построены зависимости $L_{WR} / (L_O + L_3^*)$ от L_3 . На рис. 11 они представлены в сглаженном виде. Точки пересечения этих зависимостей с прямой $L_{WR} / (L_O + L_3^*) = 1.86$ дали шесть возможных решений, собранных в табл. 9 в четырех первых столбцах. В пятом и седьмом столбцах табл. 9 приводятся значения $L_{WR\text{фот.}}$ и L_O , снятые с графиков зависимостей $L_{WR\text{фот.}}$ от L_3 и L_O от L_3 (рис. 12), полученных также по данным табл. 2 из работы Карташевой и Свечникова (1996). Поскольку линии третьей звезды в спектре CQ Сер не видны, в то время как абсорции O-спутника иногда появляются, то естественно ограничение $L_O > L_3^*$. Отсюда следует, что вклад блеска L_3^* в L_3 не может превышать 40% ($\alpha = 0.4$).

Зная оценку абсолютной визуальной величины CQ Сер ($M_v = -6^m3$) (Стикланд и др., 1984) и используя данные табл. 9, мы нашли для четырех оставшихся случаев ($\alpha = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$) оценки абсолютной визуальной величины третьей звезды (M_{V3}) (восьмой столбец табл. 9). Далее, по уточненной зависимости $Sp - M_V$ Страйжиса и Кури-

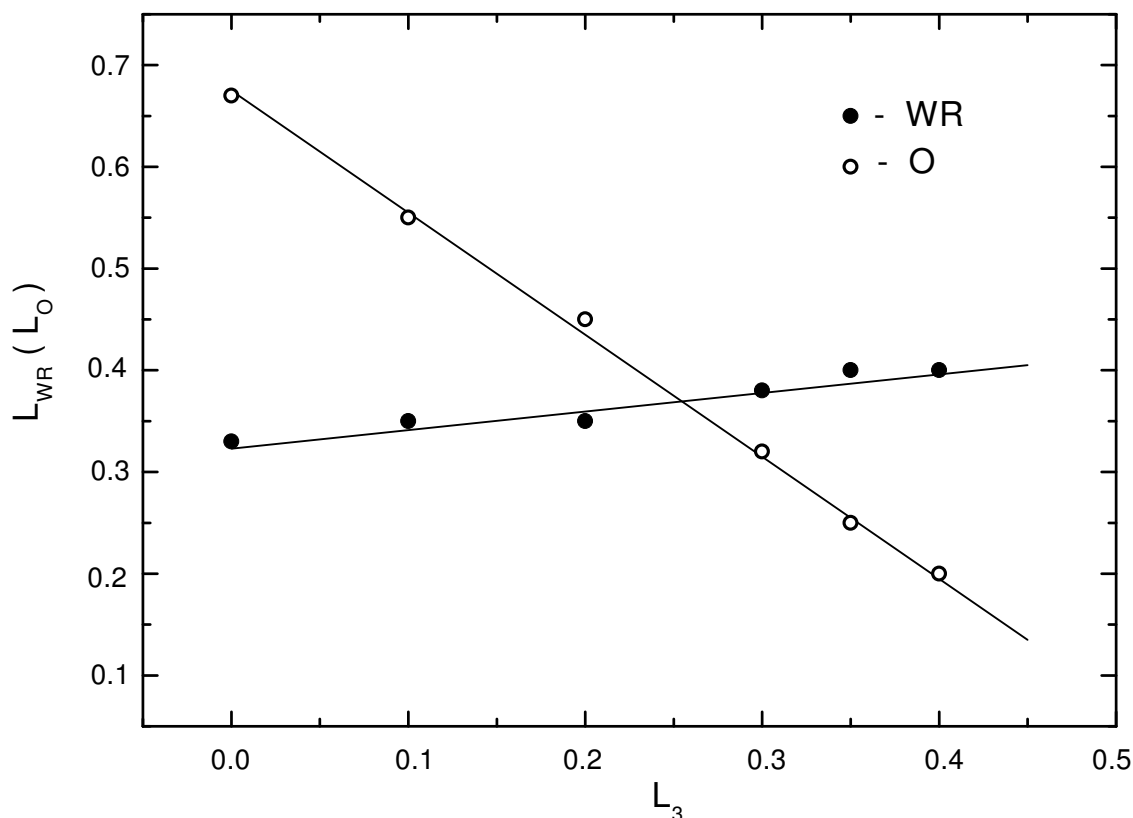


Рис. 12: Зависимости блеска WR-фотосферы и O-звезды от блеска L_3 , следующие из решений кривой блеска июля-августа 1937 г., полученных при разных значениях L_3 (Карташева и Свечников, 1996, Табл.2).

льене (1981), мы оценили спектральный класс третьей звезды (девятый столбец табл. 9). Как видно из табл.9 третий случай ($\alpha = 0.3$) дал наилучшее согласие с оценкой спектрального класса третьей звезды, полученной нами раньше при исследовании тройственности системы (см. табл.5). Итак, $\alpha = 0.3, L_3 = 0.36, L_3^* = 0.11, L_{WR\text{ обол.}} = 0.25$.

Эти новые результаты потребовали пересмотра решения кривой блеска CQ Сер июля-августа 1937 года (табл.2). Использование нового значения L_3 и табл. 2 из работы Карташевой и Свечникова (1996) привело нас к уточненным относительным элементам системы, представленным в верхней части табл.10. В нижней части табл.10 приведены уточненные абсолютные элементы системы, полученные с использованием результатов наших спектроскопических исследований (см. табл.8 данной работы). Все обозначения в табл. 10 те же, что и в табл. 2, 8 и 9.

6. Заключение

Итак, CQ Сер — обычная WR-двойная система с $q = m_{WR}/m_O < 1$, возникшая, вероятно, в про-

цессе “перемены ролей” в результате эволюции в случае В (Свечников и Снежко, 1974). Все ее загадки — следствие высокой степени тесности “WR+O”-пары, входящей в тройную звездную систему. Присутствие в CQ Сер третьей звезды усложняет форму ее (O-C)-диаграммы, ослабляет линейчатый спектр системы, усложняет решение ее кривой блеска. Основные же трудности исследования “WR+O”-пары связаны с крайней степенью ее тесности. Следствием последней является то, что двойная система в значительной степени погружена в WR-оболочку, а O-компонент пары, находясь на грани заполнения своей внутренней критической полости Роша, бурно реагирует на резкие повышения скорости оттока материи из WR-компонента. Основной же причиной большинства аномалий, обнаруживаемых в поведении блеска, спектра и линейной поляризации CQ Сер, является неравномерность оттока материи из WR-компонента. Тесность системы лишь способствует обнаружению этого феномена. Ритмичность выбросов из O-звезды (примерно раз в 10 лет) лишь отражает ритмичность в наступлении фаз повышенной активности или фаз повышенного оттока

материи из WR-компонента. Возможно, это проявление пульсаций WR-звезды.

Несмотря на достижение, как нам кажется, общего понимания того, что происходит в системе, отдельные наши выводы, безусловно, нуждаются в уточнении и дальнейшем развитии. Система очень нестационарная, и основное наше пожелание всем будущим наблюдателям и интерпретаторам — не объединять и не усреднять результаты наблюдений, выполненных на большом временном интервале (годы). Это касается и кривых блеска системы, и кривых лучевых скоростей, и поляризационных кривых. Только поиск причин переменности и анализ конкретных состояний системы дадут ее понимание. Интересно было бы организовать слежение за уровнем линейной поляризации CQ Сер, а в случае резкого его возрастания ($\Delta P \approx 1\%$) провести в течение 2–3 лет детальные поляризметрические исследования системы, дополнив их фотометрическими и спектральными наблюдениями. Много нового может дать углубленное исследование высокодисперсионных спектров CQ Сер. Интерпретация P Cуг-профилей III типа по Билсу, предложенная Михаласом и Конти (1980), в приложении к спектрам CQ Сер свидетельствует о том, что WR-компонент может иметь магнитное поле напряженностью $\approx 100 - 150$ Гс. Интересно было бы проверить этот результат с помощью прямых методов измерений магнитных полей.

Благодарности. Авторы благодарят всех, кто на отдельных этапах работы содействовал ее выполнению: наблюдательную бригаду (Снежко Л.И., Панчука В.Е., Барсукову Е.А.), получившую в августе 1981 года большую часть спектров CQ Сер, ответственных за методы наблюдений (Пыльскую О.П., Штоля В.Г., Найденова И.Д., Романюка И.И., Бычкова В.Д.), обеспечивших рабочее состояние аппаратуры и тем самым проведение наблюдений, коллективы библиотеки и издательской группы САО РАН и наконец Курочкина Н.Е., любезно предоставившего таблицы с результатами обработки снимков CQ Сер из стеклотеки ГАИША.

Список литературы

- Ак и др. (Ak H., Ozeren F.F., Ekmekci F.), 2003, IBVS, No **5361**
- Андерхилл и др. (Underhill A.B., Gilroy K.K., Hill G.M.), 1990, ApJ, **351**, 651
- Антохина Э.А., Липунова Н.А., Черепашук А.М., 1982, Астрон. журн., **59**, 704
- Антохина Э.А., Крейнер Й.М., Тремко Й., Черепашук А.М., 1987, Письма в астрон. журн., **13**, 417
- Баппу, Висванадхам (Bappu M.K.V., Visvanadham P.), 1977, Kodaikanal Observ. Bull. Ser. A., **2**, 89
- Билс (Beals C.S.), 1965, Publ. DAO, **9**, 1
- Гапошкин (Gaposchkin S.), 1944, ApJ, **100**, 242
- Гусейнзаде А.А., 1967, Астрофизика, **3**, 359
- Гусейнзаде А.А., 1969, Переменные звезды, **16**, 488
- Демиркан (Demircan O., Ak H., Ozdemir S., Tanriver M., Albayrak B.), 1997, Astron. Nachr., **318**, 267
- Домбровский В.А., Новочадова Н. В., 1953, Вестник ЛГУ, сер. мат. физ. и хим., **2**, 37
- Дриссен и др. (Drissen L., Moffat A.F.J., Bastien P., Lamontagne R., Tapia S.), 1986, ApJ, **306**, 215
- Итон, Генри (Eaton J.A., Henry G. W.), 1994, IBVS, No 4061
- Карташева Т.А., 1972, Переменные звезды, **18**, 459
- Карташева Т.А., 1974, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), **6**, 11
- Карташева Т.А., 1976, Письма в астрон. журн., **2**, 505
- Карташева Т.А., 1987, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), **24**, 35
- Карташева Т.А., 1995, Кандидатская диссертация, Нижний Архыз
- Карташева (Kartasheva T.A.), 1996, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **39**, 78
- Карташева (Kartasheva T.A.), 2002a, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **54**, 46
- Карташева (Kartasheva T.A.), 2002b, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **54**, 56
- Карташева Т.А., Свечников М.А., 1974, Переменные звезды, **19**, 441
- Карташева Т.А., Свечников М.А., 1988, Матер. совещ. "Звезды типа Вольфа-Райе и родственные им объекты", Эльва, 1986, 126
- Карташева Т.А., Свечников М.А., 1989, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), **28**, 3
- Карташева Т.А., Свечников М.А., 1991, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), **34**, 75
- Карташева, Свечников (Kartasheva T.A., Svechnikov M.A.), 1996, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **39**, 66
- Карташева, Свечников (Kartasheva T.A., Svechnikov M.A.), 1998, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **44**, 105
- Карташева, Свечников (Kartasheva T.A., Svechnikov M.A.), 2000, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **49**, 101
- Карташева, Свечников (Kartasheva T.A., Svechnikov M.A.), 2003, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **55**, 49
- Карташева и др. (Kartasheva T.A., Svechnikov M.A., Romanyuk I.I., Najdenov I.D.), 1998, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **46**, 130
- Карташева и др. (Kartasheva T.A., Svechnikov M.A., Bychkov V.D.), 2000, Bull. Spec. Astrophys. Obs., **50**, 51
- Карташева Т.А., Снежко Л.И., 1985а, Астрон. журн., **62**, 751
- Карташева Т.А., Снежко Л.И., 1985б, Бюлл. Абастум. астрофиз. obs., **58**, 25
- Килинк (Kilinc B.), 1994, IBVS, No 3998
- Конти, Алшюлер (Conti P.S., Alschuler W.R.), 1971, ApJ, **170**, 325
- Крейнер, Тремко (Kreiner J.M., Tremko J.), 1983, Bull. Astron. Inst. Czechosl., **34**, 341
- Крейнер Й.М., Тремко Й., 1985, Бюлл. Абастуман. Астрофиз. obs., **58**, 35
- Курочкин Н.Е., 1979, Астрон. циркуляр, No 1063, 1
- Курочкин Н.Е., 1985, Переменные звезды, **22**, 219
- Липунова Н.А., Черепашук А.М., 1982, Астрон. журн.,

- 59, 944
- Лонг и др. (Leung Kam-Ching, Moffat A.F.J., Seggewiss W.), 1983, *ApJ*, **265**, 961
- Мак Лафлин, Хилтнер (Mc Laughlin D.B., Hiltner W.A.), 1941, *PASP*, **53**, 32
- Марченко и др. (Marchenko S.V., Moffat A.F.J., Eenens P.R.J., Hill G.M., Grandchamps A.), 1995, *ApJ*, **450**, 811
- Масиежевски, Карска (Maciejewski G., Karska A.), 2004, *IBVS*, No 5494
- Михалас, Конти (Mihalas D., Conti P.S.), 1980, *ApJ*, **235**, 515
- Мэсси (Massey P.), 1981, *ApJ*, **246**, 153
- Ниёмела (Niemela V.S.), 1980, *Close Binary Stars: Observ. and Interpretat. Proc. Symp. IAU No 88 / Eds. Plavec M.J., Popper D.M., Ulrich R.K. Dordrecht: Reidel D.*, 177
- Пиирола, Линналоото (Piirola V., Linnaluoto S.), 1988, *Polarized radiation of circumstellar origin. Ed. Coyne G.V. et al., Vatican Obs.*, 795
- Свечников М.А., Снежко Л.И., 1974, Монография “Явления нестационарности и звездная эволюция”, ред.: Боярчук А.А. и Ефремов Ю.Н., Москва, гл.5, 181
- Стикланд и др. (Stickland D.J., Burton W.M., Bromage G., Willis A.J., Howarth I.D., Budding E., Jameson R.F.), 1982, *Proc. 3rd Int. Ultraviolet Explor. Conf. Madrid, Paris*, 335
- Стикланд и др. (Stickland D. J., Bromage G. E., Budding E., Burton W. M., Howarth I. D., Jameson R., Sherrington M. R., Willis A. J.), 1984, *A&A*, **134**, 45
- Страйжис, Курильене (Straizys V., Kuriliene G.), 1981, *Astrophys. Space Sci.*, **80**, 353
- Уокер и др. (Walker E.N., Lloyd C., Pike C.D., Stickland D.J., Zuiderwijk E.J.), 1983, *A&A*, **128**, 394
- Фадеев Ю.А., Новикова М.Ф., 2003, *Письма в астрон.журн.*, **29**, 592
- Фадеев Ю.А., Новикова М.Ф., 2004, *Письма в астрон.журн.*, **30**, 778
- Халиуллин Х.Ф., 1972, *Астрон.журн.*, **49**, 777
- Халиуллин Х.Ф., 1973, *Переменные звезды*, **19**, 73
- Халиуллин Х.Ф., Халиуллина А.И., Черепашук А.М., 1984, *Письма в астрон.журн.*, **10**, 600
- Халиуллин Х.Ф., Черепашук А.М., 1970, *Астрон. циркуляр*, No 551, 5
- Харвиг В.В., 1987, *Публ. Тартуской астрофиз. обс.*, **52**, 313
- Харриес, Хилдитш (Harries T.J., Hilditch R.W.), 1997, *MNRAS*, **291**, 544
- Хилтнер (Hiltner W.A.), 1944, *ApJ*, **99**, 273
- Хилтнер (Hiltner W.A.), 1950, *ApJ*, **112**, 477
- Хилтнер (Hiltner W.A.), 1951, *ApJ*, **114**, 24
- Хуан (Huang S. -S.), 1956, *AJ*, **61**, 49
- Черепашук (Cherepashchuk A.M.), 1982, *Astrophys. Space Sci.*, **86**, 299
- Чугайнов П.Ф., 1960, *Переменные звезды*, **13**, 148
- Шаховской Н.М., 1964, *Астрон.журн.*, **41**, 1042

Приложение 1

Дополнение к моментам минимумов CQ Сер

Номер	Число циклов (E)	Год	$T_{minI(II)}$ (J.D.⊙) (2400000 ^d +)	Ошибка	$(O - C_{1(2)})$	$(O-C_2)-$ $-(O-C_1)$	Ссылки
83 ^a	17626.0	1980.52	44429 ^d 540	±0 ^d 005	-1 ^d 199		Антохина и др.(1987)
83 ^b	17626.5		44430.338	±0.005	-1.222	-0 ^d 023	—
100 ^a	18736.0	1985.50	46251.316	± 0.007	-1.292		—
101 ^a	18736.5		46252.137	± 0.007	-1.291	+0.001	—
119	21637.5	1998.56	51013.384	± 0.003	-1.522		Ак и др. (2003)
120	21643.0		51022.399	± 0.002	-1.535	+0.013	—
121	22762.0	2003.60	52858.962	± 0.004	-1.612		Масиежевски и Карска (2004)

Уклонения (O-C) вычислялись с использованием формулы:

$$T_{minI}(J.D.) = 2415500^d.780 + 1^d.641323 \cdot E$$

Приложение 2

Поскольку для (O-C₁₍₂₎)-диаграммы V444 Cug мы не нашли теоретического представления, учитывающего и самые старые, фотографические, и самые последние, фотоэлектрические наблюдения системы, то нам пришлось выполнить расчеты и дать более универсальное ее представление:

$$(O - C_{1(2)})_{\text{теор.}} = -0^d007 + 0^d000020 \cdot E + 0^d97 \cdot 10^{-8} \cdot E^2,$$

ведущее к $\dot{P} = 1.68 \cdot 10^{-6}$ дня за год и к уточненной эфемеридной формуле:

$$T_{minI} = 2441164^d330 + 4^d212455 \cdot E + 0^d97 \cdot 10^{-8} \cdot E^2.$$

Моменты минимумов были взяты из работы Халиуллина и др. (1984) и работы Итона и Генри (1994). (O-C)-уклонения вычислялись с использованием линейной формулы Халиуллина (1973):

$$T_{minI}(J.D.) = 2441164^d337 + 4^d212435 \cdot E.$$

(O-C₁₍₂₎)-диаграмма V444 Cug вместе с ее теоретическим представлением даны на рис.13.

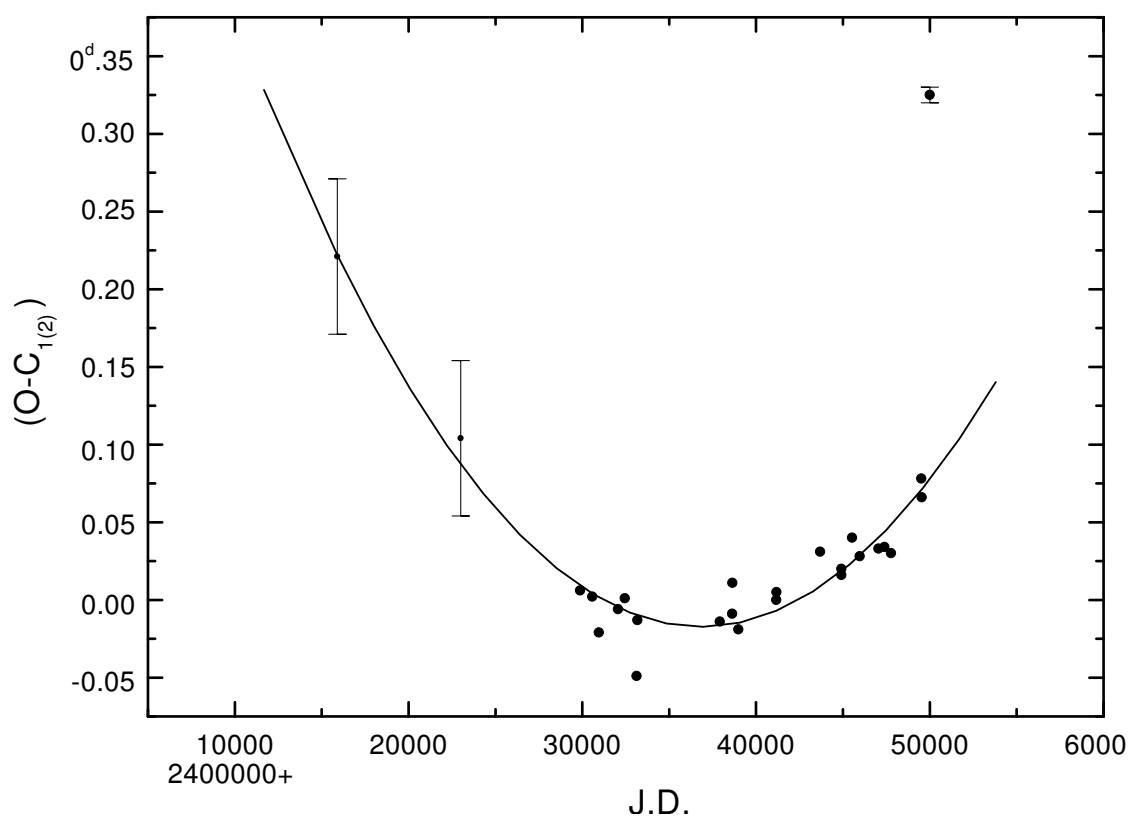


Рис. 13: $(O - C_{1(2)})$ -диаграмма V444 Cyg. Результаты фотографических наблюдений представлены точками, фотоэлектрических — заполненными кружками. Жирной линией дано теоретическое представление диаграммы параболы: $(O - C_{1(2)})_{\text{теор.}} = -0^{\text{d}}007 + 0^{\text{d}}000020 \cdot E + 0^{\text{d}}97 \cdot 10^{-8} \cdot E^2$.