

Решение "звездных" кривых блеска затменно-двойной типа

Вольф—Райе CQ Cep

(Решение кривых блеска CQ Cep, II*)

Т.А.Карташева, М.А.Свечников

В статье более полно, чем в предыдущей работе, изложена методика решения "звездной" кривой блеска затменно-двойной типа Вольф—Райе CQ Cep. По этой методике решены девять "звездных" кривых блеска системы, выделенные из наблюдений, полученных в разные годы разными авторами. Производится оценка точности метода.

Solution of the "Stellar" Light Curve of the

Wolf-Rayet Type Eclipsing Binary CQ Cep

(Solution of Light Curves of CQ Cep, II)

by T.A. Kartasheva, M.A. Svechnikov

In this paper the method of solution of the "stellar" light curve of the Wolf-Rayet eclipsing variable CQ Cep is given more explicitly than in the previous work. Nine "stellar" light curves of the system, selected from observations which were obtained in various years by different authors, are solved by this method. The accuracy of the method is estimated.

Введение. Звезда CQ Cep относится к очень небольшой группе затменно-двойных систем, содержащих в качестве одного из компонентов звезду типа Вольф—Райе. Спектральная двойственность звезды была обнаружена в 40-х годах Мак Лафлином и Хилтнером (1941). Несколько позднее Гапошкин (1944) открыл затменность системы. Период системы, резко уменьшившийся в начале века согласно фотографическим наблюдениям Гапошкина (1944), в настоящее время сохраняется квазипостоянным ($P=1^d.641246$), поскольку он испытывает отдельные скачкообразные изменения**. Спектр одного из

* Статья I опубликована в Известиях САО АН СССР (Астрофизические исследования) т. VI, 1974 г.

** В настоящее время авторы проводят исследование поведения периода CQ Cep, результаты которого будут опубликованы в ближайшее время.

Сводная таблица характеристик

Наблюдатель	Мини- мум	Ширина минимума			Глубина минимума				
		ф	с	ж	ф	с	ж		
Гапошкин (фот.)	I		0 ^d .60			0 ^m .34			
1901—1942 г.	II		0.67			0.29			
Хилтнер (фэ.)	I	0 ^d .76		0 ^d .77	0 ^m .52	0	0 ^m .47		
1947 г.	II	0.89		0.87	0.42		0.40		
Свечников (фот.)	I		0.76			0.48			
1953 г.	II		0.88			0.42			
Чугайнов (фэ.)	I	0.71	0.68	0.77	0.54	0.46	0.49		
1958—1959 г.	II	0.77	0.75	0.73	0.39	0.32	0.35		
Гусейн-заде (фэ.)	I	0.60	0.70	0.65	0.54	0.45	0.49		
1964—1965 г.	II	0.90	0.80	0.75	0.49	0.36	0.38		
Карташева (фот.)	I		0.79	0.78		0.48	0.47		
1965—1966 г.	II		0.85	0.86		0.37	0.34		
Карташева (фот.)	I	0.79	0.80	0.79	0.51	0.45	0.49		
1969 г.	II	0.84	0.84	0.84	0.40	0.37	0.40		
	λ (Å)	4686	4795	6230	6563	4686	4795	6230	6563
Халиуллин (фэ.)	I	0.77	0.77	0.78	0.80	0.25	0.37	0.45	0.33
1970 г.	II	0.87	0.87	0.86	0.85	0.24	0.37	0.39	0.27

компонентов CQ Сер—WN 6 (Хилтнер, 1944), спектр другого компонента в настоящее время не виден и оценивается приблизительно как В1 (Гапошкин, 1944). Однако, необходимо отметить, что по весьма неуверенным следам спутника, имевшимся в спектрограммах начала 40-х годов, его спектральный класс был оценен Мак Лафлином и Хилтнером (1941) как О6—О8, и большинство исследователей придерживается этой оценки. В последующие годы система многократно исследовалась и спектрально (Хилтнер, 1944; Баппу и Синвхал, 1955, 1959), и фотометрически (Хилтнер, 1950; Свечников, 1954; Чугайнов, 1960; Карташева, 1966; Гусейнзаде, 1967; Халиуллин и Черепашук, 1970; Карташева, 1972; Халиуллин, 1972). В настоящее время мы располагаем большим числом кривых блеска CQ Сер, полученных в разные годы и в разных длинах волн.

По своей форме и широкополосные и узкополосные кривые блеска CQ Сер в континууме относятся к кривым блеска типа β Лиры. Отличительной чертой кривых блеска системы является резкая асимметрия ветвей обоих минимумов. Сравнение кривых блеска между собой (см. таблицу 1) показывает, что, со временем, у них изменяется как глубина самих минимумов, так и соотношение между глубинами главного и вторичного минимумов. Заметные различия обнаруживаются в положении центра вторичного минимума, а также в положении обоих максимумов, вершины которых сдвинуты по фазе относительно их нормальных положений. Следствием перемещения последних является измене-

кривых блеска CQ Сер.

Таблица 1.

Различие яркости максимумов				Неправильные изменения блеска				Смещение центра II мин. от P/2			
ф	с	ж		ф	с	ж		ф	с	ж	
	$+0.02$				0.04						
$+0.01$		0.00		0.04		0.05		0.005			
	$+0.05$							0.025		0.029	
								0.033			
0.00	$+0.02$	$+0.02$		0.04	0.06	0.06					
-0.01	$+0.05$	$+0.06$		0.18	0.08	0.12		0.027	0.023	0.023	
	$+0.01$	$+0.02$						0.025	0.025	0.033	
$+0.03$	0.00	0.00		0.35	0.13	0.14		0.016	0.011		
								0.014	0.014	0.014	
4686	4795	6230	6563	4686	4795	6230	6563	4686	4795	6230	6563
$+0.02$	$+0.02$	0.00	0.00	—	—	—	—	0.000	0.000	0.000	0.014

ние со временем ширины минимумов, которая существенно различается у главного и вторичного. Как видно из таблицы 1, многие кривые блеска CQ Сер показывают неравенства максимумов (максимум II превышает максимум I), причем как правило его величина одинакова для кривых блеска, полученных в желтой и синей областях спектра, и отлична для кривой блеска в ультрафиолете. Наконец, излучение в непрерывном спектре показывает неправильные флуктуации, достигающие иногда нескольких десятых звездной величины.

Таким образом, рассмотрение кривых блеска CQ Сер свидетельствует о физической переменности системы и, в частности, о существенных изменениях, происходящих в оболочке WR-звезды. Именно присутствие этой общей для столь тесной пары оболочки, вносящей сильные искажения в форму кривой блеска системы, долгое время не позволяло произвести решение последней, несмотря на наличие ряда хороших фотоэлектрических наблюдений. Что касается решения, полученного для CQ Сер в 1944 году Гапошкиным (1944), то оно представляет лишь исторический интерес, поскольку совсем не учитывает сложной структуры WR-компонента.

Метод разложения кривой блеска системы на "звездную" и "оболочечную".

При решении кривой блеска CQ Сер мы исходили из упрощенной модели звезды Вольф-Райе, предложенной Кроном и Гордон при исследовании системы V444 Лебедя (Крон и Гордон, 1950). Предпо-

лагалось, что помимо светящегося и затмевающего ядра звезда Вольф-Райе имеет мощную оболочку, которая проявляет себя и как светящийся, и как затмевающий полупрозрачный объект.

В основу решения было положено разложение кривой блеска CQ Сер на две самостоятельные кривые — "звездную", обуславливаемую затмениями в системе "WR-ядро+В-звезда" и "оболочечную", обуславливаемую затмениями в системе "WR-оболочка+В-звезда". Итак, кривую блеска CQ Сер можно описать следующей простой формулой:

$$I_1 = L_1(\theta_1) + L_2(\theta_1) + L_3(\theta_1 - \eta) - \delta'_1 - \delta''_1, \quad (1)$$

где I_1 — наблюдаемый блеск системы в некоторой фазе θ_1 ,

$L_1(\theta_1)$ — блеск ядра WR-звезды,

$L_2(\theta_1)$ — блеск В-звезды,

$L_3(\theta_1 - \eta)^*$ — блеск оболочки WR-звезды,

(блеск звезд и оболочки переменен вследствие их эллипсоидальности; как обычно, $(L_1 + L_2 + L_3)_{\text{рект}} = 1$),

δ'_1 — потеря блеска в результате затмений в системе "WR-ядро+В-звезда",

δ''_1 — потеря блеска в результате затмений в системе "WR-обол.+В-звезда".

Потери блеска легко представить в следующем виде:

$$\delta'_1 = [L_1(\theta_1) + L_2(\theta_1)] - I'_1$$

$$\delta''_1 = [f(L_2(\theta_1)) + L_3(\theta_1 - \eta)] - I''_1$$

где I'_1 — блеск системы "WR-ядро+В-звезда",

I''_1 — блеск системы "WR-обол.+В-звезда".

В выражение для δ''_1 входит не блеск В-звезды $L_2(\theta_1)$, а некоторая функция этого блеска $f[L_2(\theta_1)]$. Это вызвано тем, что в фазах вторичного минимума "оболочечной" кривой (WR-оболочка затмевает В-звезду) участвует не весь блеск В-звезды, а только та его часть, которая не подвержена затмению ядром WR-звезды. Таким образом, $f[L_2(\theta_1)] = L_2(\theta_1)$ во всех фазах за исключением фаз вторичного минимума с $180^\circ - \theta'' < \theta < 180^\circ + \theta''$ (см. рис. 1), где имеет место затмение В-звезды WR-ядром и где

$$f[L_2(\theta_1)] = L_2(\theta_1) - \delta'_1 = L_2(\theta_1) - L_1(\theta_1) - L_2(\theta_1) + I'_1 = I'_1 - L_1(\theta_1).$$

После подстановки выражений для δ'_1 и δ''_1 в уравнение (1) получаем формулу

$$I_1 = I'_1 + I''_1 - f[L_2(\theta_1)], \quad (2)$$

лежащую в основе разложения наблюдаемой кривой блеска на "звездную" и "оболочечную".

Так как поверхностные температуры звезд системы различаются не очень сильно и так как у очень тесных систем с сильно деформированными компонентами эффект эллипсоидальности во много раз пре-

* η — угол, на который ось оболочки повернута относительно основной оси системы.

вышает эффект отражения, то последним эффектом мы пренебрегали и ректификацию производили только за эффект эллипсоидальности. Поскольку ректификация за эффект эллипсоидальности сводится к делению блеска на некоторую функцию коэффициента эллипсоидальности и угловой фазы, то допустима почленная ректификация. Из формулы (1) получаем:

$$I_{\text{рект.}} = 1 - \delta'_{\text{рект.}} - \delta''_{\text{рект.}}$$

При рассмотрении ректифицированной кривой блеска (см. рис. 1, а также рис. 6, 7, 8) выявляются точки перегиба θ' , $180^\circ - \theta''$, $180^\circ + \theta''$, $360^\circ - \theta'$, которые, как установили еще Крон и Гордон (1950), представляют собой моменты начала и конца затмений в "звездной" кривой блеска. На внезатменных участках "звездной" кривой блеска, т.е. в областях от θ' до $180^\circ - \theta''$ и от $180^\circ + \theta''$ до $360^\circ - \theta'$, $\delta'_{\text{рект.}} = 0$

$$I_{\text{рект.}} = 1 - \delta''_{\text{рект.}} = A_1$$

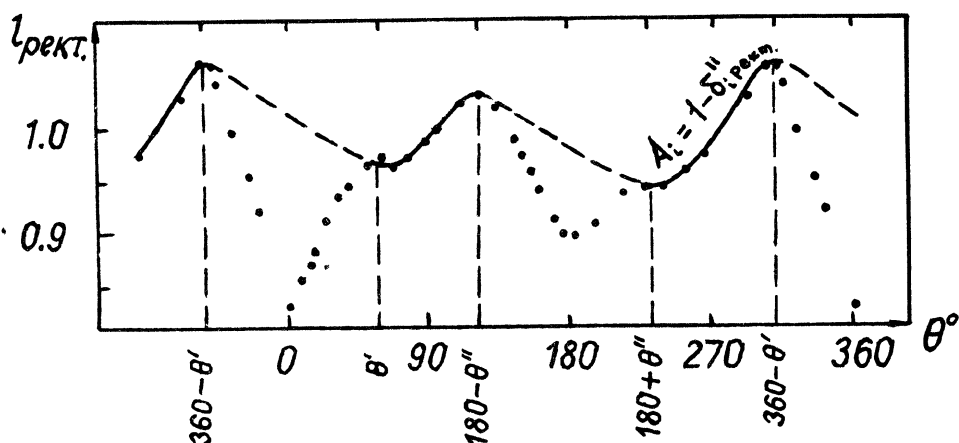


Рис. 1. Ректифицированная кривая блеска SQ Сер в синих лучах. (Наблюдения Карташевой)

Очевидно, что ход величины A_1 можно продолжить и на фазы затмения "звездной" кривой блеска, если предположить плавность хода этой величины, а также воспользоваться тем, что падение блеска в системе "звезда-звезда" должно быть симметричным относительно центральной фазы затмения. Образуя затем для фаз затмения "звездной" кривой блеска разности вида

$$A_1 - I_{\text{рект.}} = 1 - \delta''_{\text{рект.}} - 1 + \delta'_{\text{рект.}} + \delta''_{\text{рект.}} = \delta'_{\text{рект.}}$$

мы получаем потери ректифицированного блеска в системе "WR-ядро + В-звезда". Это позволяет произвести решение "звездной" кривой блеска, не зная ни суммарного блеска $(L_1 + L_2)_{\text{рект.}}$, ни самого блеска системы I'_1 . Определив из решения блески L_1 и L_2 , а следовательно и $L_3 = 1 - (L_1 + L_2)$, мы получаем возможность найти $I'_{\text{рект.}}$ и I'_1 . Далее из формулы (2) легко находится и блеск "оболочечной" кривой блеска I''_1 .

Изложенная методика решения "звездной" кривой блеска CQ Сер и последующего разделения наблюдаемой кривой на "звездную" и "оболочечную" была применена к девяти кривым блеска системы: к самой первой фотографической кривой, полученной Гапошкиным (1944), к двум фотоэлектрическим кривым блеска CQ Сер, отнаблюдаемым Хилтнером (1950), к трем фотоэлектрическим кривым блеска системы, полученным Чугайновым (1960)* и, наконец, к трем фотоэлектрическим кривым блеска звезды, полученным нами в цветовой системе близкой к UVV в феврале—мае 1969 года (Карташева, 1972).

Ректификация кривых блеска. При практическом осуществлении ректификации мы, не имея возможности определить значения коэффициентов ректификации из формы искаженных максимумов, исходили из того, что система очень тесная, вероятно контактная, и следовательно коэффициент эллипсоидальности звезд должен быть значительным. Для двух кривых блеска системы, полученных Хилтнером, были осуществлены пробные решения "звездных" кривых при ректификации с $z_{\phi m.} = 0.28, 0.32, 0.36, 0.40$. Было установлено, что получаемая при этом область значений наклонности орбиты довольно узка ($i = 80^\circ \div 88^\circ$) и свидетельствует о близости $\sin^2 i$ к единице. Далее мы полагали, что система является контактной. А так как из статистических исследований (Свечников, 1969) для подобного рода систем $b^2/a^2 = 1 - z_{\text{геом.}}/\sin^2 i \approx 0.81$, то при $\sin^2 i \approx 1$ в U-гипотезе ($x = 0.0$; $N = 2$)

$$z_{\text{геом.}} = \frac{z_{\phi m.} \cdot z_{\phi m.}}{N} = \frac{z_{\phi m.}}{2} = 0.19, \text{ а } z_{\phi m.} = 0.38.$$

Все вышеприведенные рассуждения помогают уточнить значение коэффициента эллипсоидальности звезд системы. Но поскольку эллипсоидальности звезд и оболочки могут существенно отличаться, то ректифицированный блеск должен представляться следующей точной формулой:

$$I_{\text{рек.}} = \begin{cases} \frac{L_1(\theta_1) + L_2(\theta_1) - \delta'_1}{1 - \frac{z_{\phi m. \text{зв.}}}{2} \cos^2 \theta_1} + \frac{L_3(\theta_1 - \eta) - \delta''_1}{1 - \frac{z_{\phi m. \text{обол.}}}{2} \cos^2(\theta_1 - \eta)} & \text{для главного минимума (B} \rightarrow \text{WR)} \\ \frac{L_1(\theta_1) + L_2(\theta_1) - \delta'_1 - \delta''_1}{1 - \frac{z_{\phi m. \text{зв.}}}{2} \cos^2 \theta_1} + \frac{L_3(\theta_1 - \eta)}{1 - \frac{z_{\phi m. \text{обол.}}}{2} \cos^2(\theta_1 - \eta)} & \text{для вторичного минимума (WR} \rightarrow \text{B)} \end{cases} \quad (3)$$

Очевидно, что на практике точную ректификацию произвести невозможно. Однако, для нашей задачи достаточно выполнить точную ректифика-

* Предварительно в кривые блеска системы, полученные Чугайновым, были внесены поправки за изменение блеска системы от цикла к циклу: наблюдения, относящиеся к главному минимуму, были опущены к самому нижнему уровню, образуемому наблюдениями двух ночей ($J.D. = 2436489^{\text{d}}220$ и т.д. и $J.D. = 2436817^{\text{d}}332$ и т.д.). Направление сдвига определялось достижением наилучшей сходимости значений наклонности орбиты, следующих из решения главных и вторичных минимумов кривых блеска.

цию только "звездной" кривой блеска, то есть верно определить потери блеска $\delta'_{\text{рект.}} = A_1 - l_{\text{рект.}}$. Последнее легко осуществляется при грубой ректификации наблюдаемого блеска по формуле:

$$l_{\text{рект.}} \approx \frac{l_1}{1 - \frac{z_{\text{фм.зв.}}}{2} \cos^2 \theta_1} = \begin{cases} I_{\text{уст.}}^{(1)} + II_{\text{уст.}}^{(2)} \cdot \frac{1 - \frac{z_{\text{фм.обол.}}}{2} \cos^2(\theta_1 - \eta)}{1 - \frac{z_{\text{фм.зв.}}}{2} \cos^2 \theta_1} & \begin{matrix} \text{гл.} \\ \text{мин.} \end{matrix} \\ I_{\text{уст.}}^{(2)} + II_{\text{уст.}}^{(2)} \cdot \frac{1 - \frac{z_{\text{фм.обол.}}}{2} \cos^2(\theta_1 - \eta)}{1 - \frac{z_{\text{фм.зв.}}}{2} \cos^2 \theta_1} & \begin{matrix} \text{втор.} \\ \text{мин.} \end{matrix} \end{cases} \quad (3a)$$

где $I_{\text{уст.}}$ и $II_{\text{уст.}}$ — первый и второй члены правой части формулы (3), так как в разности $A_1 - l_{\text{рект.}}$ вторые члены правой части этой формулы, искаженные добавочным множителем, сократятся. Таким образом, теоретически нет необходимости учитывать при ректификации асимметрию оболочки и отличие ее эллипсоидальности от эллипсоидальности звезд. Однако, на практике ход величины A_1 проводится от руки, руководствуясь двумя упомянутыми выше принципами. И если неучет асимметрии оболочки вносит в ректифицированную кривую блеска искажения (перекосы кривой; см. рис. 1), выявляющие точки перегиба и тем самым облегчающие проведение уровня A_1 , то неучет отличия эллипсоидальности звезд и оболочки ведет к искажениям (сплющивание или вытягивание кривой блеска вдоль оси $l_{\text{рект.}}$), которые при значительном различии величин $z_{\text{фм.зв.}}$ и $z_{\text{фм.обол.}}$ могут существенно сказаться на проведении уровня A_1 в фазах близких к середине затмения. Это повлечет за собой ошибки в определении относительных элементов системы и главным образом в определении блеска звезд.

Исходя из вышеприведенных рассуждений, решение "звездных" кривых блеска производилось последовательными приближениями, позволившими учесть возможное различие в эллипсоидальностях звезд и оболочки.

В первом приближении предполагалось, что эллипсоидальность оболочки не отличается от эллипсоидальности звезд, т.е. $z_{\text{фм.обол.}} = z_{\text{фм.зв.}} = 0,38$. С этим значением коэффициента эллипсоидальности мы производили ректификацию кривых блеска по формуле (3a), а также решение "звездных" кривых и последующее разложение наблюдаемых кривых блеска на "звездные" и "оболочечные". Выделение "оболочечных" кривых блеска позволило нам графическим способом уточнить коэффициент фотометрической эллипсоидальности оболочки. Действительно, во внезатменных участках "оболочечных" кривых блеска

$$l_1^* = L_2 \left(1 - \frac{z_{\text{фм.зв.}}}{2} \cos^2 \theta_1 \right) + L_3 \left[1 - \frac{z_{\text{фм.обол.}}}{2} \cos^2(\theta_1 - \eta) \right]$$

Результаты решения "звездных"

	Наблюдения Гапошкина 1901-1942г.		Наблюдения Хилтнера 1947 г.			
	λ 4330 $\text{\AA}$		λ 3500 $\text{\AA}$		λ 5300 $\text{\AA}$	
	a	b	a	b	a	b
Размеры полуосей:						
WR-звезды: светящ. ядра	0.330	0.330	0.340	0.300	0.340	0.300
непроз. ядра	0.350	0.310	0.350	0.310	0.320	0.290
ВКП		0.331		0.322		0.326
В-звезды	0.470	0.420	0.480	0.430	0.475	0.425
Наклонность орбиты		84°0		83°4		85°0
Блеск: WR-звезды: ядра		0.20		0.21		0.18
оболочки		0.59		0.60		0.65
В-звезды		0.21		0.19		0.17
Отношение поверхностных яркостей		1.9 ± 0.4		2.2 ± 0.6		2.1 ± 0.6
$J_{WR \text{ ядра}} / J_V$						
Отношение масс m_{WR} / m_V		0.62 ± 0.10		0.56 ± 0.09		0.58 ± 0.09
Массы: WR-звезды		7.2 ± 2.1 $m_\odot$		6.2 ± 1.7 $m_\odot$		
В-звезды		11.6 ± 1.5 $m_\odot$		10.9 ± 1.3 $m_\odot$		
Радиус орбиты:		15.6 ± 1.0 $R_\odot$		15.1 ± 0.9 $R_\odot$		
Размеры больших полуосей:						
WR-звезды: светящ. ядра		5.1 ± 0.6 $R_\odot$		5.1 ± 0.6 $R_\odot$		5.1 ± 0.6 $R_\odot$
непроз. ядра		5.5 ± 0.6 $R_\odot$		5.3 ± 0.6 $R_\odot$		4.8 ± 0.5 $R_\odot$
В-звезды		7.3 ± 0.7 $R_\odot$		7.2 ± 0.7 $R_\odot$		7.2 ± 0.7 $R_\odot$
Эффективные температуры						
WR-ядра		34600 ± 6600 K		36300 ± 8500 K		38600 ± 10 500 K
В-звезды						
Светимости (M_{bol})						
WR-ядра		-6. ^m 8 ± 1. ^m 1		-6. ^m 8 ± 1. ^m 3		-7. ^m 1 ± 1. ^m 4
В-звезды		-5.3 ± 0.5				-5.1 ± 0.5

и $z_{\phi_{м.обол.}}$ легко находится как угловой коэффициент зависимости величины

$$2 \left[1 - \frac{L_1'' - L_2 \left(1 - \frac{z_{\phi_{м.зв.}}}{2} \cos^2 \theta_1 \right)}{L_3} \right] \text{ от } \cos^2 (\theta_1 - \eta).$$

Знание блесков L_1 , L_2 и L_3 , полученных из решения "звездных" кривых, позволяет затем определить значения коэффициента эффективной фотометрической эллипсоидальности по формуле:

$$z_{\phi_{м.эф.}} = (L_1 + L_2) z_{\phi_{м.яв.}} + L_3 z_{\phi_{м.обол.}}$$

Используя полученные $z_{\phi_{м.эф.}}$, $z_{\phi_{м.яв.}} = 0.38$ и уточненные из графического определения $z_{\phi_{м.обол.}}$, производилось второе приближение,

кривых блеска CQ Сер. Т а б л и ц а 2.

Наблюдения Чугайнова 1958 — 1959 г.						Наблюдения Карташевой 1969 г.					
ф		с		ж		ф		с		ж	
а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
0.400	0.360	0.400	0.360	0.400	0.360	0.370	0.335	0.360	0.340	0.390	0.350
0.330	0.300	0.320	0.290	0.320	0.290	0.370	0.335	0.360	0.325	0.365	0.325
	0.340		0.340		0.340		0.322		0.322		0.326
0.455	0.410	0.460	0.410	0.460	0.410	0.480	0.430	0.480	0.430	0.470	0.425
85° 0		84° 2		84° 4		85° 3		85° 0		85° 7	
0.22		0.17		0.18		0.21		0.18		0.19	
0.62		0.70		0.66		0.63		0.67		0.66	
0.16		0.13		0.16		0.16		0.15		0.15	
1.8 ± 0.5		1.7 ± 0.5		1.5 ± 0.4		2.2 ± 0.6		2.0 ± 0.6		1.8 ± 0.6	
0.68 ± 0.14		0.68 ± 0.14		0.68 ± 0.14		0.56 ± 0.09		0.56 ± 0.09		0.58 ± 0.09	
		8.4 ± 3.2 M _☉						6.2 ± 1.7 M _☉			
		12.4 ± 2.1 M _☉						10.8 ± 1.3 M _☉			
		16.1 ± 1.4 R _☉						15.1 ± 0.9 R _☉			
6.4 ± 0.9 R _☉		6.4 ± 0.9 R _☉		6.4 ± 0.9 R _☉		5.6 ± 0.6 R _☉		5.7 ± 0.6 R _☉		5.9 ± 0.6 R _☉	
5.3 ± 0.8 R _☉		5.2 ± 0.8 R _☉		5.2 ± 0.8 R _☉		5.6 ± 0.6 R _☉		5.4 ± 0.6 R _☉		5.5 ± 0.6 R _☉	
7.3 ± 1.0 R _☉		7.4 ± 1.0 R _☉		7.4 ± 1.0 R _☉		7.2 ± 0.7 R _☉		7.2 ± 0.7 R _☉		7.1 ± 0.7 R _☉	
32700 ± 6900 K		32300 ± 7500 K		30800 ± 6100 K		37000 ± 8200 K		35800 ± 8700 K		34900 ± 9900 K	
		23700 ± 1300 K									
-6° 9 ± 1° 2		-6° 8 ± 1° 3		-6° 6 ± 1° 2		-7° 1 ± 1° 2		-7° 0 ± 1° 3		-7° 0 ± 1° 4	
		-5° 6 ± 0° 7						-5° 1 ± 0° 5			

которое в итоге привело к значению $z_{\phi_{ж}, \phi_{с}}$, совпадающему с его значением, принятым во втором приближении. На этом основании процесс приближения был ограничен двумя этапами.

Решение "звездных" кривых блеска.

Само решение "звездных" кривых блеска производилось методом Мерилла в U-гипотезе. Поскольку размеры WR-звезды как затмевающего и как затмеваемого объекта могут различаться, то главный и вторичный минимумы решались самостоятельно, причем рассматривались все возможные типы затмений: (Б→М; М→Б), (Б→М; Б→М), (М→Б; М→Б), (М→Б; Б→М). Первоначально мы предполагали, что в обоих минимумах происходит частное затмение. Из формы минимумов (по χ -функциям) определялись пары возможных значений $k_1 \alpha_{01}$ и $k_2 \alpha_{02}$, которые использовались для нахождения ряда соответствующих им ре-

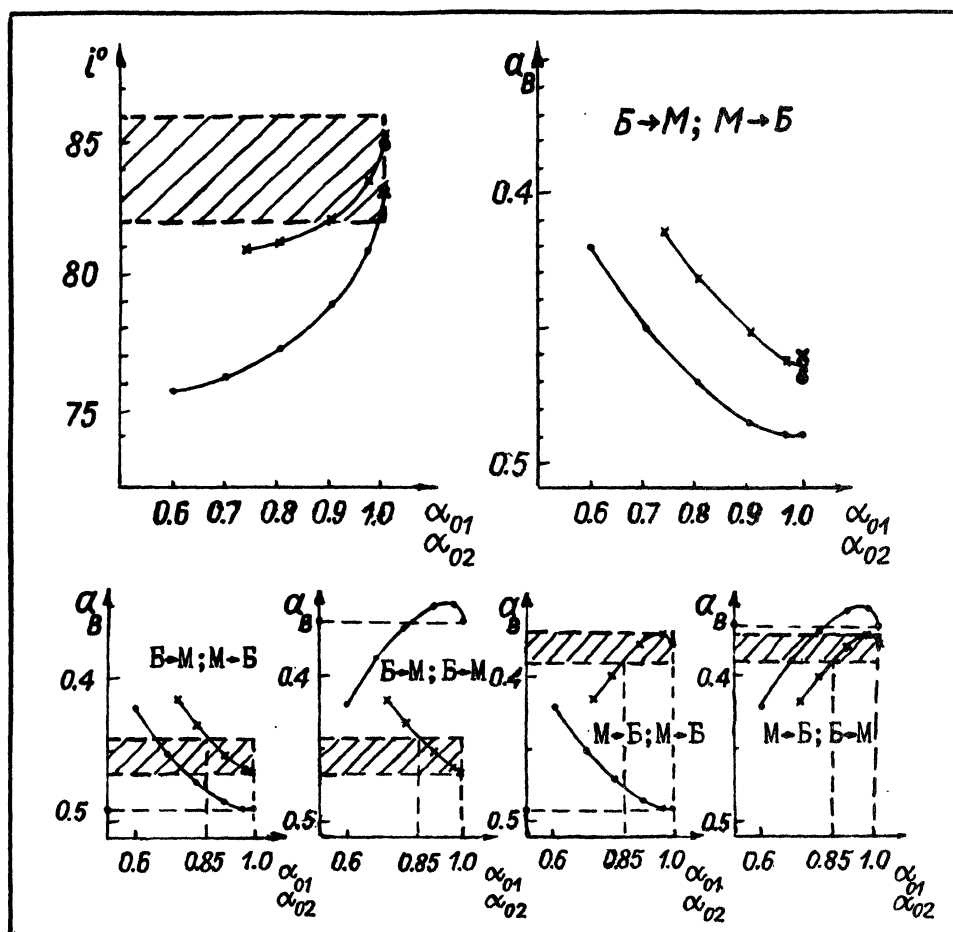


Рис. 2. Совокупность возможных решений "звездных" кривых блеска SQ Сер, полученных по форме главного (x) и вторичного (•) минимумов. (Наблюдения Гапошкина).

шений (см. рис. 2, 3, 4, 5, где возможные значения наклонности орбиты системы и большой полуоси В-звезды даны в зависимости от максимальных фотометрических фаз затмений α_{01} и α_{02}). Истинные значения максимальных фотометрических фаз затмений, а также тип затмения определялись путем логических рассуждений, исходя из требования наилучшей сходимости значений наклонности орбиты и размеров В-звезды, получаемых из решения главных и вторичных минимумов. Учитывалось и то, что наклонность орбиты не должна заметно измениться за 70 лет, разделяющие самые крайние наблюдения.

При сопоставлении возможных решений "звездных" кривых блеска разных лет видно, что в пределах довольно узкой области значений наклонности орбиты $i=82^\circ-86^\circ$ (область выделена на рис. 2, 3, 4, 5 штрихами) достигается хорошее согласие как между значениями i_1 и i_2 , следующими из решения главных и вторичных минимумов, так и между значениями наклонности орбиты, полученными для кривых блеска

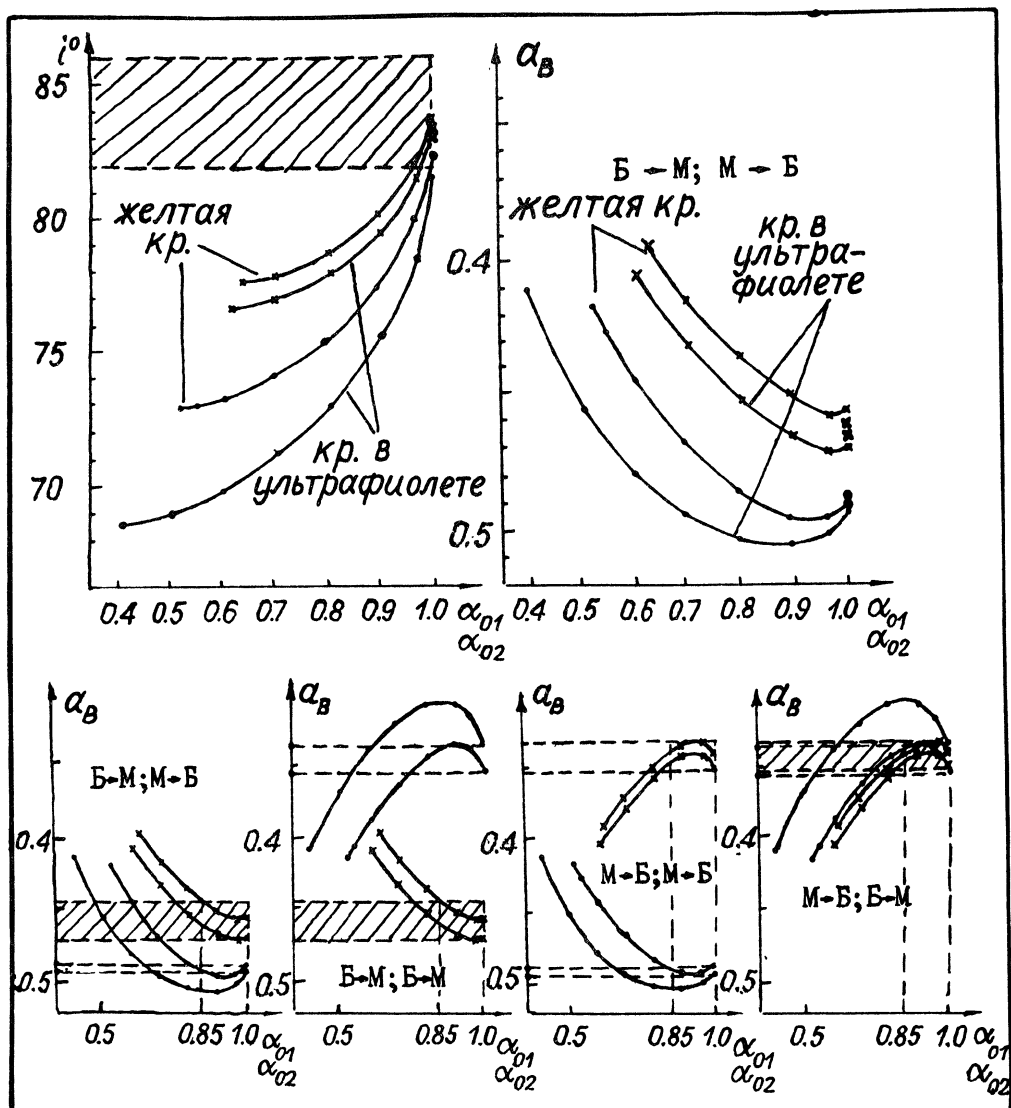


Рис. 3. Совокупность возможных решений "звездных" кривых блеска SQ Сер, полученных по форме главного (x) и вторичного (°) минимумов. (Наблюдения Хилтнера).

разных лет. При этом, если значения максимальной фотометрической фазы α_{01} допускают колебания в пределах $0.85 \div 1.00$, то значение максимальной фотометрической фазы α_{02} определяется однозначно, $\alpha_{02} = 1$ для всех "звездных" кривых блеска системы. Действительно, на всех "звездных" кривых блеска SQ Сер в центре вторичного минимума намечается небольшой участок постоянного блеска, свидетельствующий о том, что во вторичном минимуме происходит целое затмение. Дальнейшее уточнение значения максимальной фотометрической фазы затмения α_{01} и выбор типа затмения осуществлялись с помощью второго требования — наилучшей сходимости размеров большой полуоси В-звезды a_B , следуемых из решения главных и вторичных мини-

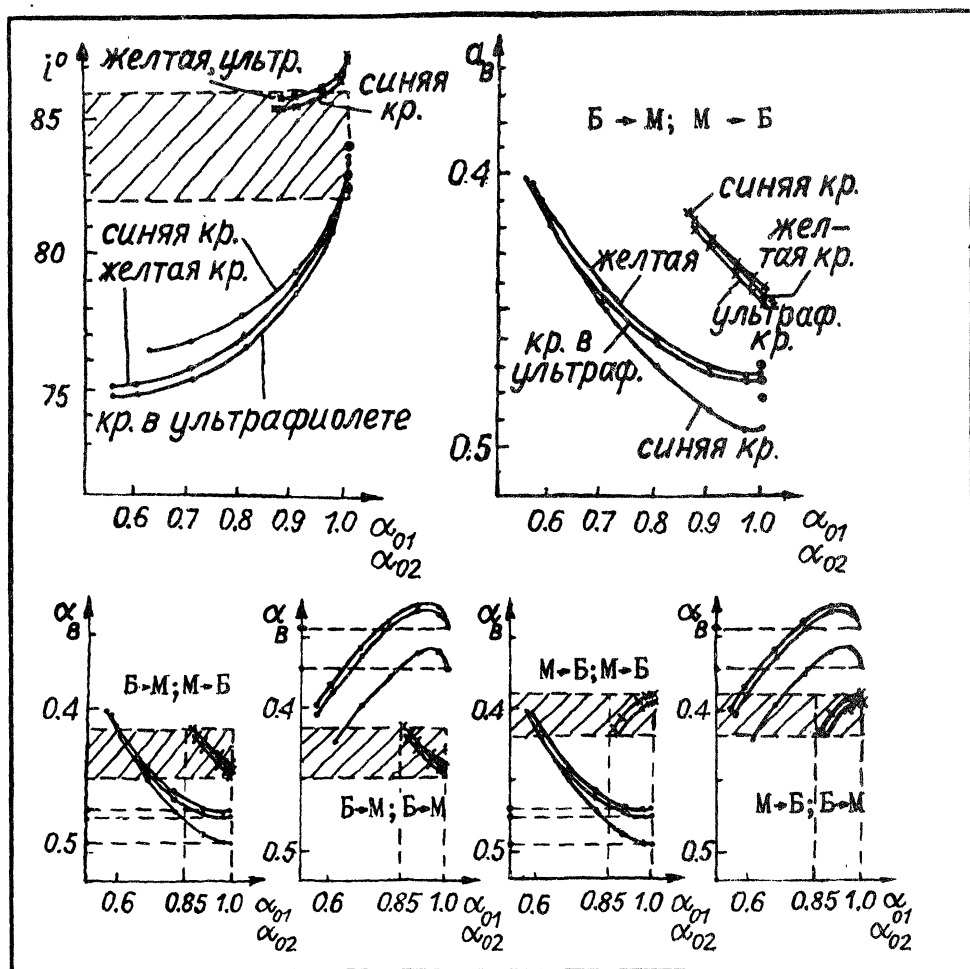


Рис. 4. Совокупность возможных решений "звездных" кривых блеска SQ Сер, полученных по форме главного (x) и вторичного (°) минимумов. (Наблюдения Чугайнова).

мумов. Так как в случаях (Б→М; Б→М) и (М→Б; М→Б) расхождения между размерами В-звезды, получаемыми из решений главных и вторичных минимумов, в два-три раза превышают расхождения между аналогичными величинами в случаях (Б→М; М→Б) и (М→Б; Б→М), то два первых случая при дальнейшем рассмотрении были отброшены. Случай (М→Б; Б→М), несмотря на хорошее согласие величин a_{B1} и a_{B2} , также были отброшены как нереальные, поскольку при последующем вычислении абсолютных элементов мы получили неправдоподобно большие массы компонент ($M_{(B)} \approx 30 \div 40 M_{\odot}$; $M_{WR} \approx 50 \div 90 M_{\odot}$). Итак, остается один случай (Б→М; М→Б), который при α_{01} очень близком или равном 1.0 (касательное затмение) дает хорошую сходимость значений a_{B1} и a_{B2} и приводит в последующих вычислениях к реальным значениям масс звезд.

В дальнейшем, те минимумы, для которых значение максимальной фотометрической фазы затмения было взято равным 1.0, были вновь

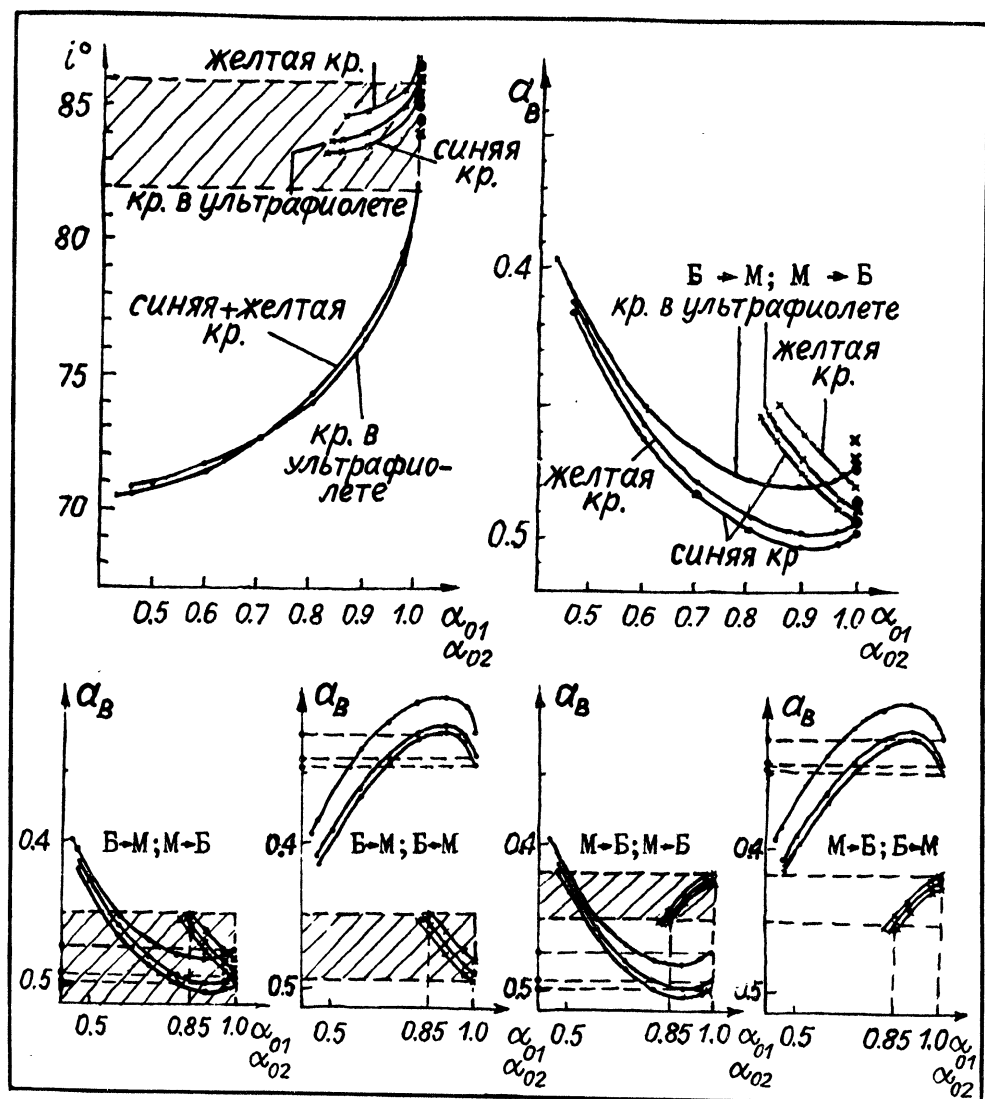


Рис.5. Совокупность возможных решений "звездных" кривых блеска SQ Сер, полученных по форме главного (x) и вторичного (o) минимумов. (Наблюдения Карташевой).

решены более точным методом Мерилла для целых затмений. Уточненные результаты также представлены на рис.2, 3, 4, 5 крупными точками и крестиками.

Все результаты решения "звездных" кривых блеска собраны в таблице №2, где помимо относительных приведены и абсолютные элементы системы, вычисленные с помощью спектральных данных, полученных ранее Хилтнером (1944):

$$f = \frac{m_B \sin^3 i}{(1 + \frac{m_{WR}}{m_B})^2} = 4.38, \quad a_{WR} \sin i = 9.57 R_{\odot},$$

где f — функция масс системы,

a_{WR} — расстояние WR-звезды от центра тяжести системы.

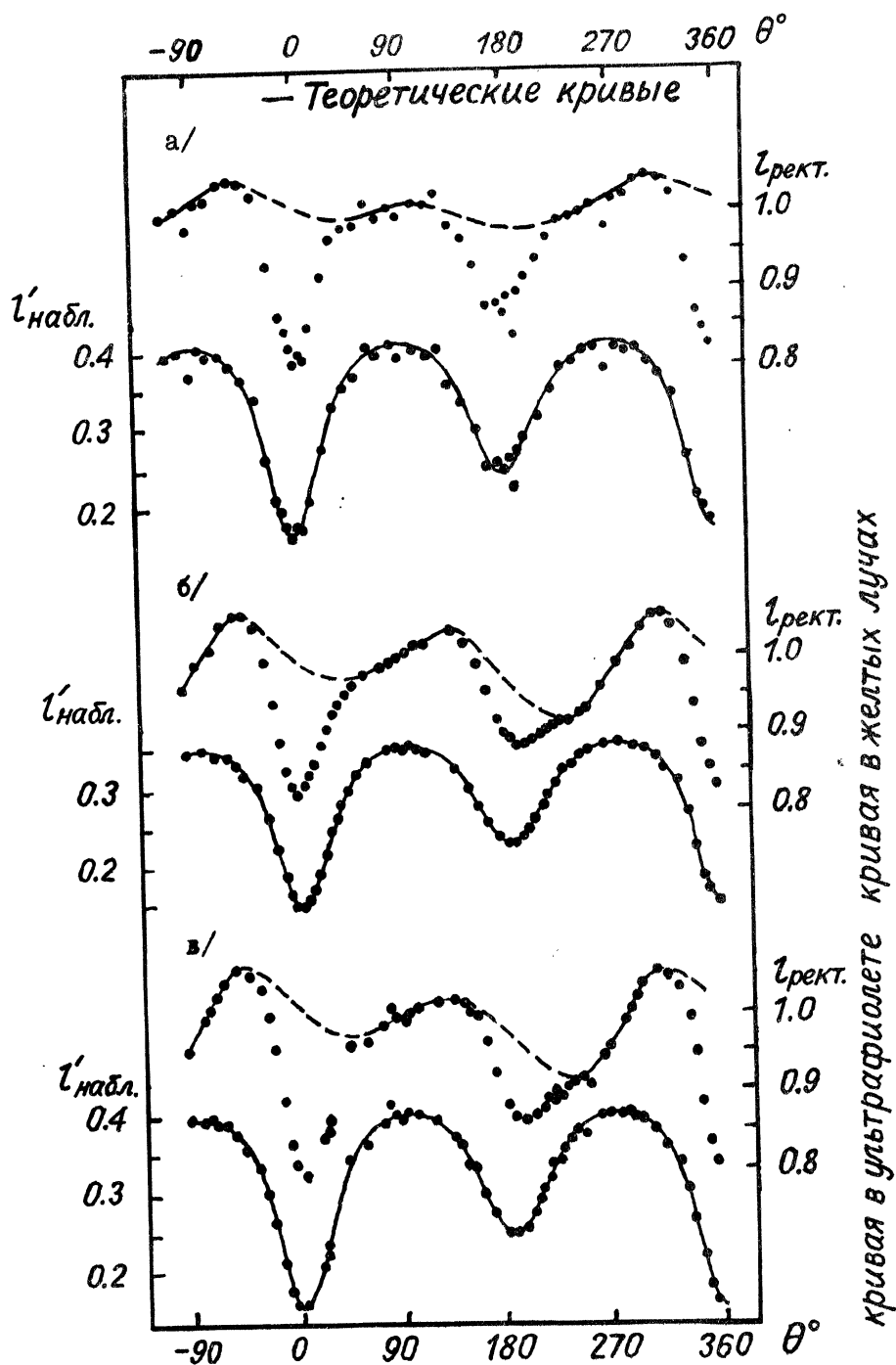


Рис. 6. Ректифицированные и "звездные" кривые блеска SQ Сер:
а) — наблюдения Гапошкина, б) и в) — наблюдения Хилтнера.

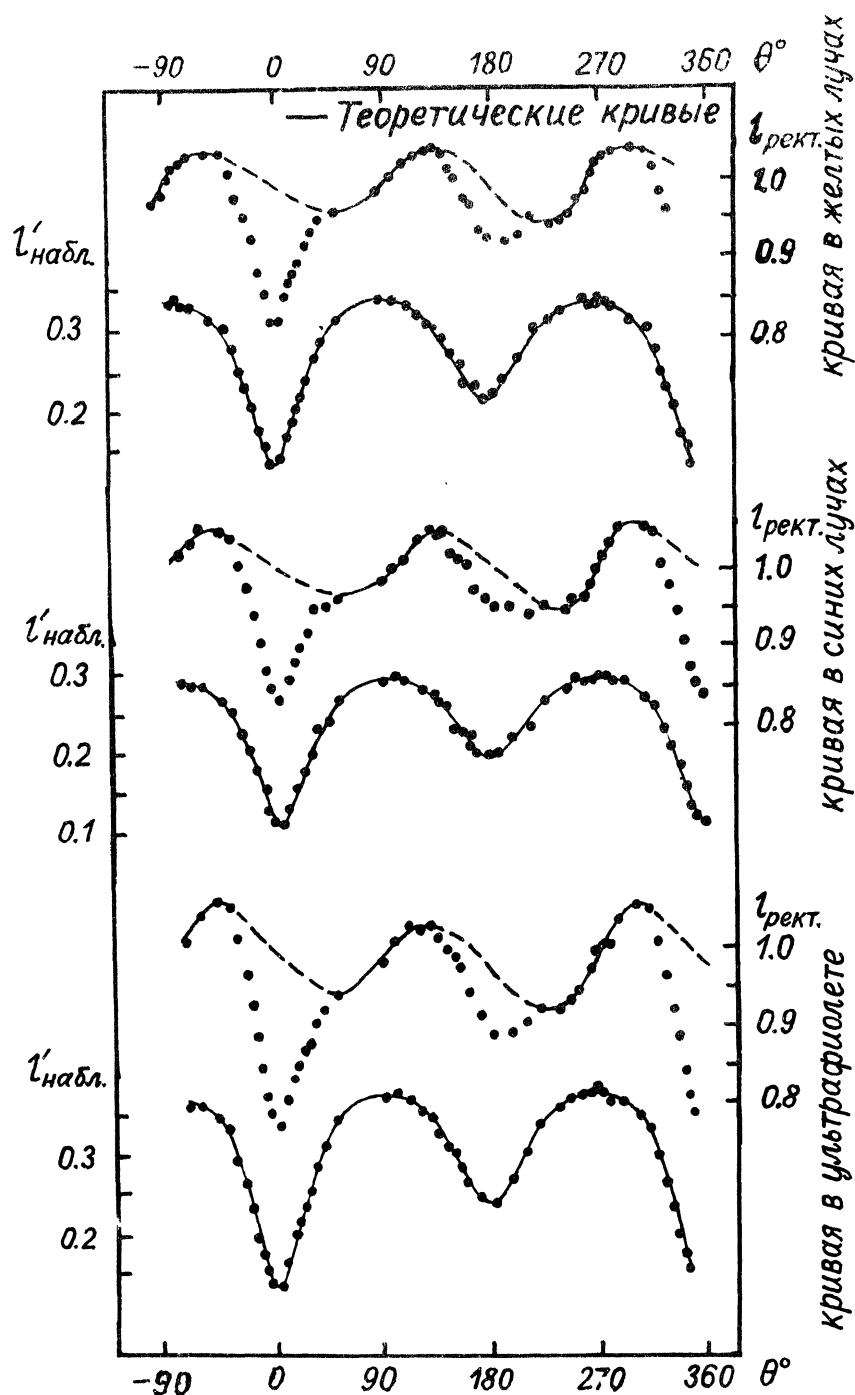


Рис. 7. Ректифицированные и "звездные" кривые блеска SQ Сер.
(Наблюдения Чукайнова)

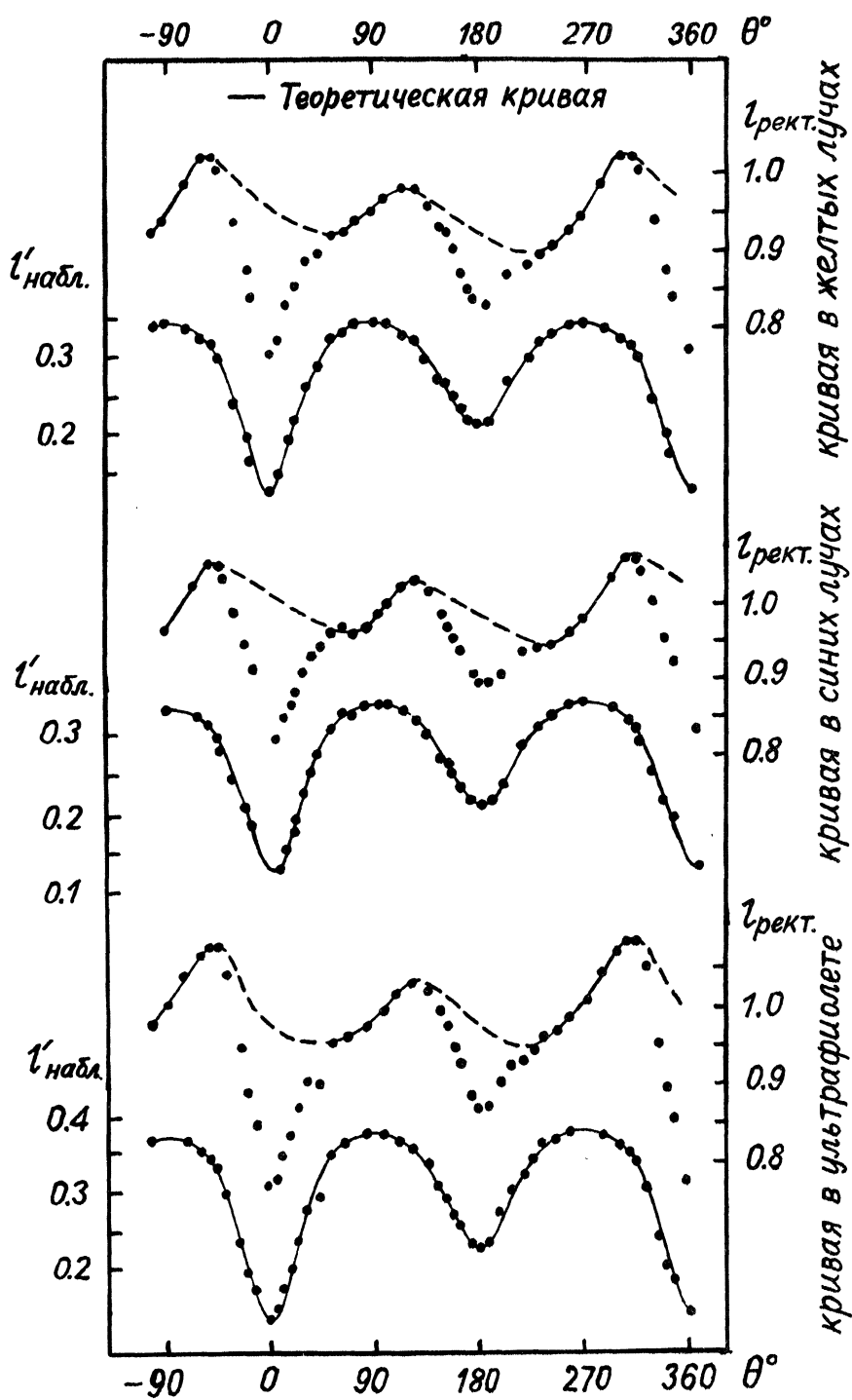


Рис. 8. Ректифицированные и "звездные" кривые блеска SQ Сер. (Наблюдения Карташевой)

Отношение масс компонент системы ($q = m_{WR}/m_B$) определялось из предположения о заполнении В-звездой ее ВКП. Тот факт, что получаемая при этом масса В-звезды удовлетворяет соотношению масса—радиус для звезд главной последовательности, которое уточнено статистическими исследованиями Свечникова (1969), может свидетельствовать о правильности сделанного выше предположения. Абсолютная болометрическая величина В-звезды определялась из уточненной Свечниковым (1969) зависимости масса—светимость для звезд главной последовательности, после чего находился спектральный класс спутника. Он оказался лежащим в области между В0 и В1. Далее, из предположения, что каждая компонента излучает как абсолютно черное тело, по формуле

$$\frac{J_{WR \text{ ядра}}}{J_B} = \frac{\exp(C_2/\lambda T_B) - 1}{\exp(C_2/\lambda T_{WR}) - 1}$$

определялась эффективная температура WR-звезды, по формуле $M_{\text{бол}} = 42.31 - 51 \lg R - 10 \lg T$ находилась ее абсолютная болометрическая величина.

Поскольку проведение уровня A_1 в фазах затмения "звездной" кривой допускает некоторый произвол (главным образом в фазах близких к центрам затмений, так как точки перегиба в ректифицированных кривых блеска определяется весьма уверенно), то для двух кривых блеска CQ Сер (наблюдения Хилтнера) было проведено исследование влияния варьирования уровня A_1 на относительные элементы системы. Оно показало, что допускаемые изменения в проведении уровня A_1 влияют в основном на глубину минимумов и, следовательно, на определение блеска звезд и оболочки. Максимальная ошибка в определении блеска оказалась равной ± 0.01 . Размеры звезд и наклонность орбиты системы показали небольшие изменения: $\Delta i \approx \pm 0.5^\circ$, $\Delta a_B \approx \pm 0.005$. Поэтому ошибки величин i и a_B находились из сходимости их значений, определенных в результате решения главного и вторичного минимумов. Они составили: $\Delta a_B = \pm 0.015$, $\Delta i = \pm 1^\circ$ — для кривых блеска, полученных нами, и кривой Гапошкина, $\Delta a_B = \pm 0.015$, $\Delta i = \pm 0.5^\circ$ — для кривых блеска, полученных Хилтнером. Ошибки определения абсолютных элементов системы, вычисленные исходя из ошибок относительных элементов, приведены в таблице 2. Как видно из этой таблицы, размеры В-компонента, определенные по наблюдениям разных лет, сходятся довольно хорошо в пределах ошибок. Размеры же ядра WR-звезды показывают изменение со временем, однако в решениях всех "звездных" кривых размеры светящегося и непрозрачного ядра близки друг к другу и к размерам внутренней критической поверхности WR-звезды. Абсолютные размеры, массы, температуры и светимости, полученные для WR-звезды, хорошо соответствуют общепризнанным оценкам этих величин для звезд Вольф—Райе (Андерхилл, 1966; Смит, 1967; Андерхилл, 1969; Мортон, 1970; Рублев, 1970; Рублев, 1972). Средние значения относительных и абсолютных элементов системы приведены в таблице 3. Ошибки элементов, данные в этой таблице, вычислены исходя из внутренней сходимости результатов решения отдельных "звездных" кривых блеска CQ Сер.

Таблица 3

Средние значения абсолютных и относительных элементов
затменно-двойной CQ Сер

Наклонность орбиты	$84^{\circ}4 \pm 1^{\circ}2$
Блеск :	
WR-звезды:	
ядра	0.19 ± 0.03
оболочки	0.64 ± 0.04
В-звезды:	0.16 ± 0.04
Отношение поверхностных яркостей ($J_{WR \text{ ядра}}/J_B$)	1.8 ± 0.3
Отношение масс (M_{WR}/M_B)	0.61 ± 0.05
Массы:	
WR-звезды	$7.0 \pm 1.0 M_{\odot}$
В-звезды	$11.4 \pm 0.7 M_{\odot}$
Радиус орбиты	$15.5 \pm 0.4 R_{\odot}$
Радиусы больших полуосей:	
WR-звезды:	
светящ. ядра	$5.7 \pm 0.6 R_{\odot}$
непроз. ядра	$5.3 \pm 0.3 R_{\odot}$
В-звезды	$7.3 \pm 0.2 R_{\odot}$
Эффективные температуры:	
WR-ядра	$34800 \pm 2500^{\circ} K$
В-звезды	$23700 \pm 1300^{\circ} K$ (B0—B1)
Светимости ($M_{\text{бол.}}$):	
WR-ядра	-6.9 ± 0.2
В-звезды	-5.3 ± 0.2

Используя результаты решения "звездных" кривых блеска, мы произвели далее разложение девяти вышеупомянутых кривых блеска системы на "звездные" и "оболочечные". "Звездные" кривые блеска CQ Сер и их теоретическое представление даны на рисунках 6, 7, 8. Из сравнения этих рисунков видно, что, несмотря на существенные различия, отмеченные в форме наблюдаемых кривых блеска системы разных лет (см. табл. 1), выделенные из них "звездные" кривые идентичны. За все различия почти целиком оказались ответственны "оболочечные" кривые блеска, обсуждение и решение которых будут даны в следующей работе.

В заключение авторы благодарят З.Н. Шукстову за ценные замечания, сделанные при просмотре статьи.

Литература:

- Андерхилл, 1966—Underhill A.B., The Early Type Stars. Astrophysics and Space Science Library, v.6, Dordrecht—Holland, 1966.
Андерхилл, 1969—Underhill A.B., Astrophysics and Space Science 3, 109.

- Гапошкин, 1944—Garoshkin S., ApJ 100, 242.
 Гусейнзаде А.А., 1967, Астрофизика 3, 359.
 Карташева Т.А., 1966, Дипломная работа, УрГУ.
 Карташева Т.А., 1972, ПЗ 18, 459.
 Крон, Гордон, 1950—Kron G.E., Gordon K.C., ApJ 111, 454.
 Мак Лафлин, Хилтнер, 1941—Mc. Laughlin D.B., Hiltner A.,
 PASP 53, 328.
 Мортон, 1970—Morton Donald C., ApJ 160, 215.
 Рублев С.В., 1970, Изв. САО т. I, 25.
 Рублев С.В., 1972, Изв. САО т. IV, 32.
 Свечников М.А., 1954, Дипломная работа, ЛГУ.
 Свечников М.А., 1969, Ученые записки УрГУ № 88, серия астроно-
 мическая вып. 5.
 Смит, 1967—Linsey F. Smith, PASP 79, 347.
 Халиуллин Х.Ф., Черепашук А.М., 1970, АЦ № 551.
 Халиуллин Х.Ф., 1972, АЖ 49, 777.
 Хилтнер, 1944—Hiltner W.A., ApJ 99, 273.
 Хилтнер, 1950—Hiltner W.A., ApJ 112, 477.
 Чугайнов П.Ф., 1960, ПЗ 13, 148.

Уральский гос. университет
 Коуровская обсерватория

*Поступила в редакцию
 31 мая 1974 г.*