

Фотометрическое исследование затменной системы HS Геркулеса

Д. Я. Мартынов, М. И. Лавров

Проведен детальный анализ U, B, V – наблюдений HS Геркулеса, проведенных на Южной Станции ГАИШ. В АОЭ определены фотометрические элементы системы в разных вариантах. Отобраны наилучшие элементы (табл. 9). В АОЭ также определены элементы по U, B, V – наблюдениям Холла и Хаббарда (1971) в Китт–Пик (табл. 13). Различия между теми и другими результатами характеризуют неуверенность в определении фотометрических элементов по хорошим фотоэлектрическим наблюдениям. Анализируются возмущения кривых блеска, происходящие от объективных причин. Высказывается предположение о вращении линии апсид у HS Геркулеса с периодом 110–130 лет. Определены абсолютные размеры системы.

Photometric Investigation of the Eclipsing Binary HS Herculis

by D. Ja. Martynov and M. I. Lavrov

The eclipsing binary HS Herculis was observed in the three colours (U, B, V) at the Crimean Station of the Sternberg Institute in the years 1969–1970. In the article the detailed analysis of these observations and the best photometric elements are given (Table 9). Moreover the photometric elements are determined from the observations made at the Kitt Peak Observatory (Table 13). The differences between the both sets of photometric elements when deduced from the good electrophotometric observations characterize the uncertainty of such determinations. The distortions of the light curves resulting from the objective sources are analysed. The apsidal rotation with a period of 110–130 years is suggested. The absolute dimensions of the system are determined.

Переменность HS Геркулеса была открыта Мартыновым в 1934 г., когда она служила звездой сравнения при визуальных оценках переменной DI Геркулеса. В двух работах Мартынов (1940, 1951) опубликовал и уточнил элементы изменений блеска за 1934–43 гг., а Лавров решил кривую блеска HS Геркулеса и определил фотометрические элементы этой затменной переменной (опубликованы в каталоге Свечникова, 1969).

В 1963 г. Холл начал вести наблюдения NS Геркулеса, на этот раз фотоэлектрическим методом, и продолжил их в 1968 г. (Холл, Хаббард, 1971). В том же 1968 г., а затем и в 1969 г. Мартыновым при участии В.Ерижкова, Х.Халиуллина и А.Черепашука были проведены фотоэлектрические измерения NS Геркулеса на 48-см и 60-см рефлекторах Южной Станции ГАИШ. Было сделано 903 измерения: в лучах V — 299, В — 312 и U — 292. Звездой сравнения служила BD + 24° 2555, которая изредка контролировалась звездой BD + 24° 5556. Измерения исправлялись за дифференциальную экстинкцию, если это было необходимо.

Оригинальные измерения с описанием методики и их обработки будут опубликованы в другом издании (предположительно в "Сообщениях ГАИШ"). В настоящей статье приводятся результаты обработки — кривые блеска и их анализ с целью определения фотометрических элементов системы.

Графическое представление всех наблюдений показано на рис. 1, где по оси абсцисс отложены фазы, вычисленные по формуле:

$$\text{Фаза} = (J.D. hel - 2440015.6141) \cdot 0.6107101,$$

а по оси ординат — Δm относительно звезды сравнения.

Вслед за тем были построены нормальные кривые блеска, которые приведены в таблицах 1, 2, 3. При этом были отброшены лишь очень немногие наблюдения. Число измерений, вошедших в каждую нормальную точку, приведено в последних колонках этих таблиц. Некоторые измерения вошли с половинным весом.

Таблица 1

Средняя кривая блеска NS Геркулеса в фотометрической системе V

№	Фаза	Δm	I	I_r	p
1	0 ^h 0087	+ 0 ^m 3 54	0.6680	0.6808	7
2	193	299	7027	0.7150	6
3	274	215	7593	0.7708	6
4	365	105	8402	0.8505	6.5
5	479	+ 3	9230	0.9320	6
6	564	— 57	9754	0.9836	7
7	648	— 73	9899	0.9977	7
8	796	— 84	1.0000	1.0072	7
9	1190	— 80	0.9963	1.0020	7
10	1476	— 82	9982	1.0025	6
11	1672	— 81	9972	1.0005	6.5
12	1983	— 79	9954	0.9969	10
13	2398	— 79	9954	0.9944	10
14	3822	— 96	1.0111	1.0033	12
15	4344	— 75	0.9917	0.9829	7
16	4559	— 27	9489	0.9403	5
17	4655	— 4	9290	0.9206	5
18	4779	+ 15	9129	0.9047	6
19	4873	+ 7	9196	0.9113	7

Таблица 1
(продолжение)

№	Фаза	Δm	l	l_r	P
20	0P4964	+0 ^m 010	0.9171	0.9088	6
21	5051	17	9112	0.9030	5
22	5142	+ 2	9238	0.9155	5
23	5268	- 36	9568	0.9482	6
24	5362	- 62	9799	0.9710	6
25	5456	- 81	9972	0.9883	5
26	5598	- 98	1.0130	1.0042	7
27	5771	- 97	1.0118	1.0034	10
28	5954	- 87	1.0028	0.9950	10
29	6260	- 84	1.0000	0.9932	7
30	7576	- 93	1.0084	1.0078	9
31	8638	- 73	0.9899	0.9951	10
32	9092	- 75	9917	0.9987	10
33	9362	- 68	9854	0.9933	6
34	9458	- 34	9550	0.9635	7
35	9533	+ 21	9078	0.9171	5
36	9580	61	8750	0.8848	5
37	9616	108	8379	0.8482	5
38	9677	151	8054	0.8162	7
39	9741	231	7482	0.7598	7
40	9794	305	6989	0.7112	6
41	9845	341	6761	0.6888	5
42	9892	348	6717	0.6845	6
43	9947	347	6724	0.6852	6

Таблица 2

Средняя кривая блеска NS Геркулеса в фотометрической системе В

№	Фаза	Δm	l	l_r	P
1	0P0087	+0 ^m 344	0.6680	0.6837	5
2	170	320	6830	6984	6
3	252	222	7475	7620	5
4	328	151	7980	8118	5
5	417	+ 54	8726	8853	6
6	510	- 36	9480	9595	6
7	580	68	9763	9873	6
8	656	83	9899	1.0004	6
9	763	94	1.0000	1.0100	5
10	1138	88	0.9945	1.0027	10
11	1521	87	9936	0.9994	9
12	1806	96	1.0019	1.0056	7
13	2119	88	0.9945	0.9960	10
14	2790	92	9982	0.9951	10

Таблица 2 (продолжение)

№	Фаза	Δm	l	l_r	p
15	0P8963	-0.104	1.0093	1.0002	10
16	4372	85	0.9917	0.9822	6
17	4560	54	9638	0.9543	5
18	4683	27	9402	0.9309	6
19	4821	24	9376	0.9283	6
20	4892	24	9376	0.9283	5
21	4964	26	9393	0.9300	6
22	5053	27	9402	0.9309	7
23	5142	34	9462	0.9369	6
24	5266	52	9620	0.9526	6
25	5356	78	9853	0.9757	6
26	5462	96	1.0019	0.9923	6
27	5610	102	1.0075	0.9981	6
28	5743	108	1.0130	1.0039	8
29	5894	108	1.0130	1.0043	10
30	6194	95	1.0009	0.9934	10
31	7652	102	1.0075	1.0080	9
32	8654	86	0.9927	0.9999	10
33	8973	79	9863	0.9953	9
34	9230	73	9808	0.9911	6
35	9370	85	9917	1.0024	5
36	9463	55	9647	0.9760	6
37	9523	- 8	9238	0.9357	5
38	9565	+ 34	8888	0.9012	5
39	9624	93	8418	0.8550	6
40	9676	152	7973	0.8111	7
41	9735	222	7475	0.7620	6
42	9780	263	7198	0.7347	6
43	9816	326	6792	0.6947	5
44	9876	360	6583	0.6741	5
45	9908	369	6528	0.6687	5
46	9977	+ 342	6693	0.6850	6

Таблица 3

Средняя кривая блеска HS Геркулеса в фотометрической системе U

№	Фаза	Δm	l	l_r	p
1	0P0091	+0 ^m .153	0.6468	0.6626	6
2	166	120	6668	6825	5
3	261	+ 5	7413	7569	5
4	333	- 72	7958	8112	4.5
5	426	189	8863	9014	6.5

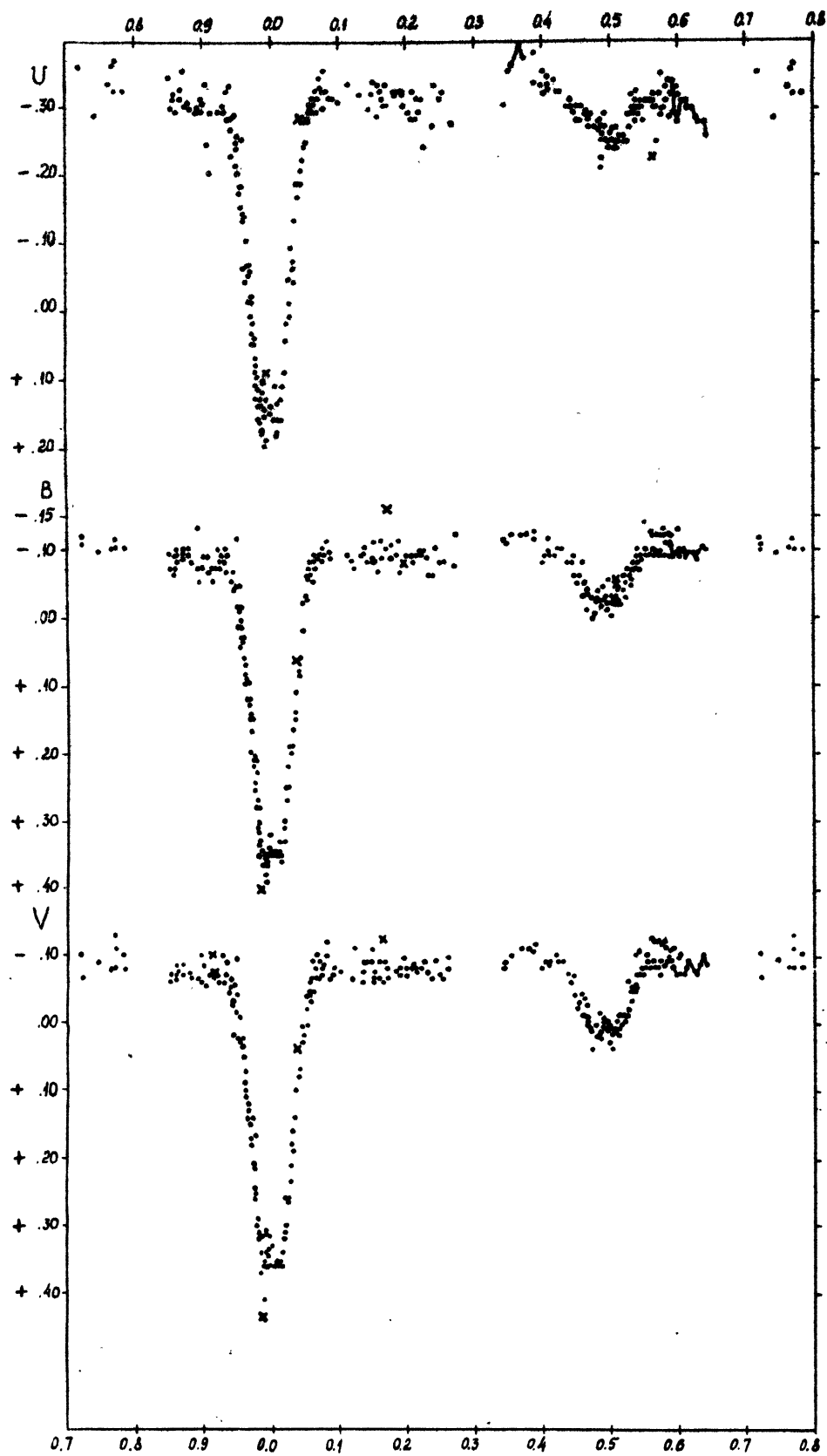


Рис. 1

Таблица 3
(продолжение)

№	Фаза	Δm	l	l_r	p
6	0P0528	-0 ^m 264	0.9497	0.9645	6
7	588	295	9772	9918	7
8	661	303	9845	9989	6
9	765	319	9991	1.0131	5
10	946	319	9991	1.0123	5.5
11	1497	314	9945	1.0048	8
12	1811	316	9963	1.0048	6
13	2071	300	9817	0.9888	8.5
14	2427	293	9754	9808	7
15	3734	353	1.0308	1.0333	7
16	4172	325	1.0046	1.0071	8
17	4510	295	0.9772	0.9798	8
18	4695	271	9559	9585	6.5
19	4838	252	9393	9419	6
20	4902	268	9532	9558	6
21	4992	251	9384	9410	5
22	5081	253	9402	9428	7
23	5213	263	9489	9515	7
24	5348	302	9836	9862	8
25	5510	298	9799	9824	9.5
26	5709	309	9899	9924	10
27	5922	315	9954	9979	10
28	6238	291	9736	9761	8
29	7599	333	1.0120	1.0175	7
30	8611	316	0.9963	1.0072	8
31	8880	297	9790	0.9914	7
32	9107	276	9603	9738	6
33	9349	302	9836	9930	8
34	9473	252	9393	9542	8
35	9554	198	8937	9088	7
36	9612	108	8226	8379	6
37	9680	- 47	7777	7931	7
38	9741	+ 27	7264	7420	7
39	9791	103	6773	6930	6
40	9840	144	6522	6680	6
41	9898	156	6451	6609	6
42	9966	146	6510	6668	5.5

Ректификация кривых блеска

Блеск HS Геркулеса вне минимумов был представлен рядом $l = A_0 + A_1 \cos \nu + A_2 \cos 2\nu + B_1 \sin \nu + B_2 \sin 2\nu$, где ν — истинная долгота в орбите. Полученные значения коэффициентов A и B показаны в табл. 4.

Таблица 4

кривая	V	B	U
A ₀	1.0006 ± 0.0006	0.9991 ± 0.0014	0.9929 ± 0.0035
A ₁	-0.0084 ± 0.0009	-0.0103 ± 0.0022	-0.0079 ± 0.0053
A ₂	0.0020 ± 0.0011	-0.0008 ± 0.0026	-0.0003 ± 0.0067
B ₁	0.0003 ± 0.0008	-0.0008 ± 0.0020	0.0055 ± 0.0051
B ₂	0.0006 ± 0.0008	0.0025 ± 0.0018	-0.0051 ± 0.0044
Точки M	8 - 14; 26 - 32	9 - 15; 27 - 34	9 - 16; 26 - 32

Как видно из этой таблицы, у HS Геркулеса нет достоверных несимметричных изменений блеска (члены с B), но и эффект эллипсоидальности (член с A₂) практически себя не проявляет.

После того, как члены с $\sin \nu$ и $\sin 2\nu$ были отброшены, новое определение коэффициентов A дало следующие результаты (табл. 5):

Таблица 5

Кривая	V	V*	B*	B	U*	U
A ₀	1.0007 ± 6	1.0004 ± 8	0.9995 ± 13	0.9995 ± 12	0.9922 ± 33	0.9924 ± 31
A ₁	-0.0085 ± 10	-0.0091 ± 12	-0.0110 ± 20	-0.0109 ± 18	-0.0065 ± 50	-0.0060 ± 45
A ₂	0.0019 ± 11	—	-0.0003 ± 23	—	-0.0020 ± 62	—

Звездочками отмечены значения, принятые для дальнейшего анализа.

Ректификация интенсивностей осуществлялась согласно Ресселу и Меррилли (1952) по формуле

$$I_r = \frac{I + C_0 + C_1 \cos \nu + C_2 \cos 2\nu}{(A_0 + C_0) + (A_2 + C_2) \cos 2\nu}, \quad (1)$$

где коэффициенты C определяются соотношениями

$$C_1 = -A_1; \quad C_0 = -(0.75 - 0.25 \cos^2 i) \frac{G_1 + G_2}{G_1 - G_2} A_1 \operatorname{cosec} i$$

$$C_2 = -0.25 \frac{G_1 + G_2}{G_1 - G_2} A_1 \sin i$$

$$G_1 = L_2 r_1^2 E_1 / E_2; \quad G_2 = L_1 r_2^2 E_2 / E_1 \quad (2)$$

Величина E_1/E_2 есть отношение световых эффективностей обеих звезд в данной области спектра (для U, B, V-системы). Поскольку

значения L и g для обеих компонент были предварительно известны (Холл и Хаббард, 1971), нахождение E_1/E_2 не составляет труда, если применить формулу Рессела и Меррилла (1952):

$$A_1 = -0.49 [G_2 - G_1], \quad (3)$$

где A_1 берется из таблицы 5.

В табл. 6 сведены все принятые для ректификации данные.

Таблица 6

	V	B	U
E_2/E_1	1.4	1.6	1
$\frac{G_2 + G_1}{G_2 - G_1}$	1.4	1.2	1.5
C_0	0.0095	0.0100	0.0074
C_1	0.0091	0.0103	0.0065
C_2	0.0032	0.0034	0.0024

Ректифицированные значения интенсивностей приведены в пятых столбцах таблиц 1–3. Ректификация фаз за небольшой эффект эллипсоидальности компонент была включена в программу определения элементов и осуществлялась по формуле, предложенной Мерриллом (1952) со значением $z = 0.006$ ($b/a = 0.997$) для всех трех кривых.

Элементы фотометрической орбиты

Вычисление элементов фотометрической орбиты NS Геркулеса производилось на ЭВМ "Наири" по программам прямого метода (Лавров, 1970, 1971), разработанного в АОЗ. За исходные были приняты элементы $x = 0.4$, $k = 0.55$, $r_1 = 0.242$, $r_2 = 0.133$, $i = 83^\circ 8$, $L_1 = 0.955$, определенные Лавровым еще в 1956 г. с помощью номограмм Меррилла по визуальной кривой Мартынова (1951). Эти элементы опубликованы в каталоге Свечникова (1969).

Форма минимумов показывает, что во вторичном минимуме происходит полное затмение. Наличие значительного интервала кольцевых фаз затмения в главном минимуме делает систему NS Геркулеса весьма перспективной для точного определения коэффициента потемнения к краю диска главной компоненты. В этом отношении она похожа на систему $\dot{Y}Z$ Кассиопеи, отличаясь от последней лишь присутствием в кривой небольших по величине эффектов фазы и эллипсоидальности.

После нахождения прямым методом предварительных элементов, окончательные их значения определялись по методу дифференциальных поправок в его машинном варианте (Лавров, 1971). Запишем потерю блеска в главном минимуме так:

$$1 - l = (1 - \lambda_0) \cdot x_{ar}(k, r_2, \cos^2 i, \theta), \quad (4)$$

где $1 - \lambda_0$ есть потеря блеска в момент внутреннего касания дисков. Из уравнения глубин следует, что

$$1 - \lambda_0 = x_z(k) L_1, \quad (5)$$

где L_1 равно блеску системы в середине вторичного минимума. Дифференцируя выражение (4) с учетом (5), получим:

$$\left(\frac{\partial a}{\partial k} + a \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial k}\right) \Delta k + \frac{\partial a}{\partial r_2} \Delta r_2 + \frac{\partial a}{\partial (\cos^2 i)} \Delta (\cos^2 i) + \left(\frac{\partial a}{\partial x} + a \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial x}\right) \Delta x = \frac{O-C}{\tau L_1} \quad (6)$$

Однако, несмотря на высокую чувствительность кольцевых фаз к изменениям x (влияние условия (5)), включение в решения систем уравнений вида (6) по способу наименьших квадратов члена с Δx не дало удовлетворительных результатов ни для одной кривой. Значения x для V-кривой получаются около 0.10–0.15, для U – около 0, а для В – даже существенно меньше нуля. Причиной этого является наличие "возмущений" неизвестной природы около дна кривых. Исключение из анализа одной наиболее уклоняющейся точки (последняя точка в таблицах 1–3) заметно улучшает положение. Хотя для В-кривой по-прежнему $x < 0$, для V- и U-кривых результаты получаются более правдоподобными. Эти результаты приведены в таблице 7 под № 1 и 2. Здесь $\bar{\sigma}_1$ есть среднеквадратичное уклонение наблюдаемой точки единичного веса в главном минимуме, а σ_2 – то же во вторичном (см. ниже) от теоретической кривой. Веса отдельных точек кривой брались равными 1¹.

Таблица 7

"Круговые" фотометрические элементы системы HS Her в различных вариантах при значениях светимости L_1 главной компоненты: $L_{1V}=0.907$; $L_{1B}=0.930$; $L_{1U}=0.942$ (не исправленных за эффект отражения).

№ вар.	x_1	k	r_2'	i	$\bar{\sigma}_1 \cdot 10^6$	$e \sin \omega$	$\bar{\sigma}_2 \cdot 10^6$	Кривая
1	0.29 ± 15	0.575 ± 10	0.1460 ± 11	86°9 ± 4	4485	0.025	2291	V
2	0.20 ± 20	0.588 ± 13	0.1454 ± 15	87.4 ± 4	5788	—	—	U
3	0.1	0.5864	0.1463	86.71	4521	0.038	2249	V
4	0.2	0.5808	0.1462	86.81	4497	0.031	2229	"
5	0.3	0.5746 ± 18	0.1460 ± 11	86.93 ± 36	4485	0.025	2291	"
6	0.4	0.5680	0.1460	87.02	4500	0.018	2421	"
7	0.5	0.5612	0.1459	87.11	4599	—	—	"
8	0.3 ± 23	0.5754 ± 23	0.1440 ± 12	86.42 ± 34	6438	0.054	3322	B
9	0.4 ± 23	0.5749 ± 23	0.1452 ± 15	87.63 ± 61	5910	—	—	U
Сред.	—	0.575	0.145	87.0	—	0.035	—	Из №№ 5, 8, 9

Низкая точность определения коэффициента x_1 и ее неблагоприятное влияние на точность определения k делает элементы №№ 1 и 2 ненадежными и заставляет принять другую процедуру – изменяя значение x_1 , искать наилучшее представление главного минимума из уравнений (5),

в которых $\Delta x = 0$. Всего было вычислено 20 вариантов. Насколько влияет вариация x на элементы системы, показано в таблице 7 в вариантах 3–7 (без учета одной точки). Видно, что если вариант 5 и является наилучшим, судя по величине $\bar{\sigma}_1$, то и в соседних с ним вариантах $\bar{\sigma}_1$ лишь очень немного больше. Поэтому для В– и U–кривых другие варианты, кроме принятых, не приводятся.

Недавно Клингесмит и Собесский (1970) на основе современных моделей звездных фотосфер вычислили теоретические значения коэффициентов потемнения к краю дисков горячих звезд. Для звезды спектрального класса В5–В8 главной последовательности их таблица дает $x_V = 0.30$, $x_B = 0.35$, $x_U = 0.37$. Анализ таблицы 7 показывает, что при значениях $x_V = 0.3$, $x_B = 0.3$, $x_U = 0.4$, близких к теоретическим, результаты определения элементов фотометрической орбиты хорошо согласуются друг с другом. Приписав этим элементам для V–, B–, U–кривых веса 2, 1, 1 в приблизительном соответствии с величинами $\bar{\sigma}_1$, мы нашли средневзвешенные значения элементов фотометрической орбиты.

Варианты 1–9 были решены при отбрасывании последней точки в каждой из таблиц 1–3. Эти точки были приняты во внимание при вычислении последующих 11 вариантов. Нет никаких априорных оснований для исключения из рассмотрения точек, которые ближе всего лежат к середине минимума. Но с другой стороны, они имеют характер какого-то возмущения и явно противоречат теоретическому ходу затмения, так что при теоретическом его рассмотрении не должны приниматься во внимание. Впрочем, элементы и здесь получаются очень сходными с теми, которые были найдены в первых 9 вариантах при некотором возрастании величины $\bar{\sigma}_1$.

В таблице 8 показано представление кривых V, B и U соответственно элементами 5, 8, 9. Положения середин затмения, практически не зависящие от принятой системы элементов фотометрической орбиты, определены путем проб по минимумам сумм квадратов отклонений. В лучах V, B, U они соответственно приходятся на фазы 0P9995, 0P9998, 0P9991 с вероятными погрешностями, не превосходящими $\pm 0P0002$. В таблице 8 фазы отсчитаны от этих значений.

Таблица 8

Представление кривых V, B, U в главном минимуме элементами 5, 8, 9

(Даны $(1-I)_O - (1-I)_C$ в единицах 10^{-4})

V			B			U			B (Холл)	
ММ	Фаза	O–C	ММ	Фаза	O–C	ММ	Фаза	O–C	Фаза	O–C
точек			точек			точек				
33	0.9367	+50	36	0.9465	–94	34	0.9482	–14	0.9593	–16
34	.9463	–5	37	.9525	–43	35	.9563	–107	.9678	–2
35	.9538	+10	38	.9567	+10	36	.9621	+134	.9740	+29
36	.9585	–3	39	.9626	+16	37	.9689	–15	.9788	–7

Таблица 8
(продолжение)

V			B			U			B (Холл)	
ММ	Фаза	О-С	ММ	Фаза	О-С	ММ	Фаза	О-С	Фаза	О-С
точек			точек			точек				
37	0.9621	+86	40	0.9678	+23	38	0.9750	-48	0.9833	+10
38	.9682	-88	41	.9737	+15	39	.9800	+33	.9877	+ 2
39	.9746	-48	42	.9782	-74	40	.9849	+19	.9940	- 0
40	.9799	+41	43	.9818	+70	41	.9907	- 1	.0008	+ 9
41	.9850	- 1	44	.9878	+37	42	.9975	-(107)	.0052	- 3
42	.9897	-14	45	.9910	+58	1	.0100	-10	.0125	- 4
43	.9952	-55	46	.9979	-(138)	2	175	-29	.0153	- 9
1	0.0092	+14	1	0.0089	-92	3	270	-20	.0250	- 3
2	.0198	-17	2	172	-29	4	342	+81	.0285	-13
3	.0279	+44	3	254	-59	5	435	-48	.0329	-16
4	.0370	- 8	4	330	+33	6	537	-11	.0361	+14
5	.0484	+ 4	5	419	+66				.0413	+39
6	.0569	-54	6	512	-54				.0462	-37
			7	582	0				.0530	+19
									.0579	+ 5

Известно, что у разных авторов один и тот же наблюдательный материал при количественном анализе приводит иногда к различающимся результатам, даже при наличии строгой математической теории. Определение фотометрических элементов системы не составляет исключения. Мы приводим ниже элементы HS Геркулеса, определенные в ГАИШ Л. Угольковой по В-кривой:

При $\Delta m = -0.094$, постоянные ректификации $a = 1.000$, $b = 0.0125$, $c = 0$.

При $x_1 = 0.4$ из главного минимума найдено $k = 0.578$, $r'_1 = 0.257 \pm 0.002$, $r'_2 = 0.148 \pm 0.002$, $i = 87^\circ 15' \pm 0^\circ 3'$, а с помощью независимого решения кривой блеска во вторичном минимуме найдено $g = 0.050$, $h = -0.013$, $e = 0.052$ и $\omega = 104^\circ 6'$. Эти результаты следует сравнивать с элементами варианта 8 таблицы 7. Можно считать, что в пределах вероятных ошибок результаты сходятся.

Но независимое решение вторичного минимума в данном случае вряд ли можно признать целесообразным. Поэтому в АОЭ, после определения r'_1 , r'_2 и $\text{ctg } i'$ из главного минимума находили

$$r_2'' = \frac{1+g\eta}{1-g\eta} r_2' \quad \text{и} \quad \text{ctg } i'' = \frac{1+2g\eta}{1-2g\eta} \text{ctg } i'$$

и подбирали g таким, чтобы вторичный минимум удовлетворялся наилучшим образом. С самого начала положено $x_2 = 0.6$. Попутно определялась путем варьирования и фаза середины вторичного минимума (0.4397 и 0.4399 соответственно для кривых V и B), что давало возможность определить величины h . Эти наилучшие значения g и h так-

же внесены в таблицу 9, а в табл. 7 даны соответствующие значения $\bar{\sigma}_2$ — ошибки одной нормальной точки единичного веса.

Представление наблюдений элементами табл. 7 в главном и вторичном минимумах графически показано на рис. 2. У В-кривой показано представление элементами, полученными и в АОЭ и в ГАИШ (верхняя из двух — по вычислениям в ГАИШ). Эти две теоретические кривые практически неотличимы, за исключением дна минимума. Фазы вторичного минимума увеличены на 0°0100, чтобы середина его пришлась приблизительно на 0°5000.

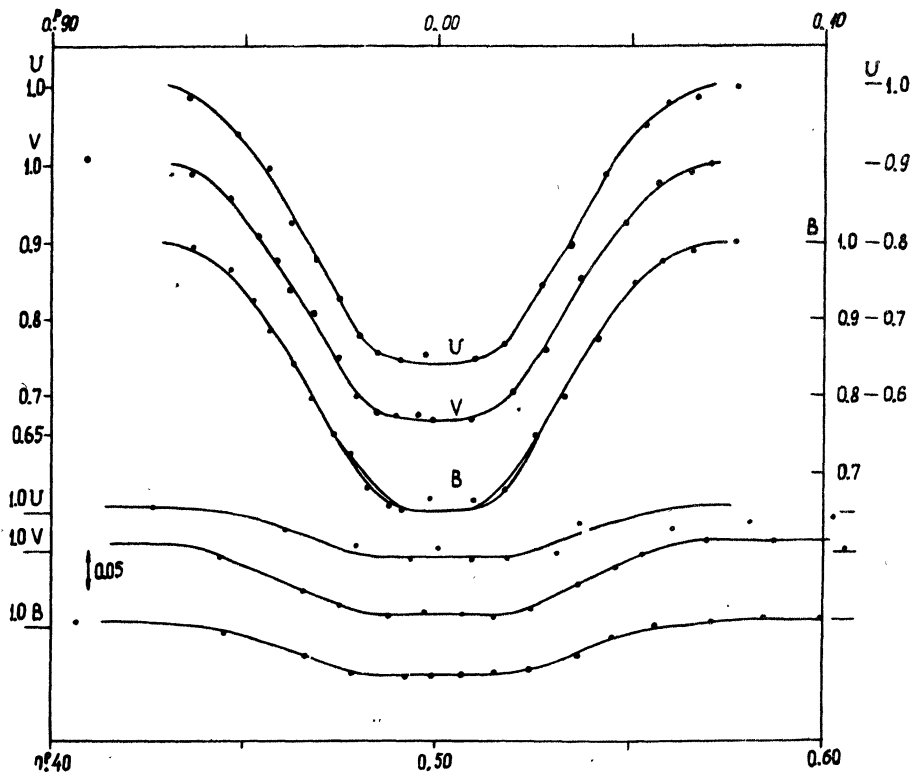


Рис. 2

Переход от "круговых" элементов к "эллиптическим" осуществляется просто — с помощью формул (7) и (8):

$$r'_1 = r_1 (1 - g\eta) \quad (7)$$

$$\text{ctg } i' = \text{ctg } i (1 - 2g\eta) \quad (8)$$

(где η — среднее значение $\cos \theta$ на протяжении минимума), откуда определялись и величины i и r_1 . "Эллиптические" элементы, определенные по трем кривым, приведены в таблице 9. Здесь же даны геометрические элементы как среднее из элементов, определенных в АОЭ с отбрасыванием одной точки на дне главного минимума, и без отбрасывания.

Таблица 9

"Эллиптические" элементы орбиты HS Геркулеса по определениям в АОЭ

	V-кривая	B-кривая	U-кривая	Средние	
r_1	0.261	0.264	0.261	0.263	0.261
r_2	0.150	0.152	0.150	0.151	0.150
k	0.575	0.575	0.575	0.575	0.575
i	86°35	86°03	87°5	86°6	86°9
L_{1f}	0.921	0.953	0.958		
L_{2f}	0.079	0.047	0.042		
L_{2b}	0.093	0.070	0.958		
g	0.025	0.054			
h	-0.0154	-0.0155			
e	0.029	0.056			
ω	121°5	106°3			

Здесь же приведены значения светимостей L_1 и L_2 , исправленные после элиминации эффектов отражения. Эта элиминация осуществлялась по формулам

$$\Delta L_1 = 0.8 G_1 = 0.8 L_2 r_1^2 (E_2/E_1)$$

$$\Delta L_2 = 0.8 G_2 = 0.8 L_1 r_2^2 (E_1/E_2),$$

причем величины G_2 и G_1 брались эмпирические, как они вытекают из уравнения (3) и приведены в табл. 6. С другой стороны, величины E_2/E_1 можно вычислить, исходя из теоретического распределения энергии в спектрах звезд, зная их спектральные классы (Хосокава, 1957). К сожалению, спектральный класс холодной компоненты HS Her может быть лишь приближенно определен из соотношения глубин обоих минимумов. При коэффициенте $A_1 = -0.0091$ у V-кривой получается значение $E_2/E_1 = 1.42$, тогда как теоретически (при $Sp_1 = B5$, $Sp_2 = A4$) оно равно 2.9, так что теоретическое значение A_1 равно -0.0214 вместо наблюдаемого -0.0091 . Такое расхождение является типичным для большинства затменных переменных с компонентами "ранний В — поздний А-класс". Вводить эти теоретические поправки при переходе от L_{2b} к L_{2f} было бы очевидно нецелесообразно. Как будет показано ниже, наблюдения в Китт Пик приводят к значению A_1 , весьма близкому к теоретическому. Очевидно, наблюдения в ГАИШ вне минимумов не дают возможности хорошо определить коэффициент A_1 .

Наблюдения в Китт Пик и их обработка

Степень уверенности при определении фотометрических элементов орбиты затменной системы из фотоэлектрических наблюдений может быть рассмотрена путем переработки другого фотоэлектрического ряда наблюдений, а именно выполненного в обсерватории Китт Пик. Авторы этих наблюдений Холл и Хаббард любезно прислали полный текст своей статьи об HS Геркулеса, направленной в марте 1971 г.

в печать. В ней приведены полностью фотоэлектрические значения блеска NS Геркулеса, измеренные в 1968 г. Холлом. По количеству измерений этот ряд лишь немного уступает нашему, но точность их, по-видимому, выше, что легко понять, зная превосходные астроклиматические условия Китт Пик.

Холл и Хаббард (1971) провели решение своих кривых блеска. Ректификация была осуществлена с помощью коэффициентов, приведенных в табл. 10.

Таблица 10

A_0	A_1	A_2	E_2/E_1
0.980	-0.015	+0.003	1.2
0.974	-0.018	0	1.5
0.968	-0.020	0	1.7

Элементы фотометрической орбиты, определенные ими только по главному минимуму (вторичный минимум послужил лишь для определения величин L), приводятся только в усредненном виде, как это показано в табл.11.

Таблица 11

Фотометрические элементы орбиты NS Геркулеса по наблюдениям в Китт Пик, определенные Холлом и Хаббардом

$k = 0.550$	$L_{1V} = 0.900$	$L'_{1V} = 0.923$
$g'_1 = 0.259$	$L_{1B} = 0.915$	$L'_{1B} = 0.945$
$i = 88^\circ 7$	$L_{1U} = 0.932$	$L'_{1U} = 0.968$

Здесь через L' обозначены светимости компонент, исправленные за эффект отражения.

Элементы табл.11 надлежит сравнивать с элементами табл.7, полученными из наблюдений ГАИШ. При этом следует помнить, что Холл и Хаббард заранее положили $x_1 = x_2 = 0.6$.

Наблюдения Холла в Китт Пик заслуживают более подробного анализа. Такой анализ провел в АОЭ Лавров. Был опять применен прямой метод с последующим уточнением элементов посредством дифференциальных поправок. Результаты сведены в табл.13, а в табл.12 дана сводка определенных им коэффициентов разложения, послуживших для ректификации.

Таблица 12

	A_0	A_1	A_2	A_0	$A_1(A_2=0)$	$\frac{E_2}{E_1}$
V	0.9813	-0.0173	+0.0031	0.9806	-0.0164	2.4
				± 5	± 8	
B	0.9763	-0.0199	+0.0029	0.9759	-0.0192	2.6
				± 8	± 13	

Таблица 12
(продолжение)

	A_0	A_1	A_2	A_0	$A_1(A_2=0)$	$\frac{E_2}{E_1}$
$U'^*)$	0.9720	-0.0171	+0.0070	0.9710 ± 25	-0.0166 ± 34	2.6
$U''^*)$	0.9750	-0.0198	+0.0014	0.9749 ± 7	-0.0198 ± 10	

*) U' охватывает все наблюдаемые точки. В U'' исключены 7 индивидуальных точек в максимуме.

Таблица 13

Фотометрические элементы орбиты HS Геркулеса, выведенные в АОЗ из наблюдений в Китт Пик

	V	B	U'	U''
x_1	0.54 ± 0.08	0.41 ± 0.03	0.42 ± 0.09	0.56 ± 0.08
r_1	0.2564	0.2490	0.2571	0.2648
r_2	0.1424	0.1393	0.1475	0.1434
	± 3	± 5	± 5	± 5
k	0.555	0.561	0.574	0.542
	± 6	± 3	± 8	± 7
i	90° *)	$89^\circ 5$	90° *)	90° *)
L_1	0.896	0.912	0.933	0.926
L_{1f}	0.929	0.948	0.971	0.963

*) При нахождении дифференциальных поправок от исходного значения $\cos^2 i = 0$ было получено $\Delta \cos^2 i < 0$.

Использование вторичного минимума, кроме как для нахождения величин L , показалось невозможным, ввиду того, что во всех трех рядах восходящая ветвь сильно возмущена. Однако представление нисходящей ветви подбором $g = e \sin \omega$ возможно. Оно мало зависит от принятого x , но сильно — от принятого значения фазы середины вторичного минимума.

Можно вполне принять это значение равным 0.4900, как то указывают Холл и Хаббард, тем более что оно же справедливо для кривой ГАИШ.

Тогда величина g оказывается (по минимуму суммы квадратов отклонений) равной 0.016 и 0.045 соответственно по V- и по B-наблюдениям. При фазе 0.4920 они были бы 0.037 и 0.067.

Ввиду затруднений с точным определением величины g , невозможно перейти от "круговых" элементов таблицы 13 к "эллиптическим".

Элементы, определенные по наблюдениям в ГАИШ и в Китт Пик, различаются довольно существенно (сравнивать следует таблицу 13 с элементами таблицы 9, поскольку все они получены одним лицом одним и тем же методом). Конечно, приписывать их каким-либо реаль-

ным изменениям, происшедшим от 1968 г. до 1969 г., нельзя. По-видимому, формальная точность определения элементов преувеличивается вычислителями, так как даже небольшие ошибки наблюдений не всегда устраняются уравнительными вычислениями.

Для характеристики высокой точности наблюдений в Китт Пик в табл. 8 показано представление их элементами табл. 13 (В-наблюдения) в пределах главного минимума. Эти наблюдения в Китт Пик представляются теорией лучше всего.

В противоположность кривым блеска, полученным в ГАИШ, кривые, полученные в Китт Пик, обнаруживают эффект отражения, приближающийся к теоретическому, а именно у V-кривой мы находим значение $E_2: E_1 = 2.4$ вместо теоретического 2.9 и теоретическое значение коэффициента $A_1 = -0.0163$ вместо наблюдаемого -0.0164 .

Эллиптичность орбиты

Все определения слагающих эксцентриситета указывают на малые значения $g > 0$ и $h < 0$, что дает второй квадрант для долготы периастро ω и малое значение e — около 0.05 или меньше. Это одинаково относится к наблюдениям как в ГАИШ, так и в Китт Пик. Тем самым опровергается утверждение Холла и Хаббарда о вращении линии апсид у NS Геркулеса с периодом в 15.5 лет: по графику О—С эпох минимумов в их работе, следует, что в 1968–1969 гг. долгота периастро должна лежать в III квадранте (и g , и h отрицательны). Более того, наблюдения 1971 г. на Южной Станции ГАИШ дали эпоху минимума J.D.hel 2441163.4585, решительно не подтверждающую формулу Холла и Хаббарда и тем самым — само предположение о быстром вращении линии апсид. Данный вопрос подробно рассмотрен Мартыновым (1971), и нет смысла повторять его здесь.

С другой стороны, спектроскопические наблюдения Сахаде и Ческо в 1944 г. дали для орбиты NS Геркулеса значения $e = 0.05$ и $\omega = 37^\circ$. Если это сопоставить с значениями ω в табл. 9, то можно допустить, что в системе NS Геркулеса имеется вращение линии апсид, приблизительно на 80° за 25 лет, или $\dot{\omega}_1 = 0.014$ за один орбитальный период, а полный оборот периастро орбиты делает за 110 лет.

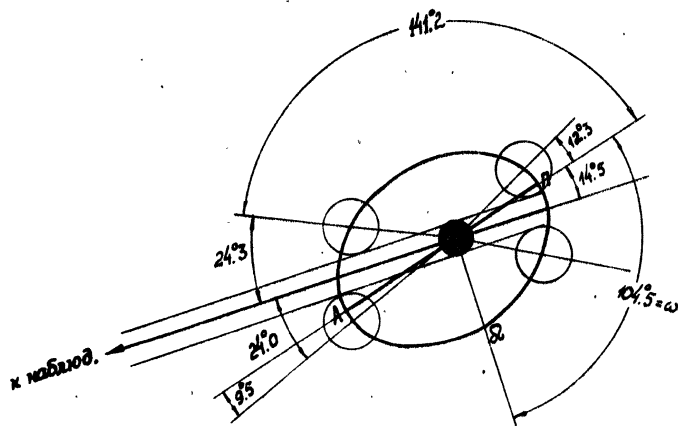


Рис. 3

Эпохи минимумов NS Геркулеса за 1934–1969 гг. не противоречат такому допущению, а минимум 1971 г. позволяет допустить, что эксцентриситет $e \geq 0.05$ в соответствии со значениями e , полученными по наиболее точной В-кривой ГАИШ. Если доверять этому значению, то вращение линии апсид протекает несколько медленнее — полный оборот за 130 лет. Оставляя выяснение этого вопроса для будущих исследований, приведем здесь примерный чертеж расположения орбиты NS Геркулеса относительно земного наблюдателя и компонент на ней в эпохи затмений. Эллиптичность орбиты на рис. 3 преувеличена.

Аномалии кривых блеска

Как видно из рис. 1, кривые блеска NS Геркулеса не свободны от возмущений, характер которых одинаков в наблюдениях ГАИШ и Китт Пик. Особенно они сильны в наблюдениях U и именно при фазах вблизи первого минимума и тотчас после окончания затмения слабой компоненты. Наоборот, во время затмения главной компоненты (спектральный тип B5) возмущения меньше. Особенно интересно падение блеска почти на 10% около фаз 0.59–0.64, которое наблюдалось в одну ночь (21 августа 1969). Анализ этих наблюдений не дает никаких оснований приписывать это падение инструментальным причинам или изменению прозрачности. В В- и V-лучах ничего подобного не наблюдалось. К сожалению, ни в Китт Пик, ни в ГАИШ не было достаточно наблюдений между вторичным и главным минимумами, и проследить изменения блеска при последующих фазах невозможно.

Холл и Хаббард делают попытку объяснить аномалии блеска после фазы 0.5 наличием плотного газового облака, эффективно поглощающего в ультрафиолетовой области спектра. Они помещают облако в полости звезды A4 вблизи первой лагранжевой точки.

Наличие плотных газовых масс в этой полости трудно понять, поскольку она значительно больше размеров звезды, а поглощение ими света главной звезды, которое должно было бы наблюдаться перед главным минимумом, в наших наблюдениях не заметно. С другой стороны, наблюдаемые вне минимумов небольшие возрастания блеска говорят о возможности возникновения эмиссии газовых масс внутри системы. Эти эмиссии следовало бы поискать спектроскопически в ультрафиолетовой области.

В дальнейшем фотометрические наблюдения NS Геркулеса следует равномерно распределять по всем фазам.

Абсолютные размеры

Фотометрические элементы системы NS Геркулеса, полученные нами по наблюдениям в Китт Пик, сходны настолько, что абсолютные размеры и светимости по нашим данным не должны заметно отличаться от приведенных Холлом и Хаббардом. Однако последние могут быть проконтролированы применением других способов вычисления.

Спектральный класс яркой компоненты NS Геркулеса определен по наблюдениям Сахаде и Ческо в 1944 г. как B5 главной последовательности и Роман в 1954 г. как B5 III. Спектр спутника может быть вычислен. Мы применили два способа: 1) метод нахождения спектрофотометрического градиента спутника относительно звезды B5 в интервале от $\lambda = 0.445$ мкм (сист. В) до $\lambda = 0.552$ мкм (сист. V) и 2) метод отношения поверхностных яркостей обеих компонент в V, B, U-лучах. Оба эти метода не зависят от межзвездного поглощения.

Первый метод дал для спутника цветовую температуру $T_c = 9800^\circ\text{K}$, что соответствует спектральному классу A7-8. Второй метод с применением таблиц поверхностной яркости Хосокава (1957) дал для спутника спектральный класс A3.5, A5 и A3 соответственно в V, B и U-лучах. Из всех этих значений вытекает средний класс A5. Холл и Хаббард дают для спутника спектральный класс A4.

При вычислении масс были использованы спектроскопические данные Ческо и Сахаде (1945), а именно: $f(M) = 0.10$, $K_1 = 82.6$ км/сек, откуда следует $a_1 \sin i = 1.856 \times 10^6$ км и $a_1 = 0.0125$ а.е.

Переписывая выражение функции масс в виде

$$f(M) = \frac{M_2 \sin^3 i}{(1 + \alpha)^2},$$

где $\alpha = M_1/M_2$, мы определим M_2 , если будем знать α . Мы нашли приближенное значение α из закона масса-светимость, положив отношение масс равным корню кубическому из болометрических светимостей. Зная спектры компонент, мы принимаем их болометрические поправки для B5 и A5 соответственно -1.6 и -0.3 и из отношения $L_1 : L_2 = 10.35$ в лучах V находим отношение болометрических светимостей $L_1 : L_2 = 34.36$, откуда $M_1 : M_2 = 3.25$. Но показатель степени q в зависимости $L \propto M^q$ слегка больше трех. Значение $M_1 : M_2 = 3$ оказывается наилучшим для того, чтобы был удовлетворен третий закон Кеплера.

В таблице 14 сопоставлены абсолютные характеристики компонент NS Геркулеса, полученные здесь и Холлом, Хаббардом.

Таблица 15

		Мартынов, Лавров	Холл, Хаббард
Спектр	I	B5	B5
	II	A5	A4
Массы	I	4.8	4.7
	II	1.6	1.6
Радиусы	I	2.72	2.8
	II	1.56	1.6

С этими значениями масс и размеров можно приближенно подсчитать класс политропии компонент, пользуясь формулой из статьи Мартынова (1948):

$$P/U = k_{21} r_1^5 \{ \alpha^{-1} [15 f_2(e) + g_2(e)] + g_2(e) \} + k_{22} r_2^5 \{ \alpha [Idem] + g_2(e) \}$$

в предположении, что обе компоненты построены по одной модели. Принимая приведенное выше значение периода оборота линии апсид $U = 120$ лет, $P: U = 3.57 \times 10^{-5}$ и эксцентриситет $e = 0.05$, так что $g_2(e) = 1.0050$, $f_2(e) = 1.0169$, найдем коэффициент $k_{21} = k_{22} = 0.0039$, что соответствует классу политропии $n \approx 3.5$, т.е. сходному с тем, что дают другие звезды с надежным значением вращения линии апсид. Разумеется, значение $P: U$ должно быть уточнено из новых наблюдений.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность Холлу и Хаббарду за присылку их статьи до опубликования и А.М.Черепашуку, Х.Ф.Халиуллину, В.Ерижкову и Л.С.Угольковой за помощь в наблюдениях и обработке.

Литература:

- Зверев М.С. и др., 1947, Переменные звезды, т. III, гл. XI, М-Л.
 Клингесмит, Собесский, 1970 — Klinglesmith D.A., Sobieski S., AJ 75, 175.
 Лавров М.И., 1970, АЦ № 594. 7.
 Лавров М.И., 1971, АЖ 48, вып 5.
 Мартынов Д.Я., 1940, Энг бюлл № 18.
 Мартынов Д.Я., 1948, Энг изв № 25, 120—130.
 Мартынов Д.Я., 1951, Энг изв № 26, 47.
 Мартынов Д.Я., 1971, АЦ № 651.
 Рессел, Меррилл, 1952 — Russell H.N., Merrill J.E., Princ Contr № 26.
 Роман, 1955 — Roman N., ApJ 123, 248.
 Свечников М.А., 1969, Ученые записки Уральского университета № 88, серия астрономическая, вып. 5.
 Холл и Хаббард, 1971, — Hall D.S.a. Hubbard G.S., A UBV Photometric Study of HS Herculis, Dyer Observ. Preprint submitted to the PASP.
 Хосокава, 1957, — Hosokawa Y., Sci Rep Tohoku Univ Ser.I, Vol.XLI, № 4 = Sendai Astr Raportoj № 56.
 Ческо, Сахаде, 1945, — Cesco C.U., Sahade J., ApJ 101, 114.

Гос. Астрономический Ин-т
 им. П.К.Штернберга
 Астрономическая Обсерватория
 им. Энгельгардта

Поступила в редакцию
 27 октября 1971 г.