

СТРУКТУРА ПОЛОСЫ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
КЛАССИЧЕСКИХ ЦЕФЕИД ГАЛАКТИКИ.

Н. Н. Якимова

Для 160 классических цефеид Галактики проведен анализ следующих характеристик: амплитуд блеска A_V и цвета A_{B-V} [6], нормальных цветов $(B-V)_0$ в максимуме, минимуме блеска и в "средней" фазе [4], средних радиусов \bar{R} и амплитуд изменения радиусов A_R [1, 7]. Вопреки результатам современных теоретических расчетов [20], оказалось, что наиболее интенсивные колебания радиуса, температуры и светимости свойственны в среднем звездам на низкотемпературной границе полосы неустойчивости и только им, если рассматривать переменные с определенными температурами в максимуме блеска; к высокотемпературной границе амплитуды спадают. Обнаружено, что на диаграмме $H-R$ наклоны линий постоянных периодов, "цикла" и постоянных радиусов не совпадают. При фиксированном значении периода сказывается естественная дисперсия размеров цефеид: наибольшие радиусы — у переменных с самыми низкими средними температурами. В целом для классических цефеид определенно имеется параллельность наблюдаемой и теоретической полосы неустойчивости на диаграмме $H-R$.

Structure of the Instability Strip of the Classical
Galactic Cepheids

N.N. Yakimova

For 160 classical galactic cepheids the following characteristics were analyzed: the light A_V and colour A_{B-V} amplitudes [6], the normal colours $(B-V)_0$ in light maximum, minimum and the "mean" phase [4], the mean radii \bar{R} and the amplitudes of the variations of radii A_R [1, 7]. Contrary to the results of the modern theoretical calculations [20] it was found that the most intense variations of the radii, temperature and luminosity are proper, on the average, to stars on the low-temperature boundary of the instability strip and only for it if variables of a definite temperature in light maximum are examined; the amplitudes decrease towards the high-temperature boundary. It was discovered that on the $H-R$ diagram the inclinations of the lines of constant pe-

riods, of constant radii and of the "cycle" do not coincide. At the fixed value of the period, the natural dispersion of the cepheid dimensions is manifested: the least are the radii of the variables with particularly low mean temperatures. On the whole, for the classical cepheids the observed and the theoretical strips of instability are definitely parallel on the H-R diagram.

Проблема звездных пульсаций может быть успешно разрешена только путем тщательного сопоставления данных наблюдений и результатов теоретических расчетов. К сегодняшнему дню наши представления о свойствах наблюдаемой полосы неустойчивости классических цефеид Галактики основывались лишь на крайне малой выборке звезд из 39 цефеид, изученной в 60 гг. Крафтом. С другой стороны, за последние годы теоретические работы Киппенхана, Хофмейстер и др. привели к выводам и предсказаниям большой важности, требующим проверки. В сравнении с Крафтом мы располагаем возможностью предоставить на суд теории значительно более уверенные и многочисленные факты, касающиеся структуры полосы неустойчивости.

В настоящей работе рассматривается с одной стороны взаимосвязь тех основных физических характеристик цефеид Галактики, которые описывают в целом эти переменные как статические звездные модели, именно: взаимосвязь среднего радиуса \bar{R} и средней эффективной температуры \bar{T} (или среднего нормального цвета $\langle B-V \rangle_p$). Наблюдения обеспечат нас достаточно обширными данными в отношении размеров и температур цефеид, что позволит судить об их индивидуальных свойствах. К сожалению, пока мы лишены возможности непосредственно оценивать индивидуальную светимость любой цефеиды. Кроме того, болометрическая светимость L зависит от вида переноса тепла в оболочке звезды, а для цефеид, во всяком случае в максимуме¹⁾ блеска, закон излучения, по-видимому, не полностью соответствует излучению абсолютно черного тела, согласно [1, 2]. Все это заставляет нас рассматривать в первую очередь только радиусы и температуры.

Работа устанавливает также связь между интенсивностью пульсаций и положением цефеиды в полосе неустойчивости.

Количественно степень пульсации можно описать амплитудами тех или иных параметров:

¹⁾ В дальнейшем мы будем использовать для обозначения максимума и минимума символы \max и \min . Имеются в виду экстремальные значения, снятые с кривых блеска V или цвета $B-V$. Строго говоря, \max (\min) блеска и цвета по времени не совпадают. Как правило, символы \max и \min у нас относятся к кривой $B-V$.

а). Амплитуда изменения блеска, например, в визуальных лучах A_V , или болометрических A_{bol} :

$$A_V = V_{min} - V_{max}, \quad (1)$$

$$A_{bol} = 2.5 \lg L_{max}/L_{min}, \quad (2)$$

$$A_{bol} = A_V + (\Delta m_{bol, min} - \Delta m_{bol, max}). \quad (3)$$

б). Амплитуда изменения эффективной температуры A_T , или нормального цвета $A_{(B-V)_0}$:

$$A_T = 2.5 \lg T_{max}/T_{min} \text{ — по аналогии с (2),} \quad (4)$$

$$A_{(B-V)_0} = (B-V)_0^{min} - (B-V)_0^{max.2)} \quad (5)$$

в). Амплитуда изменения радиуса A_R :

$$A_R = 2.5 \lg R/r \quad (6)$$

— по аналогии с (2); R и r — экстремальные значения радиуса (в млн. км).

Положение конкретной переменной в полосе неустойчивости можно фиксировать поперечным уклоном ее характеристик от соответствующей средней линии полосы — удобно вдоль линии постоянных периодов:

$$\delta x_i = x_i(P) - \bar{x}(P), \quad (7)$$

где x — некоторая физическая характеристика звезды,

$\bar{x}(P)$ — среднее значение характеристики при данном периоде P ,

$x_i(P)$ — значение характеристики для конкретной переменной с периодом P .

Характеристиками цефеид, как правило, служили: средней радиус \bar{R} , нормальный цвет в $\max - (B-V)_0^{max}$, средний нормальный цвет $\langle B-V \rangle_0$, цвет в $\min - (B-V)_0^{min}$, амплитуды A_R , $A_{(B-V)_0}$, A_V , A_{bol} .

При отыскании этих характеристик использовались: а) избытки цвета E_{B-V} для 169 классических цефеид, полученные нами в [3, 4, 5]³⁾; б) кривые V и $B-V$, согласно обширным фотоэлектрическим

²⁾ Значение $A_{(B-V)_0}$ несколько больше величины A_{B-V} , полученной по наблюдаемому цвету: $A_{(B-V)_0} = A_{B-V} + (E_{B-V}^{max} - E_{B-V}^{min})$, где $E_{B-V}^{max} > E_{B-V}^{min}$ в силу известной зависимости избытка цвета от самого цвета. Разница в среднем составляет величину $\sim 0^m.01$ для цефеид с $\lg P < 1$ и увеличивается с ростом периода и амплитуды цвета, достигая значений $\sim 0^m.05$.

³⁾ Для 80% изученных нами цефеид средняя точность оценки избытка цвета E_{B-V} составляет: $\bar{\sigma}_E = 0^m.04$; 20% имеют $\sigma_E > 0^m.10$.

Средние сглаженные значения физических характеристик цефеид в зависимости от величины $Ig P$

Таблица 1

$Ig P$	$\overline{A_V}$	n	$\overline{A_{bol}}$	$\overline{\Delta_{B-V}}_0$	$\overline{(B-V)}_{max}$	$\overline{\langle B-V \rangle}_0$	$\overline{(B-V)}_{min}$	n	$\overline{R_{cp}}$ МЛН. КМ.	$\overline{A_R}$	n
0.4	0 ^m .38:	2	0 ^m .30:	0 ^m .14:	0 ^m .37:	0 ^m .44:	0 ^m .55:	1	(22)	0 ^m .07	3
0.5	0.51	7	0.48	0.24	0.39	0.55	0.65	4	20.5	0.69	4
0.6	0.645	32	0.60	0.32	0.405	0.61	0.735	18	(25)	0.09	8
0.7	0.71	46	0.635	0.365	0.42	0.645	0.795	32	29.5	0.105	9
0.8	0.70	36	0.635	0.385	0.44	0.655	0.83	30	(28)	0.115	12
0.9	0.68	24	0.62	0.41	0.455	0.675	0.86	17	32	0.125	9
0.925	0.65:	17	0.57:	0.41:	0.47	0.68	0.86	14	47.5	0.12:	8
0.95	0.62:	20	0.53:	0.38:	0.49	0.69	0.855	12	50	0.115:	9
0.975	0.60:	19	0.52:	0.35:	0.50	0.70	0.87	14	52.5	0.11:	9
1.0	0.65	23	0.54	0.375	0.50	0.71	0.875	17	55	0.105	10
1.1	0.90	15	0.755	0.515	0.455	0.755	0.97	9	58	0.14	1
1.2	1.015	17	0.81	0.575	0.45	0.805	1.035	13	69	0.175	4
1.3	1.045	9	0.82	0.605	0.47	0.86	1.09	7	80	0.215	3
1.4	1.05	7	0.815	0.63	0.495	0.91	1.14	5	92	0.25	1
1.5	1.05	6	0.805	0.64	0.52	0.96	1.19	1	104	0.285	1
1.6	1.05:	4	0.76:	0.66:	0.55:	1.01:	1.24:	3	116	0.325	2

Примечания к табл. 1:

1. n — число звезд, использованных для усреднения в интервале $\Delta I g P = \pm 0.05$.
2. В скобках указана величина $\overline{R_{cp}}$, согласно 2-му варианту.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
N	Назв. звезды	$\ell_g P$	A_V 0.04	ΔA_V 0.04	A_{bol} 0.04	ΔA_{bol} 0.04	$A_{(\beta-\gamma)}$ 0.04	$\Delta A_{(\beta-\gamma)}$ 0.04	$(\beta-V)_{\text{max}}$ 0.04	$\delta(\beta-V)_{\text{max}}$ 0.04	$(\beta-V)_{\text{min}}$ 0.04	$\delta(\beta-V)_{\text{min}}$ 0.04	$\bar{\Delta R}$ 1 макс. км	A_R 0.04	ΔA_R 0.04	ΔA_R 0.04	
1	SU Cas	0.290	37		36	16		36				52		0:	4	-1:	
2	DT Cyg	398	31		30	14		37				51		-1:	3	-3:	
3	AY Cas	458	69		63	26		34	-4:	+4:		70	+9:				
4	RT Mus	489	74	+24										-9.5	11	+3	
5	EV Sct	490	29		27	14		46:	+11:	-1:		60	-4:				
6	AZ Cen	506	34	-18										-9	6	-2	
7	BY Cas	508	38	-18	36	-14	19	-5.5	33	-6	-13.5	52	-13	(-5)	6.5	-1.5	
8	R TrA	530	54	-2	49	4	29	+2.5	44	+4.5	+5.5	73	+5	+8	5	-3.5	
9	DW Per	562	70	+10	64	+8	34	+4	38	-2	-1	72	+2	(+12)			
10	SS Sct	565	53	-7	47	-9	26	-4	50	+10	+7	75	+6	+16			
11	UX Car	566	82	+21	73	+15	40	+9.5	40	0	+5.5	80	+9	(+19.5)			
12	RT Aur	571	75	+14	68	+10	38	+7.5	36	-4	+0.5	74	+3	-10	13	+4	
13	DF Cas	583	60	-2	53	-5	32	+1	45	+5	+6.5	77	+5	(0)	9	0	
14	AG Cru	584	82	+18											-1(0)	10	+1
15	ST Cyg	585	72	+10	68	+10	32	+1	30	-10	-10	62	-10				
16	V Aur	587	83	+20	75	+16	39	+7.5	35	-5.5	+1.5	74	+1.5				
17	CS Ori	590	85	+21	79	+20	32	+0.5	40	-0.5:	-3.5:	72	-0.5:				
18	<u>a UMi</u>	598	09	-54	09	-51	05	-27.5	53	+12.5	-5	58	-15				
19	BF Oph	609	66	0	59	-2	36	+3	38	-3	-1	74	0		+8.5	9	0
20	SY Cas	619	81	+15	74	+13	39	+6	33	-8	-4	72	-2				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
21	X Sct	523	96	+39	34	+23	42	+8	45	+4	+19	37	+12			
22	AH Vel	525	39	-29											5.5	-4
23	VZ Cas	529	79	+11	55	+3	44	+9.5	45	+4	+9	89	+13.5			
24	VW Pup	532	57	0	51	-1	31	-3.5	41	0	-2	72	-3.5			
25	Y Lac	536	66	-3	60	-2	34	-1	39	-2	-1.5	73	-3.5			
26	CG Cas	540	84	+15	79	+15	43	+8	28	-13	-6.5	71	-3.5			
27	V Vel	541	74:	+5:	57:	+5:	36:	+1:	40:	-0.5:	0:	76:	-0.5:		13	+3.5
28	GI Car	546	32	-37												
29	T Vul	547	70	0	65	+2	35	+0.5	37	-4.5	-4.5	73	-4		7.5	-2
30	FF Aql	550	35	-34	33	-30	17	-12.5	44	+2.5	-8.5	61	-16		5.5	-3
31	DF Lac	551	63	-6	58	-5	29	-6.5	43	+1.5	-1.5	72	-5		5	-5
32	XY Cas	553	57	-12	47	-16	32	-3.5	51	+10	+7	83	+6			
33	V482 Sco	555	54	-6	58	-5	32	-4	44	+2.5	-1	76	-2		+1.5	9
34	T Vel	555	62	-8	54	-9	35	-1	42:	0:	-1.5:	77:	-1:		7	8.5
35	WW Mon	558	95	+25	27	+24	45	+9	31:	-10.5:	-1.5:	76:	-2:			
36	TV CMa	569	76:	+6:	66:	+3:	36:	0:	47:	+5.5:	+5.5:	83:	+5:			
37	RY CMa	570	76	+6	56	+3	39	+3	42	0	+2.5	81	+3			
38	S Cru	571	77	+6	58	+5	38	+2	44	+2.5	+4.5	82	+4		1?	+2
40	SX Car	587	75	+5	60	-4	45	+8	45	+3	+8	90	+10.5			
40	VZ Cyg	587	67	-4	59	-5	37	9	40	-2	-2	77	-2.5			
41	CF Cas	568	57	-14	47	-17	30	-7	52	+10	+6	82	+3		+1	8
42	CR Ori	591	60:	-11:	55	-9:	25:	-12:	45:	+3:	-1:	70:	-9.5:			
43	AS Per	597	92	+21	77	+13	41	+4	49:	+7:	+9.5:	99:	+10.5:			
44	V Lac	597	98	+27	87	+23	47	+10	36	-6	+1.5	83	+3.5			
45	DW Cas	599	59	-12	51	-13	29	-3	51	+9	+4.5	80	0			
46	WZ Pup	701	90:	+19:	73:	+24:	40:	+3:	45:	+3:	+2.5:	85:	+5:			

I	2	'3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
47	AP Sgr	704	79	+ 8	58	+ 4	44	+ 7	38	- 4	+1.5	82	- 2			
48	AP Pup	706	60:	-11:	56:	- 8:	36:	-1.5:	27:	-15:	-15.5:	53:	-17:	-1.5	11	+0.5
49	V350 Sgr	712	66	- 5	58	- 6	42	+4.5	39	-3.5	- 1.5	81	+0.5			
50	WY Pup	720	84:	+12:	69	+ 5:	67:	:	18:	-25:	-15:	85:	+ 5:			
51	V386 Cyg	721	69:	- 1	62	- 2	36	-1.5	38	-4.5	- 6	74	-6.5	+12	8	-2.5
52	UY Per	730	88	+17	77	+13	47	+9	38	-4.5	0	85	+4.5			
53	δ Cep	730	84	+13	74	+10	45	+7	35	-7.5	-2.5	80	0	- 5	13	+2.5
54	CV Mon	731	71	0	66	+ 2	33	- 5	38	-4.5	-7.5	71	-10			
55	SW Cas	736	66	- 5	57	- 7	34	- 4	47	+ 4	+3.5	81:	0			
56	X Lac	736	38	-33	34	-30	23	-15	47	+ 4	-5.5	70	-11			
57	XX Mon	737	70	- 1	59	- 5	43	+ 5	39:	- 4:	-2.5:	82:	+ 1:			
58	V Cen	740	80	+ 9	71	+ 7	41	+ 3	41	- 2	+0.5	82	+ 1	+ 6	9.5	- 1
59	WV Pup	742	96	+24	88	+24	46	+ 8	30:	-13:	-7.5:	76	- 5:			
60	RZ Gem	743	80:	+ 9:	73:	+ 9	36	- 2	39	- 4	-4.5	75	- 6			
61	VY Per	743	80:	+11:	72:	+ 8:	33:	- 5:	39:	- 4:	-6.5:	72	- 9:			
62	CZ Cas	753	82	+11	70	+ 6	39	+ 1	46	+ 3	+3.5	85	+ 4			
63	Y Sgr	761	75	+ 3	63	- 1	39	+0.5	46	+ 3	+ 2	85	+ 3.5	+60?	5	- 6
64	AB Cam	763	97	+26	90	+26	51	+12.5	19:	-24:	-16:	70:	-11.5:			
65	FM Cas	764	57	-14	44	-20	31	-7.5	61	+18	+12	92	+10.5			
66	R Cru	765	84	+13	71	+ 7	43	+ 4	45	+1.5	+ 4	88	+ 6	-4.5	12.5	+1.5
67	MW Cyg	775	72:	0:	58:	- 6:	37:	- 2:	55:	+11.5:	+10.5:	92:	+ 9.5:	+4.5	11	0
68	VW Cas	778	68	- 3	56	- 8	39	0	48	+3.5	+3.5	87	+ 4.5			
69	RV Sco	783	82	+10	75	+11	43	+ 4	37	-6.5	+3.5	80	- 2.5	+8.5	9.5	-1.5
70	FM Aql	787	74	+ 3	68	+ 4	40	+ 1	34	-9.5	-9.5	74	- 8.5			
71	VV Cas	793	89	+17	77	+13	43	+ 4	44	0	+3.5	87	+ 4.5			
72	X Cru	794	56	-15	47	-17	30	- 9	53:	+9.5:	+2.5:	83:	0:	- 8	11	-0.5
73	CR Cep	795	39	-32	29	-35	22	-17	63	+19.5	+8.5	85	+ 2			

1	74	BP	Cas	797	77	+ 5	65	+ 1	42	+ 3	42:	- 1.5	11	12	13	14	15	16	17
	75	RS	Cas	799	76	+ 4	62	- 2	42	+ 3	47	+ 3.5	+ 3.5	-0.5	84:	+ 1			
	76	X	Vul	801	79	+ 6	70	+ 6	42	+ 3	39	- 5	- 5	- 3	81	- 2			
	77	S	TrA	801	81	+ 9	66	+ 2	42	+ 3	48	+ 4.5	+ 4.5	+ 4.5	90	+ 7	+ 2.5	13	+ 2
	78	RR	Lac	808	80	+ 9	68	+ 4	42	+ 3	45	+ 1	+ 1	0	87	+ 4			
	79	XX	Sgr	808	75	+ 4	62	- 2	42	+ 2.5	46:	+ 2	+ 2	+ 3	88	+ 5			
	80	AV	Per	810	80	+ 9	74	+ 10	32	- 6.5	44	- 3:	- 3:	0:	76	- 7:			
	81	AY	Sgr	817	85	+ 13	76	+ 13	46	+ 6.5	39	- 5	- 5	- 2	85	+ 1.5			
	82	BB	Sgr	822	58	- 13	48	- 15	34	- 5.5	49	+ 5	+ 5	+ 2	83	0			
	83	AT	Pup	824	92	+ 21	77	+ 14	48	+ 8.5	44:	0:	0:	+ 5:	92:	+ 8.5:	+ 6.5	10	- 2
	84	V	Car	826	80	+ 9	65	- 2	38	- 2	52	+ 8	+ 8	+ 7	90	+ 6.5	- 15.5	18	+ 6.5
	85	T	Cru	828	47	- 23	39	- 2.4	30	- 10	50	+ 6	+ 6	- 1	80	- 4	- 3	11.5	0
	86	U	Sgr	829	76	+ 5	63	0	40	0	46	0	0	+ 3	86	0	- 9	14	+ 2
	87	V496	Aql	833	40	- 29	36	- 27	20	- 20	52	+ 7.5	+ 7.5	- 5	72	- 11.5	- 15	7	- 5
	88	AP	Cas	836	60	- 10	55	- 8	30	- 10	40	- 5	- 5	- 10	70	- 14	+ 14	6.5	- 5.5
	89	BG	Vel	840	46	- 25													
	90	TW	CMa	845	61	- 9	56	- 7	35	- 5	32	- 12.5	- 12.5	- 15	67	- 17			
	91	X	Sgr	846	63	- 7	55	- 8	35	- 5	44	0	0	- 4.5	79	- 5	- 2	10	- 2
	92	U	Aql	847	85	+ 15	73	+ 10	41	+ 1	46	+ 2	+ 2	+ 2.5	87	+ 3			
	93	7	Aql	856	82	+ 11	69	+ 6	45	+ 4.5	43	- 1.5	- 1.5	+ 0.5	88	+ 3.5	+ 1.5	12	0
	94	AK	Cep	859	67	- 3	55	- 8	38	- 2.5	49:	+ 4:	+ 4:	+ 4:	87:	+ 2.5			
	95	V336	Aql	863	79	+ 9	67	+ 4	42	+ 1.5	44:	0:	0:	+ 1.5:	86:	+ 1.5:			
	96	TZ	Mon	871	70:	0:	60:	- 3:	38:	- 2.5:	45:	0:	0:	- 1.5:	83	- 2:			
	97	R	Mus	876	86	+ 16	70	+ 8	47	+ 6.5	46	+ 0.5	+ 0.5	+ 4.5	93	+ 7.5	- 10	13.5	+ 1.5
	98	RS	Ori	879	82	+ 13	71	+ 9	43	+ 2.5	39	- 6	- 6	- 3.5	82	- 3.5			
	99	W	Sgr	880	80	+ 10	68	+ 6	47	+ 6.5	37	- 8	- 8	- 3.5	84	- 1	+ 1	12	0
	100	ER	Car	888	52:	- 17:											- 9.5	12	0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
101	CD	892	78	+ 9	64	+ 2	42	+ 1	47	+ 2	+ 3.5	89	+ 3.5			
102	GH	893	76	+ 7	67	+ 5	38	- 3	40	- 5	- 3.5	78	- 7.5			
103	VY	895	82	+ 14	70	+ 8	47	+ 6	37	- 8.5	- 3.5	84	- 1.5	+ 5	10	- 2
104	RX	898	78	+ 10	64	+ 2	44	+ 3	45	0	+ 1.5	89	+ 3			
105	W	899	81	+ 13	68	+ 6	47	+ 6	38	- 7	- 0.5	85	- 0.5			
106	U	902	75	+ 7	60	- 2	42	+ 1	49	+ 3.5	+ 6.5	91	+ 5.5	+ 12.7	7	
107	DL	903	58	- 10	45	- 17	35	- 6	52	+ 8.5	+ 3.5	87	+ 3.5			
108	AC	904	70:	+ 2	60:	0:	40:	- 1:	41:	- 4.5:	- 6.5:	81:	- 5:			
109	S	923	76	+ 10	62	+ 5:	46	+ 5	43	- 3	+ 1	89	+ 3	+ 7.5	9.5	
110	TX	940	71:	+ 9:	59:	+ 4:	37:	- 2:	49	+ 0.5	- 1.5	86	0			
111	WX	951	57:	- 4:	46:	- 7:	41:	+ 3.5:	42	- 7	- 5	83	- 2.5	- 14	15.5	
112	V500	969	74	+ 13:										+ 9	11	
113	V339	976	70	+ 9:	56	+ 5:	31	- 4:	56	- 6	+ 2	87	0	- 3.5	12	
114	FN	977	67	+ 6:	60	+ 8:	38	+ 3:	54	+ 4	+ 3	92	+ 5.5			
115	YZ	980	74	+ 13:												
116	SX	980	68:	+ 7:												
117	S	985	52:	- 10:	48:	- 4:	24	- 11	47	- 3	- 12	71	- 15	+ 1.5	10	
118	S	989	67	+ 6:	52	0	31	- 4	67	+ 17	+ 10.5	98	+ 11	- 11.5	11	
119	DD	992	61	0	46	- 7	39	+ 4	51	+ 0.5	- 1.5	90	+ 3	- 3.5	11	
120	β	993	66	0	56	+ 2	35	0	47	- 3	- 6.5	82	- 5	- 1	12	
121	BZ	1006	52	- 17	39	- 17	30	- 9.5	61	+ 11.5	+ 4.5	91	+ 2	+ 38	6	- 4
122	ζ	1006	49	- 20	36	- 20	28	- 11.5	62	+ 12.5	+ 4.5	90	+ 1	- 9.5	10.5	0
123	SY	1006	61	- 9	55	- 1	31	- 8.5	41	- 8.5	- 14	72	- 17			
124	AN	1013	64	- 5	57	+ 1	36	- 3.5	40	- 9.5	- 15	76	- 13			
125	Y	1015	83	+ 10	63	+ 5	52	+ 10.5	53	+ 3.5	+ 10	105	+ 15			
126	Z	1037	90	+ 13	68	+ 6	60	+ 15.5	47	- 1.5	+ 7.5	107	+ 15			

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
127	VX Per	1037	76	0	66	+ 4	39	- 5.5	44	+ 4.5	- 7.5	83	- 9			
128	XX Cen	1040	90	+13	72	+10	50	+ 5.5	49	0	+ 6.5	99	+ 7	-16.5	15.5	+ 4
129	TY Sct	1043	87	+12	69	+ 7	50	+ 5.5	48	0	+ 5.5	98	+ 6			
130	SV Per	1046	80	+ 1	67	+ 2	42	- 3.5	46:	- 2	0	88	- 4.5			
131	AA Gem	1053	65	- 8	52	-13	45	+ 0.5	42	- 6	- 7	87:	- 5.5			
132	RX Aur	1064	71	-10	61	- 6	35	-12	47	0	- 6.5	82	-12			
133	RY Cas	1084	98	+12	80	+ 8	54	+ 5	42	- 4.5	- 0.5	96	0			
134	SS CMa	1091	110:	+17:	94:	+20:	49:	- 1.5:	41	- 5	- 6	90	- 6			
135	U Nor	1101	100	+ 9	80	+ 4	50	- 1.5	55	+ 9.5	+12.5	105	+ 8			
136	Z Sct	1111	105	+13	84	+ 7	54	+ 1.5	53	+ 8	+ 9.5	107	+ 9			
137	AD Pup	1133	96:	0:	76:	- 2:	68:	+14:	30:	-15:	- 4.5:	98:	- 1:			
138	TT Aql	1138	115	+16	93	+14	65	+10.5	44	- 0.5	+ 7.5	109	+ 9			+ 3
139	SV Vel	1149	125	+25	102	+23	65	+10	45	0	+10	110	+ 9	- 8.5	19	+ 3
130	CY Cas	1158	110	+10	91	+11	63	+ 7	36	- 9	- 5.5	99	- 2.5			
141	TX Cyg	1168	123	+22	100	+20	74	+17.5	30	-15	- 5	104:	+ 2	+27	15.5	-1
142	UZ Sct	1168	89	-11	68	-12	52	- 4.5	63	+18	+16	115	+13			
143	RW Cas	1170	117	+16	94	+14	71	+14.5	43	- 2	+ 8	114	+12			
144	SZ Cyg	1179	88	-13	66	-15	57	0	63	+18	+ 16.5	120	+17.5	+14	6.5	-10
145	CH Cas	1179	111	+10	98	+17	60	+ 3	23	-22	-19.5	83	-19.5			
146	SV Mon	1182	110:	+10:	88:	+ 7:	68	+11	43	- 2	+ 5.5	111	+ 8.5			
147	SZ Mon	1214	92:	-10:	76:	- 5:	29	-29.5:	65	+19.5:	?	94	-10:			
148	X Cyg	1215	102	0	78	- 3	66	+ 8.5	51	+ 0.5	+11	117	+13			
149	RW Cam	1215	81	-22	72	-10	37	-22	42	- 4	-17.5	79	-24.5			
150	CD Cyg	1232	115	+12	92	+10	70	+11	45	- 1	+ 8	115:	+10	-13.5	22.5	+3.5
151	Y Oph	1233	51	-52	43	-39	27	-32	52	+ 6	-14	79	-25	-12	8	-11
152	SZ Aql	1234	123	+20	98	+16	80	+21	47	+ 0.5	+17	127	+22			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
153	CP Cep	1251	79:	-5:	76:	-24:	12:	- 8:	50:	+13.5:	+ 5:	112:	+ 6:			
154	YZ Aur	1269	74	-30	53	-24	52	- 8	49	- 6.5	-11.5	92	-15			
155	VY Car	1277	110	+ 5	87	+ 5	97	+ 6.5	43:	- 4:	- 1:	119:	+ 2:	-23.5	32	+11.5
156	RU Set	1294	111	+ 6	90	+ 8	64	+ 3	38	- 9	- 5.5	102	- 6			
157	VX Cyg	1304	100	- 5	78	- 4	62	+ 1	44:	- 3:	- 5:	106:	- 3:			
158	RY Sco	1308	87	-18	71	-11	46	-15.5	48	+ 9.5	-12.5	94	-15	+ 9	13.5	- 8
159	RZ Vel	1319	120	+14										-22	25.5	+ 4
160	WZ Sgr	1339	110	+ 5	37	+ 5	66	+ 4	56	+ 3	+ 9	122	+11			
161	VZ Pup	1395	125	+20	105	+23	67	+ 4.5	30:	-13.5:	-12:	97:	-15:			
162	X Pup	1414	121	+16	99	+17	72	+ 8.5	31:	-19:	-19.5:	103:	-11.5:			
163	T Mon	1432	109	- 5	77	+ 4	69	- 4	57	+ 7	+ 4.5	117:	+ 1.5	-26.5	36.5	+10.5
164	RY Vel	1449	85:	-20	65:	-15	53	-11.5	48	- 3	-11.5	101	-15.5			
165	AQ Pup	1475	102	- 3	77	- 4	79	+14	42	-19.5	- 8:	111	- 7	+19	13.5	-14
166	ζ Car	1551	76	-30	52	-28:	53	-12	78	+24:	+11.5:		+ 9.5:	- 8.5	28.5	- 2
167	U Car	1588	116	+11:	92	+12:	69	+ 4:	50	- 5:	- 4.5:	119	- 5:	-24.5	36.5	+ 4.5
168	RS Pup	1617	110	+ 5:	86	+ 6:	64	- 2:	65	+ 9:	+ 4.5:	129	+ 4:	+15	31	- 3.5
169	SV Vul	1654	102	- 3:	79	- 1:	68	+ 2:	55	- 2:	- 4.5:	123	- 4:			

Примечания к табл. 2:

- 1) У "s"-цефеид подчеркнуты названия.
- 2) Двоеточие после значений $\delta(B-V)$ означает, что значение избытка $B-V$ неустойчивое ($\sigma_E > 0.10$), или нельзя провести надежно средние зависимости.
- 3) Двоеточие после значений Δu , $\delta' u$, $\Delta' u$, $\delta' u$, $\Delta' u$ означает, что амплитуды блеска неустойчивые.
- 4) Величина $\delta \bar{R}$ в скобках соответствует 2-му варианту средней зависимости \bar{R}_{cp} ($\lg P$). На рисунках использованы $\delta \bar{R}$, соответствующие 1-му варианту.

данным в [6]; в) определенные Курочкиным величины средних радиусов \bar{R} и их изменения ΔR для 68 классических цефеид [1, 7]. Переход от нормальных цветов $(B-V)_0$ к эффективным температурам осуществлялся согласно данным Джонсона для сверхгигантов [8]. Боллометрические поправки Δm_{bol} заимствовались отсюда же в соответствии с температурой цефеиды в max и в min.

Средние сглаженные значения величин \bar{A}_V , \bar{A}_{bol} , $\bar{A}_{(B-V)_0}$, $(B-V)_0^{max}$, $\langle B-V \rangle_0$, $(B-V)_0^{min}$, \bar{R}_{cp} , \bar{A}_R в зависимости от $\lg P$ представлены в табл. 1. Распределение различных характеристик цефеид в зависимости

Таблица 3

Реальная средняя дисперсия $\bar{\sigma}_0$ различных характеристик классических цефеид в Галактике.

Характеристика x	$\bar{\sigma}_H$ ($0^m.01$)	0.5 $\leq \lg P < 0.9$		1.0 $\leq \lg P \leq 1.5$			
		n	$\bar{\sigma}$ ($0^m.01$)	$\bar{\sigma}_0$ ($0^m.01$)	n	$\bar{\sigma}$ ($0^m.01$)	$\bar{\sigma}_0$ ($0^m.01$)
$(B-V)_0^{max}$	4	75	6.0	4.5	47	9.5	9.0
$\langle B-V \rangle_0$	4	75	5.5	4.0	47	11.0	10.0
$(B-V)_0^{min}$	4	75	6.5	5.0	47	12.0	11.5
A_V	2	101	16.0	15.5	45	16.5	16.5
A_{bol}	2	94	13.0	12.5	48	14.5	14.0
$A_{(B-V)_0}$	2	93	6.5	6.0	44	11.5	11.5
A_R	—	39	2.5	—	17	7.0	—
\bar{R} (млн. км)	—	39	8.0	—	17	23.5	—

Примечания к табл. 3:

1. Дисперсия δ -уклонений определялась по формуле Петерса:

$$\bar{\sigma} \approx \frac{1.253}{n-0.5} \sum_{i=1}^n |\delta x_i|.$$

2. $\bar{\sigma}_H$ — средняя квадратичная ошибка определения характеристики x из наблюдений; δ — уклонения цвета B-V, найденного по избытку с ошибкой $\sigma_E > 0^m.10$, не рассматривались. В среднем справедливо: $\bar{\sigma}_E = 0^m.04$, $\bar{\sigma}_{B-V} \approx 0^m.01$, $\bar{\sigma}_V \approx 0^m.01$.

3. Реальная дисперсия $\bar{\sigma}_0 = \sqrt{\bar{\sigma}^2 - \bar{\sigma}_H^2}$.

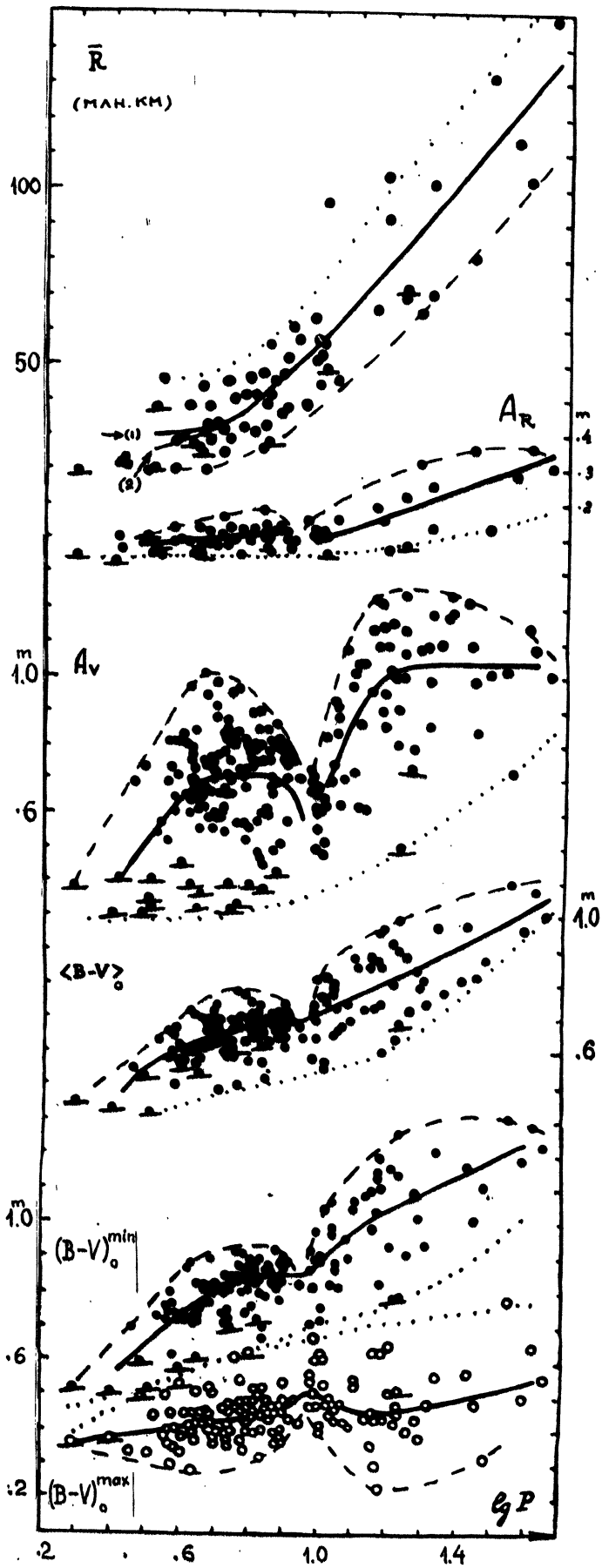


Рис. 1
 Распределение
 различных
 физических
 характеристик
 цефеид в зави-
 симости от $\lg P$.
 Сплошные линии —
 средние
 зависимости;
 подчеркнуты
 "z"-цефеиды.

от величины $\lg P$ иллюстрирует рис. 1. На этом рисунке помимо средних зависимостей (сплошные линии) указаны огибающие полей точек (прерывистые линии). Они определяют собой реальные границы галактической полосы нестабильности на соответствующих диаграммах. "Провал" в области $\lg P \sim 0.925$ четко прослеживается на всех распределениях, кроме распределения радиус-период. Цефеиды с $\lg P < 0.925$ мы относим к первой группе классических цефеид Галактики, с $\lg P > 0.925$ — ко второй (см. [9]).

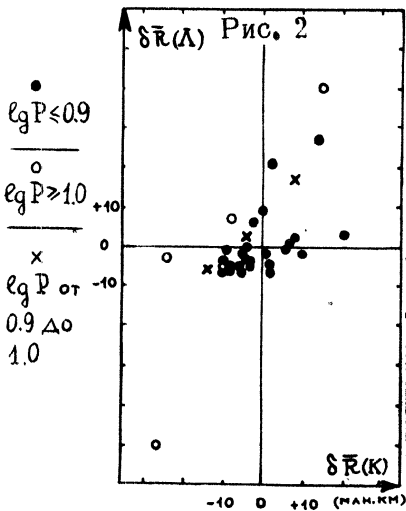
В табл. 2 можно найти индивидуальные значения A_V , A_{B_0I} , $A_{(B-V)_0}$, A_R , $(B-V)_0^{max}$, $(B-V)_0^{min}$, а также δ -уклонения. Усреднение уклонений по модулю дает возможность судить о средней величине естественной дисперсии полосы нестабильности (см. табл. 3).

В работе рассматриваются в основном δ -уклонения лишь для цефеид с $0.5 \leq \lg P \leq 0.9$ и $1.0 \leq \lg P \leq 1.5$ — в виду неточности проведения средних зависимостей при иных значениях $\lg P$ и из-за того, что цефеиды в интервале $0.9 < \lg P < 1.0$ теряют некоторые типичные свойства [9].

Радиусы, найденные интегральным способом Курочкина [1, 7], имеют ряд преимуществ перед теми, что получены другими способами, использующими представления о едином законе излучения в течение цикла пульсаций (принцип Весселинка-Бааде). Возможные отклонения от излучения абсолютно черного тела вносят сравнительно небольшие ошибки в величину радиуса (см. [1]). Способ малочувствителен к неточностям в избытке цвета, а это для нас существенно, так как Курочкин использовал цвета Крафта [10, 11], от чего мы сами отказались. Особая ценность данных Курочкина заключается в том, что единым методом найдены радиусы для значительного числа цефеид. Большая дисперсия значений (при фиксированном значении периода) заставила автора выделить цефеиды с "аномально" большими размерами, причем возникло подозрение, что это кажущееся завышение радиусов, обязанное присутствию голубых спутников. Однако, работа Эванса [12] по выявлению спектрально-двойных цефеид свидетельствует, что среди переменных с "аномально" большими \bar{R} имеется половина звезд наверняка одиночных. Поэтому мы объ-

4) Распределения по периоду величин $\langle B-V \rangle_0$ и $(B-V)_0^{min}$ близки из-за сходства температурных характеристик в "средней" фазе и в min в силу специфической нелинейности цефеидных пульсаций. Т. к. распределение амплитуд $A_{(B-V)_0}$ подобно распределению A_V , а распределение A_{B_0I} очень близко распределению A_V , то распределения $A_{(B-V)_0}$ и A_{B_0I} не приводятся на рис. 1; распределение A_{B_0I} см. в [2].

единили все данные из [7] (исключение составляет γ Sgr со сверхнормальным значением \bar{R}) и заново определили среднюю зависимость $\bar{R}_{\text{ср}}$ от $\lg P$, представленную на рис. 1 и в табл. 1. Второй вариант этой зависимости для самых малых периодов ($0.5 \leq \lg P < 0.7$), по-видимому более правдоподобный, построен с учетом индивидуальных радиусов 6-ти переменных типа δ Sct [13]. Эти звезды являются, вероятно, аналогом обычных классических цефеид среди звезд небольших масс ($\sim 1 + 2 M_{\odot}$).



Соответствие между δ -уклонениями средних радиусов цефеид, найденных Латышевым и Курочкиным.

Значительная дисперсия средней зависимости $\bar{R}_{\text{ср}}$ от $\lg P$, превосходящая ошибки наблюдений и вычислений, указывает на непараллельность линий $R = \text{const}$ и $P = \text{const}$ на диаграмме Герцшпрунга-Рессела ($H-R$). Вопрос о наличии естественной дисперсии зависимости $\bar{R}_{\text{ср}}$ ($\lg P$) имеет принципиальное значение. Как подчеркивает Латышев [14], нашедший для большого числа цефеид средние радиусы своим способом [15, 16] (модификация принципа Весселинка-Бааде), зависимость радиус-период именно статистическая. Действительно, сопоставление индивидуальных средних радиусов, оцененных методами Курочкина и Латышева, показывает, что индивидуальность цефеиды сохраняется независимо от способа определения размеров (см. [2] и также рис. 2).

1. Взаимосвязь между радиусами \bar{R} и цветами $\langle B-V \rangle$.

Сопоставление величин $\delta \bar{R}$ и $\delta \langle B-V \rangle$ (рис. 3), заимствованных из различных источников, приводит к установлению важной особенности полосы неустойчивости классических цефеид Галактики, если только исключить так называемые "s"-цефеиды (в том числе и γ Oph) — цефеиды с наименьшими амплитудами и синусоидоподобными кривыми блеска [17, 18]: при фиксированном значении периода чем холоднее переменная в "средней" фазе или в min , тем в среднем меньше она по размерам. Это отчетливо видно, и корреляция значима, если рассматривать цефеиды с $\lg P < 1$ или для всех периодов ограничиться узкими пределами цветов в max : на рис. 3 звезды с $\delta \langle B-V \rangle^{\text{max}} \leq |0.02|$ (обведены в квадраты) образуют четкую зависимость. Уклонения точек на рис. 3 от средней зависимости $\delta \bar{R}$ от $\delta \langle B-V \rangle$ (сплошная прямая) ставились в соответствие уклонениям нормально-

го цвета в max (рис. 4). Действительно, связь величин $\delta \bar{R}$ и $\delta \langle B-V \rangle_0$ оказывается параметрической (рис. 4):

$$\delta \langle B-V \rangle_0 = -K_1 \cdot \delta \bar{R} + K_2 \cdot \delta (B-V)_0^{\max}, \quad (8)$$

где $K_1 = 0.003 \pm 0.001$, $K_2 \sim 0.75$.

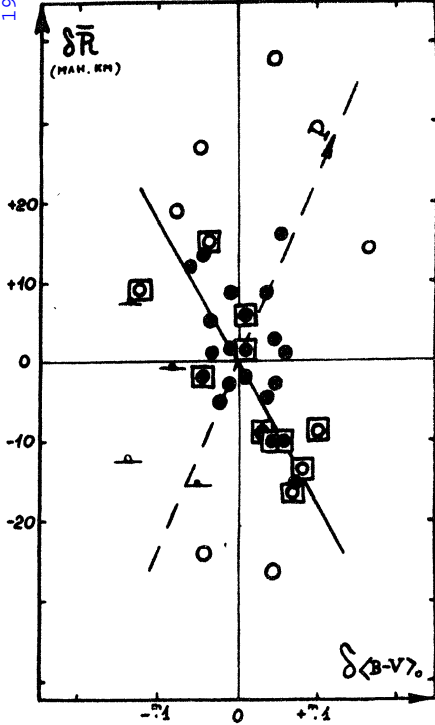


Рис. 3

Общая зависимость среднего радиуса \bar{R} от среднего нормального цвета $\langle B-V \rangle_0$ вдоль линий $P = \text{const}$. Заштрихованные кружки — цефеиды с $0.5 \leq \lg P \leq 0.9$; кружки — с $1.0 \leq \lg P \leq 1.5$.

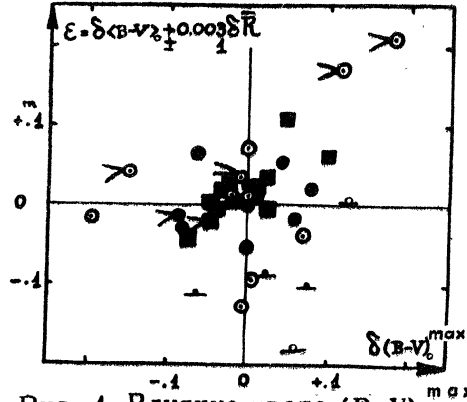


Рис. 4 Влияние цвета $\langle B-V \rangle_0$ на зависимость среднего радиуса \bar{R} от среднего нормального цвета $\langle B-V \rangle_0$ вдоль линий $P = \text{const}$.

Звезды в узком интервале периодов с $0.5 \leq \lg P \leq 0.7$ (черные квадраты на рис. 4) показывают явную функциональную зависимость от $\delta \langle B-V \rangle_0^{\max}$ (в пределах ошибок наблюдений). Интересно, что все 6 цефеид в созвездии Лебедя (указаны галочками) образуют последовательность, параллельную основной корреляции; "с" цефеиды располагаются особняком.

Таким образом, справедливо:

$$\delta \bar{T} = f(\delta \bar{R}, \delta T_{\max}) \quad (9a)$$

то-есть

$$P = P(\bar{R}, \bar{T}, T_{\max}). \quad (9b)$$

Укажем на все возможные причины изменения величины T_{\max} от звезды к звезде. На диаграмме радиус-температура, при условии неоднократного прохождения звездой области полосы неустойчивости, зависимость радиус-температура, естественно, должна быть однозначна, если рассматривать эволюцию конкретной звезды (т. е. с фиксированными значениями начальной массы M_0 , начального химического состава μ_0) на определенном этапе эволюции (т. е. фиксирована величина n — условно номер "проскока"):

$$R = R(T, \varpi_{\odot}, \mu_{\odot}, n). \quad (10)$$

Подстановка (10) в (9б) дает:

$$P = P(\bar{T}, T_{\max}, \varpi_{\odot}, \mu_{\odot}, n). \quad (11)$$

Значит должно выполняться соотношение:

$$\delta T_{\max} = F(\delta \bar{T}, \delta \varpi_{\odot}, \delta \mu_{\odot}, \delta n). \quad (12)$$

Вопрос о том, масса или начальный химический состав, или, наконец, этап эволюции в большей степени ответственны за вариации T_{\max} , будет рассматриваться нами в последующих работах. Наиболее сильным фактором, помимо средней температуры, определяющим дисперсию температур в \max при фиксированном значении периода, вероятно, является наблюдаемый химический состав звезды, т. е. совокупность начального содержания элементов и этапа эволюции.

Установленная нами взаимосвязь δ -уклонений среднего радиуса \bar{R} и среднего нормального цвета $\langle B-V \rangle_{\odot}$ при данном значении периода позволяет найти положение границ наблюдаемой полосы неустойчивости для классических цефеид Галактики на диаграмме $H-R$, а также положение линий $P = \text{const}$, если для средней болометрической светимости цефеиды справедливо известное соотношение:

$$L \sim \bar{R}^2 \cdot \bar{T}_{\text{эфф}}^4 \quad (\text{см. табл. 4 и рис. 5}).$$

Низкотемпературной огибающей на диаграмме цвет-период ставилась в соответствие линия наименьших радиусов на диаграмме радиус-период в виду того, что вдоль линий постоянного периода более холодные цефеиды имеют в среднем меньшие размеры.

Характерные, несколько необычные у цефеид с $\lg P < 1$, очертания полосы неустойчивости выявляются достаточно надежно, значительно точнее, чем если наносить на диаграмму $H-R$ индивидуальные значения $\lg \bar{L}/L_{\odot}$ и $\lg \bar{T}_{\text{эфф}}$ для цефеид с известными средними радиусами по Курочкину и средними нормальными цветами $\langle B-V \rangle_{\odot}$. На рис. 5 приведены также результаты теоретических расчетов Хофмейстер [20]: эволюционные треки звезд с массами 5 и $9 \varpi_{\odot}$ и начальным химическим составом, типичным для плоской составляющей Галактики ($X = 0.602$, $Z = 0.044$); кроме того, указаны соответствующие состояния наибольшей пульсационной неустойчивости (жирные точки).

Сравнение наклонов линий $P = \text{const}$ и $R = \text{const}$ на рис. 5 наглядно показывает, что линия $P = \text{const}$ и линия "цикла" (вдоль линии "цикла" меняются параметры данной цефеиды от \max к \min) располагаются по разные стороны от линии $R = \text{const}$. Это было обнаружено вначале по рис. 3. Действительно, уровень $\delta \bar{R} = 0$ отождествляется с линией $R = \text{const}$; найденная средняя корреляция величин $\delta \bar{R}$ с $\delta \langle B-V \rangle_{\odot}$ следует вдоль линии $P = \text{const}$; линия "цикла" располагается где-то между линией $R = \text{const}$ и пунктирной линией,

Положение наблюдаемой полосы неустойчивости
на диаграмме Н- \bar{R}

Таблица 4

$\lg P$	Высокотемпературная граница			Средняя линия			Низкотемпературная граница		
	$\lg \bar{R}$	$\lg \bar{T}$	$\lg L/L_{\odot}$	$\lg \bar{R}$	$\lg \bar{T}$	$\lg L/L_{\odot}$	$\lg \bar{R}$	$\lg \bar{T}$	$\lg L/L_{\odot}$
0.5	7.655	3.83	3.90	7.40	3.80	3.26	7.28	3.785	2.95
0.6	7.655	3.81	3.82	7.445	3.79	3.28	7.28	3.775	2.93
0.7	7.68	3.805	3.86	7.505	3.785	3.27	7.30	3.76	2.90
0.8	7.73	3.805	3.96	7.59	3.775	3.55	7.40	3.76	3.09
0.9	7.80	3.80	4.08	7.68	3.775	3.71	7.505	3.765	3.30
1.0	7.875	3.80	4.22	7.765	3.77	3.85	7.61	3.755	3.47
1.1	7.955	3.795	4.36	7.84	3.76	3.98	7.70	3.74	3.61
1.2	8.015	3.79	4.45	7.90	3.755	4.10	7.78	3.73	3.73
1.3	8.055	3.775	4.48	7.965	3.745	4.15	7.84	3.72	3.81
1.4	8.095	3.765	4.52	8.015	3.735	4.20	7.90	3.715	3.92
1.5	8.13	3.75	4.53	8.065	3.73	4.28	7.95	3.71	4.00

Примечания к табл. 4:

1. Значения солнечных постоянных заимствованы из [19].
2. Величины $\lg \bar{R}$ для средней линии соответствуют 2-му варианту кривой $\bar{R}_{\text{ср}}$ ($\lg P$).

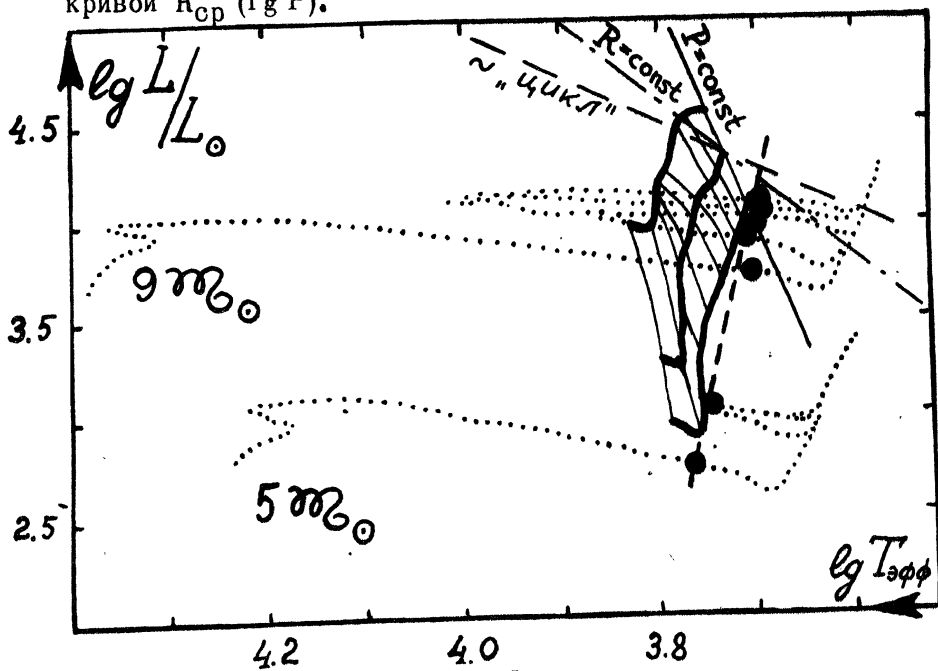


Рис. 5

Положение наблюдаемой полосы неустойчивости цефеид на диаграмме Н- \bar{R} . Линии постоянных периодов соответствуют значениям $\lg P = 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5$.

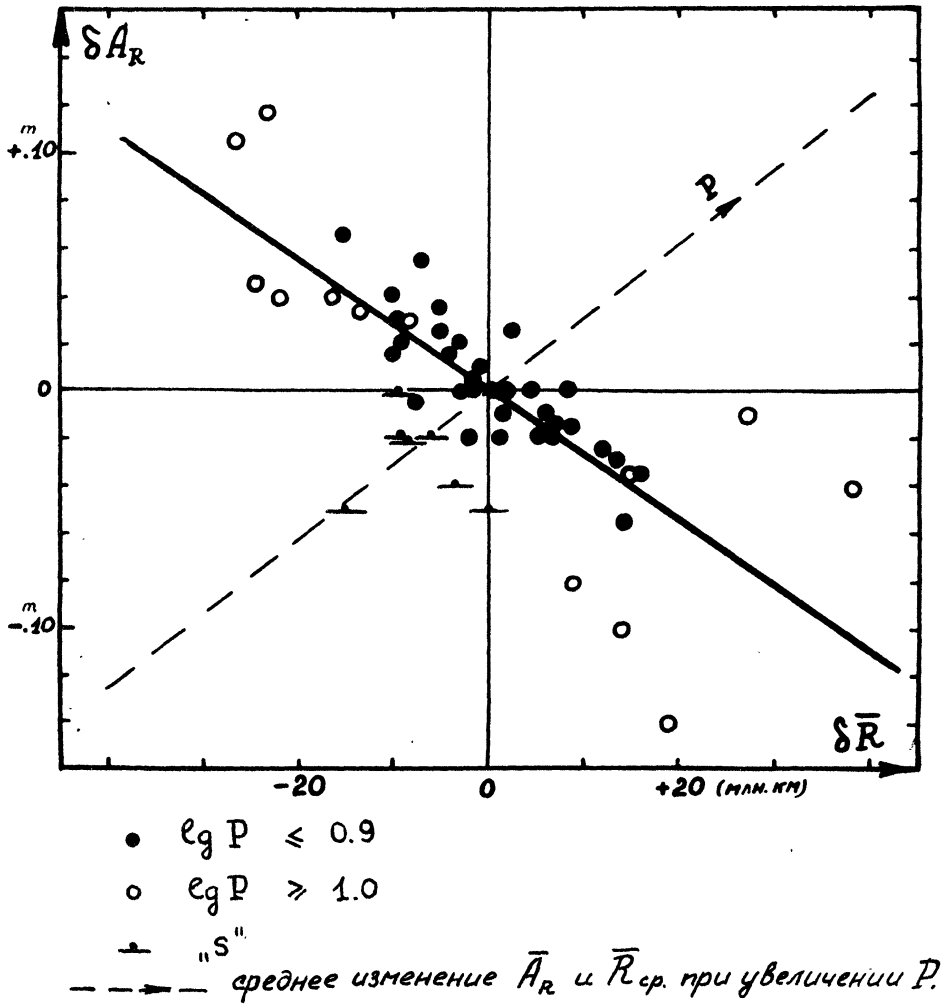


Рис. 6

Зависимость радиальных амплитуд A_R от величины среднего радиуса \bar{R} вдоль линий $P = \text{const.}$

Крафта, значениями $(B-V)_0$. Соответствующие δ -диаграммы приводятся на рис. 7 для всех цефеид с $0.5 \leq \lg P \leq 0.9$ и $1.0 \leq \lg P \leq 1.5$.⁵⁾ В табл. 5 указаны коэффициенты линейных корреляций ρ между величинами δA_V и $\delta (B-V)_0$, представленными на рис. 7, ошибки σ этих коэффициентов, отношения $|\rho|/\sigma$ (если $|\rho|/\sigma \geq 3$, то корреляция высокозначима [23]), а также пределы, в которых с вероятностью 95% заключено истинное значение коэффициента линейной корреляции ρ_0 согласно z -критерию Фишера [23]. Расчеты проведены отдельно для двух, обычно нами выделяемых, групп цефеид — с $\lg P < 1$ и $\lg P > 1$, включая "s"-цефеиды; при этом рассматривались лишь звезды с надежным избытком цвета ($\sigma_E < 0^m.10$).

1). Явная линейная корреляция уклонений амплитуд блеска с уклонениями цвета имеет место только или в \max , или в \min .

2). Если для цефеид с $\lg P < 1$ корреляция сильнее в \max , то для цефеид с $\lg P > 1$ — в \min .

3). Корреляции в \max и в \min всегда противоположного знака. В среднем амплитуды блеска тем больше, или чем холоднее звезда в \min , или чем горячее она в \max , т. е. чем больше цветовая амплитуда. Тривиальная сторона этого факта связана с тем, что, как известно, амплитуда блеска определяется в значительной, но, вообще говоря, не полной степени амплитудой цветовой (температурной). Поясним сказанное подробнее. Справедливо такое соотношение [2]:

$$A_{b,0l} = 4A_T - 2A_R + \Delta A_R, \quad (14)$$

где поправка ΔA_R связана с возможным уклонением излучения цефеид в \max от излучения абсолютно черного тела и существующим сдвигом фаз между моментом максимального сжатия звезды и ее \max блеска. Специальный анализ в [2] показывает, что для всех цефеид в среднем выполняется условие:

$$\delta(\Delta A_R) \simeq \delta A_R. \quad (15)$$

Тогда оказывается, с учетом (14), что:

$$\delta A_{b,0l} \simeq 4\delta A_T - \delta A_R, \quad (16)$$

где уклонение δA_R в свою очередь пропорционально уклонению δA_T с точностью до величины δT_{\max} (см. пункт 3).

Характерная зависимость амплитуды блеска от цвета в \max и в \min — именно от разности этих экстремальных значений — находит свое наглядное отражение в формах огибающих на рис. 1: линия наибольших амплитуд блеска и цвета подобна уровню наиболее красных цветов в \min и зеркально — подобна уровню наиболее голубых переменных в \max .

⁵⁾ В данном случае в качестве δA_V мы рассматривали уклонение не от средней зависимости, что всегда надежнее, а от линии наибольших амплитуд. Вообще выбор средней зависимости или верхней огибающей не приводит к заметным принципиальным различиям.

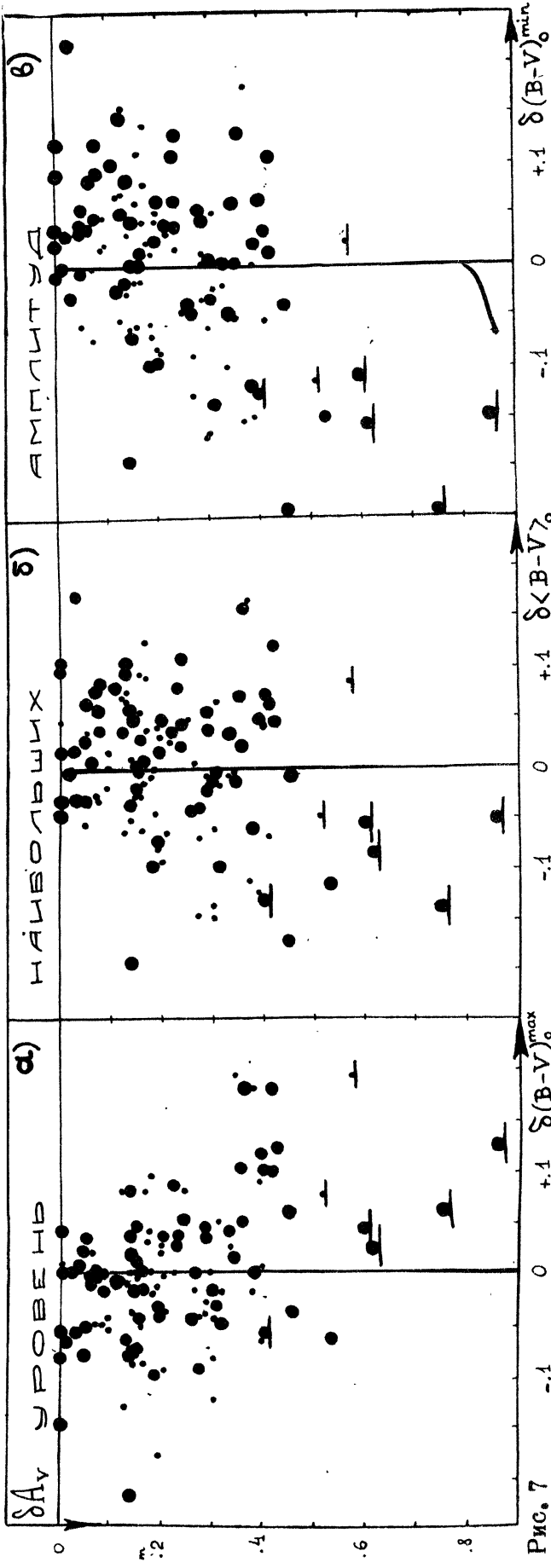


Рис. 7 -1 0 +1 $\delta(V-V)_{\max}$ $\delta(V-V)_{\min}$
 Общая зависимость амплитуд блеска Δv от нормального цвета $(V-V)_0$ вдоль линий $P = \text{const}$: а) в max, б) в "средней" фазе; в) в min. Используются цефеиды с $\lg P \leq 0.9$ и $1.0 \leq \lg P \leq 1.5$. Малые точки - цефеиды, для которых ошибки $\sigma_F > 0.10$.

Число звезд	$\lg P$	max		"средняя" фаза		min				
		$\rho \pm \sigma$	$ \rho /\sigma$	пределы для ρ_0	$\rho \pm \sigma$	$ \rho /\sigma$	пределы для ρ_0			
80	0.5 + 0.9	-0.58 ± 7	8.3 (1)	-0.41 - 0.72	+0.03 ± 11	0.3	-0.23 + 0.23	+0.42 ± 2	4.7 (1)	+0.21 + 0.60
38	1.0 + 1.5	-0.30 ± 16	1.8	+0.02 - 0.57	+0.43 ± 16	2.6	+0.13 + 0.66	+0.66 ± 16	4.0 (1)	+0.43 + 0.82

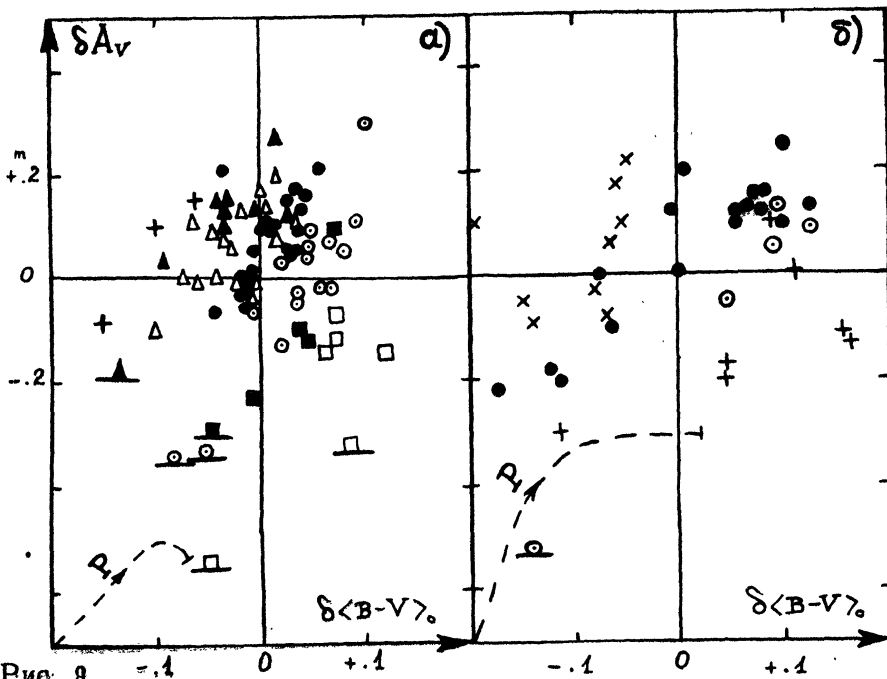


Рис. 8

Параметрическая зависимость амплитуд блеска A_V от среднего нормального цвета $\langle B-V \rangle$ вдоль линий $P = \text{const}$. Параметр: δ -уклоны нормального цвета в $\text{max} - \delta(B-V)_{\text{max}}$. а) Цефеиды с $\lg P < 1$; заштрихованные кружки: $\delta \leq |0^{\text{m}}.02|$; кружки: $0^{\text{m}}.02 < \delta < 0^{\text{m}}.06$; заштрихованные квадраты: $0^{\text{m}}.06 \leq \delta < 0^{\text{m}}.10$; квадраты: $\delta \geq 0^{\text{m}}.10$; треугольники: $-0^{\text{m}}.06 \leq \delta < -0^{\text{m}}.02$; заштрихованные треугольники: $-0^{\text{m}}.06 < \delta < -0^{\text{m}}.10$; кресты: $\delta \leq -0^{\text{m}}.10$. б) Цефеиды с $\lg P > 1$; заштрихованные кружки: $\delta < |0^{\text{m}}.05|$; кружки: $0^{\text{m}}.05 < \delta < 0^{\text{m}}.10$; кресты — остальные,

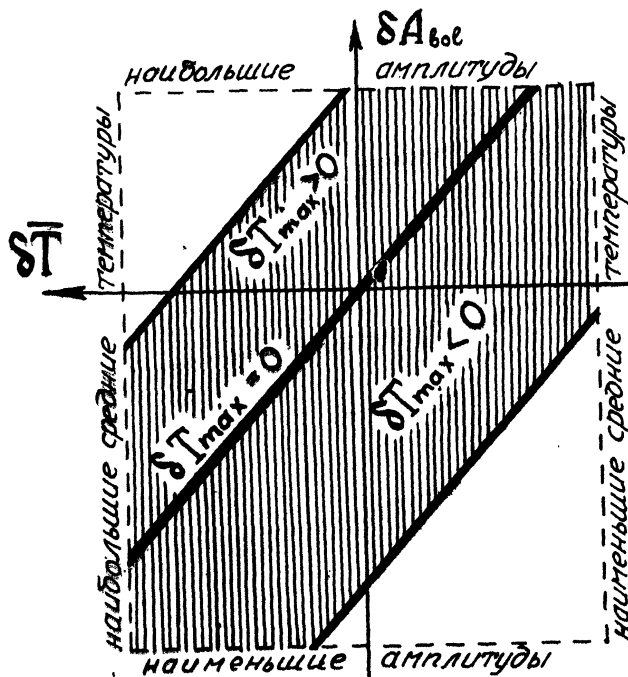


Рис. 9

Схематическое представление структуры наблюдаемой полосы неустойчивости на диаграмме $A_{bol} - T$ вдоль линий $P = \text{const}$.

4). Нельзя судить о структуре полосы нестабильности только по **общей** зависимости δ -уклонений амплитуд блеска от δ -уклонений **среднего** нормального цвета $\langle B-V \rangle_0$, во всяком случае для переменных с периодами меньше 10 дней. Действительно, цвет в "средней" фазе есть величина промежуточная между экстремальными значениями $(B-V)_0$, причем по мере роста амплитуд, т. к. при этом растет и асимметрия (согласно, например, нашим неопубликованным данным), значение $\langle B-V \rangle_0$ приближается к величине $(B-V)_0^{min}$ (см. примечание 4). Именно поэтому знак коэффициента линейной корреляции ρ_0 между величинами δA_V и $\delta \langle B-V \rangle_0$ тот же, что между величинами δA_V и $\delta (B-V)_0^{min}$, и эти коэффициенты особенно близки для цефеид с $\lg P > 1$, у которых амплитуды в среднем самые большие. Наглядное подтверждение сказанному — сходство полей точек на рис. 7б и 7в.

Итак, мы приходим к выводу, что амплитуда блеска должна однозначно (с точностью до ошибок наблюдений) задаваться значениями нормального цвета не в одной, а в **двух** фазах: в \max и в \min , или, что почти одно и то же, в \max и в "средней" фазе. В самом деле, учет цвета в \max при сравнении величин δA_V с $\delta \langle B-V \rangle_0$ и δA_V с $\delta (B-V)_0^{min}$ обращает все, подчас незначимые, корреляции в четкие параметрические зависимости (рис. 8а, б). В результате мы получили: для $0.50 \leq \lg P \leq 0.91$ по 76 звездам, включая "s"-цефеиды:

$$\delta A_V = 1.84 \delta (B-V)_0^{min} - 1.91 \delta (B-V)_0^{max}, \quad (17)$$

$$\pm 11 \qquad \qquad \qquad \pm 11$$

$$\delta A_V = 2.66 \delta \langle B-V \rangle_0 - 2.74 \delta (B-V)_0^{max}, \quad (18)$$

$$\pm 19 \qquad \qquad \qquad \pm 17$$

и для $1.0 \leq \lg P \leq 1.5$ по 37 звездам, включая Y Oph:

$$\delta A_V = 1.24 \delta (B-V)_0^{min} - 1.30 \delta (B-V)_0^{max}, \quad (19)$$

$$\pm 13 \qquad \qquad \qquad \pm 18$$

$$\delta A_V = 1.71 \delta \langle B-V \rangle_0 - 1.81 \delta (B-V)_0^{max}. \quad (20)$$

$$\pm 21 \qquad \qquad \qquad \pm 24$$

При вычислении коэффициентов в уравнениях (17–20) методом наименьших квадратов использовались лишь те цефеиды, у которых средняя ошибка определения избытка цвета E_{B-V} не превышала $0^m.10$. На рис. 8 приводятся именно эти звезды. Точки, соответствующие самым плохим значениям E_{B-V} ($\sigma_E > 0^m.10$), как правило, повторяют ход имеющихся тесных корреляций. Несколько цефеид с достаточно надежными избытками цвета оказались уклоняющимися от найденных зависимостей: CS Ori ($\lg P = 0.59$), XX Mon (0.74), AW Per (0.81), SZ Mon (1.21). В отношении звезды AW Per известно, что это спектрально-двойная [12], а SZ Mon, скорее всего, принадлежит II типу населения [12].

В указанных уравнениях возможные квадратичные, зависящие

от величины периода и свободные члены являются практически незначимыми. Неравенство нулю свободного члена было бы сигналом того, что при каких-то значениях периода средние зависимости (или одна из них) проведены не совсем точно.

Предварительное рассмотрение показывает, что цефеиды со вторичными горбами, волнами на кривых блеска не отличаются в пределах ошибок от переменных без такого рода возмущений в смысле величин коэффициентов в уравнениях (17 – 20).

Коэффициенты значимо различаются для двух групп цефеид – с периодами меньше и больше 10 дней.

Проконтролируем правильность определения коэффициентов, например в уравнении (18), используя 3 цефеиды из рассеянного скопления NGC 7790: CEa Cas, CEb Cas, CF Cas (последняя участвовала при выводе (18)). Данные для двойной цефеиды CE Cas заимствованы из работы [24], где фотографически получены кривые изменения блеска в лучах В и V для обоих компонентов с привязкой к CF Cas. В табл. 6 сравниваются вычисленные согласно (18) значения δA_V с реальными величинами.

Таблица 6

Звезда	период	$\delta \langle B-V \rangle_0$	$\delta (B-V)_0^{max}$	δA_V вычисл.	δA_V	O-C
CEb Cas	4 ^d .48	+ 0 ^m .05	+ 0 ^m .02	+ 0 ^m .07	+ 0 ^m .08	+ 0 ^m .01
CF Cas	4.88	+ 6	+ 10	- 11	- 14	- 3
CEa Cas	5.14	+ 17	+ 17	- 2	- 2	0

Само по себе интересно и важно, что 3 цефеиды не галактического поля, а принадлежащие единой по происхождению звездной группировке, прекрасно удовлетворяют соотношению (18).

Итак, подчеркнем основные особенности взаимосвязи амплитуд блеска и нормального цвета $(B-V)_0$ в двух фазах – max и в "средней" фазе (см. также рис. 9):

а). При фиксированном значении $\delta (B-V)_0^{max}$ на диаграмме $H-R$ располагается некая субполоса, подобная той, что изображена на рис. 5 (для $\delta (B-V)_0^{max} = 0$ ее положение в целом совпадает с указанной на рис. 5). На правой, низкотемпературной, границе каждой субполосы амплитуды колебаний радиуса, температуры и светимости строго наибольшие, независимо от того, как именно поперек полосы меняется средняя температура звезды – или вдоль линий $P = const$, или тем более вдоль линий $\mathcal{M}_0 = const$.

б). Чем холоднее цефеида в max, тем значительнее смещаются вправо субполосы на диаграмме $H-R$. Действительно, имеет место

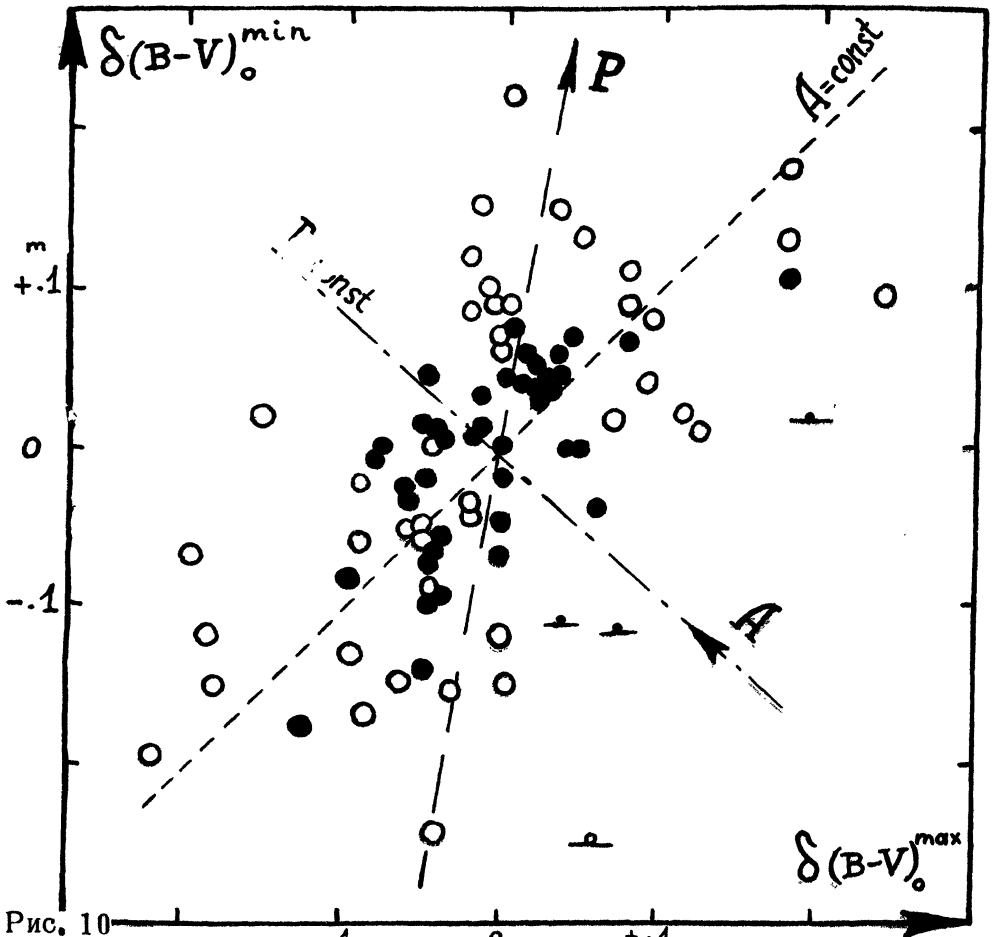


Рис. 10 Сопоставление δ -уклонов нормального цвета в max и min. Обозначения, как на рис. 3.

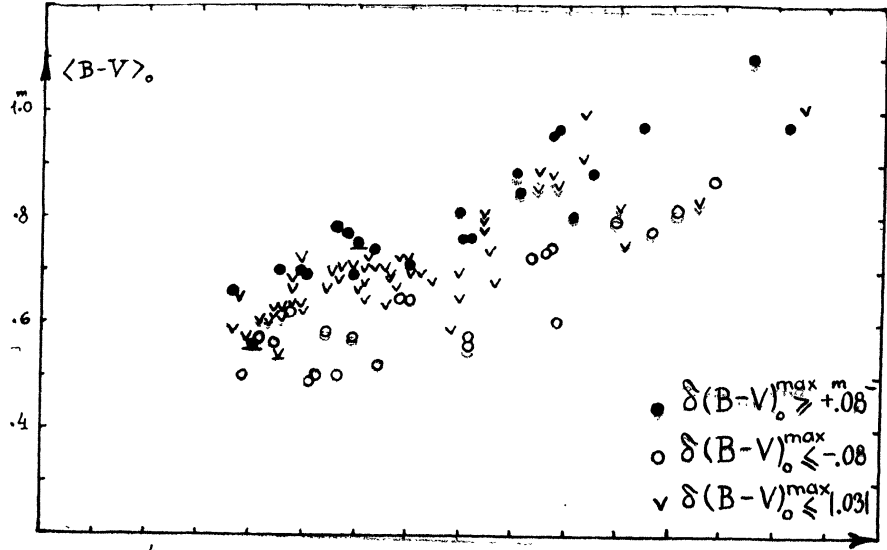


Рис. 11 Расслоение полосы нестабильности на диаграмме цвет-период в зависимости от параметра $\delta(B-V)_{\max}$: точки - $\delta \geq +0.08$, кружки - $\delta < -0.08$, галочки - $|\delta| < 0.03$.

общая для цефеид всех периодов и амплитуд грубая пропорциональность величин $\delta(B-V)_0^{max}$ и $\delta(B-V)_0^{min}$ (т. е. и $\delta < B-V >_0$) (рис. 10), как если бы амплитуды у всех цефеид были бы одинаковы.

в). По мере смещения субполос в сторону низких температур, т. е. с увеличением $\delta(B-V)_0^{max}$, величина наибольшей амплитуды на правой границе полосы падает. Наглядно это демонстрируется на рис. 11.

3. Взаимосвязь амплитуд блеска, цвета и радиуса.

Взаимосвязь δ -уклонений амплитуд A_R , $A_{(B-V)_0}$ и A_V (или A_{bol} , т. к. обнаружено, что $\delta A_{bol} \approx \delta A_V$), представленная на рис. 12, 13, как и следует ожидать, исходя из уравнений (16 – 20), является параметрической – с параметром $\delta(B-V)_0^{max}$, но уже не столь сильным, создающим лишь малую добавочную дисперсию. Мы можем констатировать в общем пропорциональную линейную связь между величинами δA_R , $\delta A_{(B-V)_0}$, δA_V (или δA_{bol}).

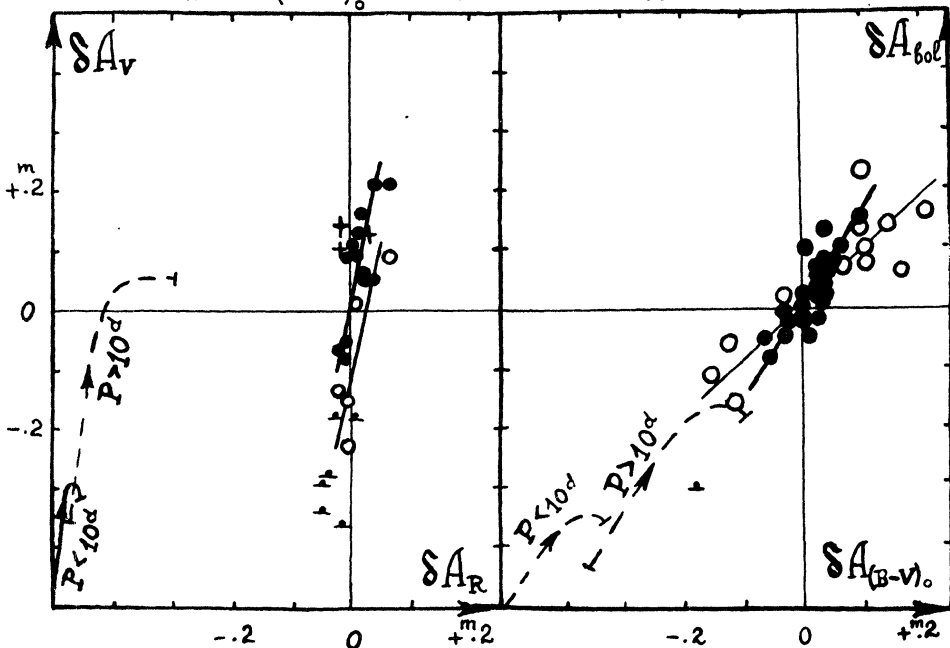


Рис. 12

Сопоставление δ -уклонений амплитуд блеска и радиальных амплитуд ($\lg P < 1$). Заштрихованные кружки: $\delta(B-V)_0^{max} \leq |0^m.025|$; кружки: $\delta(B-V)_0^{max} > 0^m.05$; подчеркнутые точки: "s"-цефеиды; кресты: $\delta(B-V)_0^{max} < -0^m.05$.

Рис. 13
Сопоставление δ -уклонений болометрических амплитуд и амплитуд цвета. Заштрихованные точки – цефеиды с $0.5 \leq \lg P \leq 0.9$, кружки – с $1.0 \leq \lg P \leq 1.5$.

Интересна такая особенность наблюдаемой полосы неустойчивости: при определенных значениях периода ($0.4 < \lg P < 0.7$ и $1.0 < \lg P < 1.3$) взаимные изменения амплитуд, в среднем независимо от величины $\delta(B-V)_{\text{max}}$, одинаковы, какое бы направление вдоль (приращение $\Delta \bar{x}$) или поперек (уклонение δx) полосы неустойчивости мы бы ни брали:

$$\Delta \bar{A}_R : \Delta \bar{A}_{(B-V)_0} : \Delta \bar{A}_{b_0l} \simeq \delta A_R : \delta A_{(B-V)_0} : \delta A_{b_0l} \quad (21)$$

Для изменений среднего цвета $\langle B-V \rangle_0$ и амплитуды, например, блеска наблюдается совершенно аналогичная ситуация (см. пунктир на рис. 8):

$$\Delta \overline{\langle B-V \rangle_0} : \Delta \bar{A}_V \simeq \delta \langle B-V \rangle_0 : \delta A_V \quad (22)$$

Указанные интервалы периодов характеризуются тем, что у таких цефеид наибольшие амплитуды пульсаций, наибольшие нормальные цвета в *min* и в "средней" фазе, наибольшие температуры в *max* нарастают (рис. 1); достигаются же крайние возможные значения только при $\lg P \sim 0.7$ для цефеид с периодами меньше 10 дней и при $\lg P \sim 1.3$ для цефеид с периодами больше 10 дней [9]. Тогда соотношения (21) и (22) нарушаются. Значения периодов, соответствующие $\lg P \sim 0.7$ и $\lg P \sim 1.2 + 1.3$, это те, при которых наблюдаются "наивероятнейшие" состояния пульсации, согласно нашей терминологии в [9], т. е. при этих значениях периода все характеристики цефеид с периодами меньше и больше 10 дней достигают как бы своего "насыщения". И около этих значений периодов, известно, возрастает относительная численность цефеид. Уравнение (21) свидетельствует о том, что при **определенных** значениях периода сами индивидуальные амплитуды цефеид A_V , $A_{(B-V)_0}$ и A_R независимо от величины периода пропорциональны друг другу. Взаимосвязь величин A_V и $A_{(B-V)_0}$ — в общем хорошо известный факт, обусловленный перво-степенным влиянием на колебания потока, идущего от звезды, изменений ее эффективной температуры. Важно, что между амплитудами A_R и A_V (или A_{b_0l}) тоже усматривается пропорциональная связь, отмеченная и Латышевым в [14].

Факт взаимной пропорциональности индивидуальных амплитуд A_V , $A_{(B-V)_0}$, A_R указывает, что на диаграммах цвет-величина, цвет-радиус, величина-радиус соответствующие линии "цикла" должны быть параллельны у всех цефеид внутри каждого выделенного интервала периодов, будь то $0.5 \leq \lg P < 0.7$ или $1.0 \leq \lg P < 1.2 + 1.3$. Различие между цефеидами с периодами меньше и больше 10 дней состоит в данном случае в том, что линии "цикла" на диаграмме цвет-величина более пологи для переменных с большими периодами, именно: $A_V / A_{(B-V)_0} \sim 2.7$ и 1.8 соответственно.

4. Цефеиды с наименьшими амплитудами

Коротко остановимся на "s"-цефеидах⁶⁾. Этим переменным свойственны наименьшие амплитуды не только блеска и цвета, но и радиуса (рис. 1). Как цефеиды с наименее интенсивными пульсациями, они горячее всех в min (или в "средней" фазе) и холоднее в max. Однако при самых малых колебаниях средние их радиусы аномально малы вдоль линий $P = \text{const}$. Таким образом, если с точки зрения температурных характеристик эти звезды являются крайним выражением явления цефеидных пульсаций, то с точки зрения размеров эти переменные представляют собой даже некоторое противопоставление остальным цефеидам. Факт их обособленности, следующий из анализа структуры полосы неустойчивости, вполне согласуется с точкой зрения Ю. И. Ефремова [17, 18]: вероятно, "s"-цефеиды находятся на особом этапе эволюции (соответствуют первому "проскоку" полосы неустойчивости слева направо).

З а к л ю ч е н и е

Анализ основного наблюдательного материала по 160 классическим цефеидам Галактики (фотоэлектрические данные в системе BV, оценки спектров, начиная с 1916 года, определения средних радиусов интегральным способом) приводит к довольно четкому представлению о структуре полосы неустойчивости.

1. Наиболее интенсивные колебания радиуса, температуры и светимости свойственны в среднем низкотемпературной границе наблюдаемой полосы неустойчивости и только ей, если рассматривать переменные с определенными температурами в max. К высокотемпературной границе амплитуды спадают. Однако современные теоретические расчеты не предсказывают усиления пульсаций на правой границе полосы неустойчивости. Такое расхождение можно, по-видимому, объяснить недооценкой конвективного переноса энергии в зонах ионизации водорода и гелия.

Температура в max может зависеть либо от начальной массы звезды, либо от наблюдаемого химического состава, причем последнее представляется наиболее вероятным (см. последующие работы).

2. Наиболее сильные колебания у цефеид сопровождают всегда самые низкие средние температуры, независимо от направления смещения в пределах полосы неустойчивости.

⁶⁾ На всех рисунках "s"-цефеиды обозначены малыми подчеркнутыми точками.

3. Обнаружено, что на диаграмме $H-R$ наклоны линий $P = \text{const}$, "цикла" и $R = \text{const}$ не совпадают друг с другом. При фиксированном значении периода наименьшие размеры в среднем у цефеид с самыми низкими средними температурами; точно же это выполняется, если рассматривать звезды с определенными значениями температуры в max .

4. Подчеркнем, что радиусы, найденные интегральным методом Курочкина, показывают наличие реальной дисперсии размеров цефеид при фиксированном значении периода. Можно вообще допустить наличие систематической ошибки метода, приводящей к корреляции величин $\delta \bar{R}$ с δA_R , а значит и к корреляции $\delta \bar{R}$ с $\delta \langle B-V \rangle_0$, так как имеется пропорциональная связь между отклонениями амплитуд радиуса и отклонениями цвета. Но тогда вызовет удивление существование столь сложной систематической ошибки, которая разброс точек на диаграмме $\delta \bar{R} - \delta \langle B-V \rangle_0$ (рис. 3, 4) определяет и параметром $\delta (B-V)_0^{max}$ (решающим при сопоставлении характеристик по совершенно иному материалу, — например, по фотометрическим данным A_V , $(B-V)_0$), и некоторым параметром, ответственным за расслоение поля точек на рис. 4. А такое расслоение мы склонны объяснять влиянием неодинакового содержания тяжелых элементов у звезд в созвездии Лебедя, у "s"-цефеид.

5. Для галактических цефеид определенно имеется **параллельность** наблюдаемой и теоретической полосы неустойчивости на диаграмме $H-R$. Аналогичный вывод неоднократно уже следовал из работ других авторов; однако при этом контролем теоретических расчетов служили всего лишь несколько цефеид — членов рассеянных скоплений.

6. Обращает на себя внимание давно известное резкое подразделение всей совокупности классических цефеид Галактики на две группы: с периодами меньше и больше 10 дней. Всевозможные зависимости, как правило, значимо различаются для них, хотя аналогия и близость корреляций подчеркивает общие для всех галактических цефеид тенденции. Дисперсия любых наблюдаемых характеристик цефеид всегда значительно больше у переменных с периодами больше 10 дней.

7. Из наблюдаемого факта усиления колебаний на низкотемпературной границе полосы неустойчивости следуют две эволюционные возможности: в процессе эволюции по достижении состояния наибольшей пульсационной неустойчивости 1) либо звезда поворачивает назад, что не укладывается в рамках современных представлений об эволюции, 2) либо при дальнейшей эволюции вправо спад амплитуд колебаний происходит чрезвычайно быстро, равно как и увеличение амплитуд при возвращении влево.

Дальнейшее изучение структуры полосы неустойчивости требует: 1) уточнения величин средних радиусов, найденных методом Курочкина; 2) привлечения других способов массового определения радиусов с их критическим анализом; 3) окончательного эмпирического доказательства реальности дисперсии радиусов цефеид при фиксированной величине периода; 4) привлечения истинных цветов (U-V); 5) особого рассмотрения цефеид с возмущениями на кривых блеска и цвета; 6) изучения намечающихся различий в положении полосы неустойчивости на диаграмме H-R для всевозможных пространственных группировок цефеид Галактики.

Литература:

1. Н. Е. Курочкин, ПЗ 15, 68, 1964.
2. Н. Н. Якимова, АЖ 47, 297, 1970.
3. Н. Н. Якимова, Г. С. Царевский, АИ № 461, 5, 1968.
4. Г. С. Царевский, Н. Н. Якимова (Гусева), ПЗ 17, 120, 1970.
5. Н. Н. Якимова, ПЗ 17, 199, 1970.
6. R. Mitchell et al, ТТВ 3, 153, 1964.
7. Н. Е. Курочкин, ПЗ 16, 10, 1966.
8. H. L. Johnson, Ann. Rev. 4, 193, 1966.
9. Н. Н. Якимова, АИ № 472, 1, 1968.
10. R. Kraft, ApJ 132, 404, 1960.
11. K. Bahner, W. Hiltner, R. Kraft, ApJ Suppl. 6, № 59, 1962.
12. T. L. Evans, MN 141, 109, 1968.
13. М. С. Фролов, АЦ № 505, 1, 1969.
14. И. Н. Латышев, АЦ № 276, 1, 1964.
15. И. Н. Латышев, Астрофизика 2, вып. 3, 355, 1966.
16. И. Н. Латышев, АЦ № 473, 1, 1968.
17. Ю. Н. Ефремов, АЦ № 462, 1, 1968.
18. Ю. Н. Ефремов, ПЗ 16, 365, 1968.
19. К. У. Аллен, "Астрофизические величины", стр. 159, изд. М, 1960.
20. E. Hofmeister, Zs Ap 65, 164, 1967.
21. Fernie, AJ 72, 1327, 1967.
22. Н. Н. Якимова, АИ № 529, 4, 1969.
23. В. И. Романовский, "Применение математической статистики в опытном деле", ОГИЗ, 1947.
24. Ю. Н. Ефремов, П. Н. Холопов, АЦ № 326, 1, 1965.

Москва, ГАИШ,
январь, 1969 г.