

ДИАГРАММА ГРАДИЕНТОВ ДЛЯ ЦЕФЕИД И ЕЕ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ *

И. Г. Колесник, Э. С. Хейло

Из анализа (U, B) и (V, B) зависимостей для 116 звезд типа RR Lyr, 18 — типа CW и 88 классических цефеид определены величины градиентов блеска $\frac{dU}{dB} = V_U$ и $\frac{dV}{dB} = V_V$. Установлено, что на

диаграмме градиентов (V_U, V_V) эти звезды располагаются в полосе, вытянутой вдоль оси V_U ; внутри неё они разделяются по типам; RR имеют $V_U < 1.05$, для CW $1.05 \leq V_U \leq 1.17$, у Cδ $V_U > 1.15$. Показано, что излучением абсолютно черного тела (АЧТ) с переменными радиусом и температурой нельзя объяснить положение цефеид на диаграмме градиентов. В рамках гипотезы АЧТ рассмотрено две модели: модель А, когда относительная амплитуда изменения радиуса в U-диапазоне отличается от таковой в B и V диапазонах; модель В, когда изменение температуры в ультрафиолете (U) не равно изменению в B и V. На основании имеющихся данных трудно сделать выбор между ними. Кратко обсуждается модель АВ. Градиенты блеска позволяют определять соотношения между физическими параметрами, ответственными за переменность блеска.

Gradient Diagram for Pulsating Variables and its Interpretation

I. G. Kolesnik, E. S. Heilo

The brightness gradients $\frac{dU}{dB} = V_U$ and $\frac{dV}{dB} = V_V$ were determined from the analysis of (U, B) and (V, B) dependences for 116 stars of RR Lyrae-type, 18 stars CW-type and 88 classical cepheids. At the gradient diagram (V_U, V_V) stars of these types are located inside a strip; RR Lyrae stars have $V_U < 1.05$, for CW-stars $1.05 \leq V_U \leq 1.17$, for Cδ-stars $V_U > 1.15$. It is impossible to explain the location of these variables at the gradient diagram by the absolutely black body radiation of a star with variable radius. Two models in the case of absolutely black body radiation were discussed. The brightness gradients permit to determine the relations between physical parameters connected with light variability.

* По материалам доклада на XVI пленуме Комиссии переменных звезд Астросвета АН СССР (Кишинев, июнь 1969 г.)

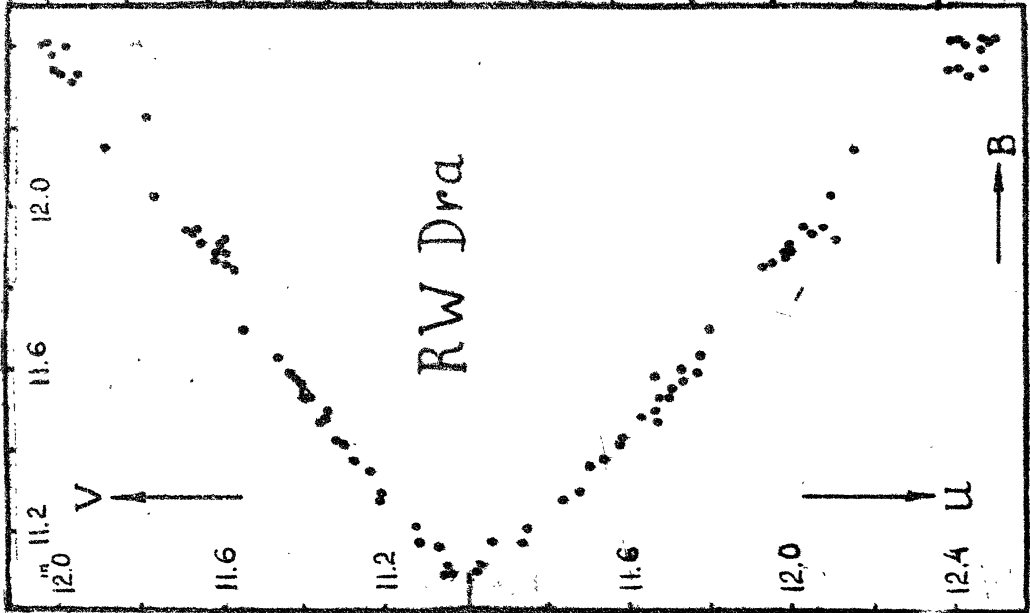


Рис. 1

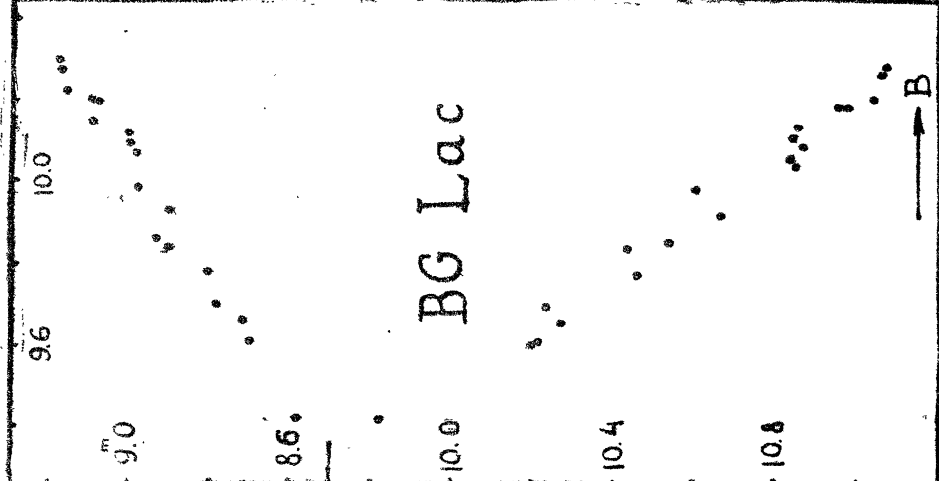


Рис. 2

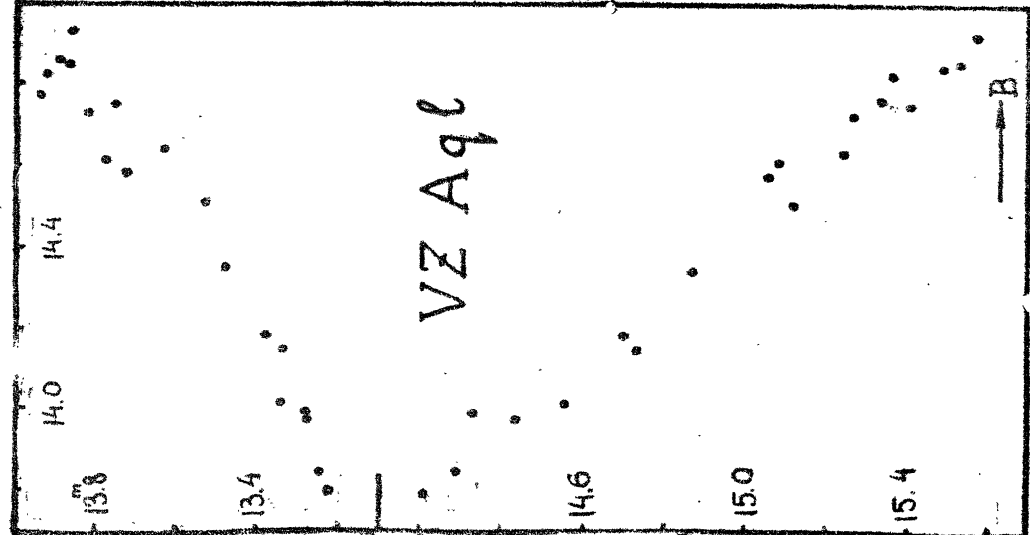


Рис. 3

1. Сопоставление U , B и V , V — величин для переменных звезд различных типов показывает, что между ними в большинстве случаев имеются приблизительно линейные зависимости. Это позволяет характеризовать переменную звезду постоянными градиентами

$$\nabla_U = \frac{dU}{dB} \quad \text{и} \quad \nabla_V = \frac{dV}{dB}.$$

Оказывается, на плоскости (∇_U, ∇_V) , назы-

ваемой диаграммой градиентов, переменные звезды образуют последовательности, определяющиеся характером физических процессов, вызывающих изменения блеска [1].

В настоящей работе для цефеид различных типов анализируются фотоэлектрические наблюдения в системе U, B, V , содержащиеся в работах [2–10]. Всего изучено 116 звезд типа RR Lyr, 18 — типа CW и 88 классических цефеид Cδ. Для всех звезд на плоскостях (U, B) и (B, V) получены линейные зависимости с небольшим рассеянием точек (рис. 1–3). По ним были получены величины ∇_V и ∇_U , приведенные в 3 и 4 колонках табл. 1. Наибольшие среднеквадратические ошибки определений градиентов для цефеид разных типов имеют следующие значения:

Тип	$ \epsilon_V $	$ \epsilon_U $
RR	0.01	0.01
Cδ	0.02	0.04
CW	0.08	0.10

На рис. 4 приведена диаграмма градиентов для цефеид, полученная по этим данным. Видно, что они располагаются в полосе, вытянутой вдоль оси ∇_U . Величина ∇_U изменяется от 0.84 до 1.56, в то время как ∇_V занимает более узкий интервал значений — от 0.85 до 0.59. Конечно, не исключена возможность существования звезд, у которых значения градиентов выходят за полученные пределы. Если связь между градиентами аппроксимировать линейной зависимостью, тогда можно написать:

$$\bar{\nabla}_U = 3.39 - 3.16 \bar{\nabla}_V \quad (1)$$

Отметим, что на диаграмме градиентов цефеиды, входящие в состав шаровых и рассеянных звездных скоплений, занимают то же место, что и цефеиды галактического поля.

Наиболее интересно, что на диаграмме градиентов цефеиды разделяются по типам. Звезды типа RR Lyr, как правило, занимают область с $\nabla_U < 1.05$ и имеют по сравнению с другими цефеидами большие значения ∇_V . Переменные CW преимущественно находятся в узкой полосе $1.05 \leq \nabla_U \leq 1.17$. Для классических цефеид характерны относительно большие значения $\nabla_U > 1.15$ при меньших величинах ∇_V .

Таблица 1

1		2	3	4	5	6	7	8
Звезда		$\lg P$	∇_v	∇_u	$\frac{\alpha_u}{\delta} \cdot 10^{-4}$	$\frac{\alpha_u}{\alpha}$	$\frac{\delta_u}{\alpha} \cdot 10^4$	$\frac{\delta}{\delta_u}$
SW	And	-0.36	0.73	1.02	1.65	1.62	0.823	1.19
XX	And	-0.14	.77	0.92	1.52	2.40	1.22	1.29
AT	And	-0.21	.79	1.00	1.06	2.76	2.16	1.21
WY	Ant	-0.24	.72	0.93	1.92	1.76	0.718	1.27
SW	Aqr	-0.34	.79	0.93	1.26	3.28	2.02	1.29
SZ	Aqr	-0.27	.78	1.00	1.19	2.32	1.61	1.21
BS	Aqr	-0.70	.77	0.97	1.39	2.19	1.28	1.24
CY	Aqr	-1.22	.80	0.84	1.40	5.76	2.91	1.42
AA	Aql	-0.44	.76	1.05	1.29	1.75	1.16	1.16
V341	Aql	-0.24	.76	0.98	1.47	1.99	1.10	1.22
X	Ari	-0.19	.76	0.95	1.54	2.08	1.08	1.26
RV	Ari	-1.05	.76	1.00	1.41	1.92	1.12	1.21
TZ	Aur	-0.41	.76	1.05	1.29	1.75	1.16	1.16
RS	Boo	-0.42	.74	1.04	1.52	1.63	0.910	1.18
RU	Boo	-0.31	.77	0.98	1.36	2.15	1.29	1.23
ST	Boo	-0.21	.77	0.92	1.52	2.40	1.22	1.29
SV	Boo	-0.24	.75	0.92	1.71	2.02	0.925	1.28
SW	Boo	-0.29	.78	0.94	1.36	2.64	1.53	1.27
SZ	Boo	-0.28	.77	0.93	1.49	2.36	1.23	1.28
TV	Boo	-0.51	.81	0.87	1.17	13.79	8.50	1.38
TW	Boo	-0.28	.78	0.94	1.36	2.64	1.53	1.27
YZ	Boo	-1.00	.72	0.96	1.86	1.70	0.734	1.24
RW	Cnc	-0.26	.73	0.97	1.76	1.73	0.795	1.24
SS	Cnc	-0.43	.74	1.07	1.45	1.56	0.931	1.15
TT	Cnc	-0.25	.79	0.91	1.32	3.43	1.98	1.32
VZ	Cnc	-0.74	.76	0.98	1.47	1.98	1.10	1.22
W	CVn	-0.26	.74	0.97	1.68	1.81	0.867	1.24
RR	CVn	-0.25	.74	0.94	1.75	1.88	0.850	1.27
RU	CVn	-0.24	.78	0.92	1.41	2.74	1.50	1.30
RV	Cap	-0.35	.81	0.97	0.860	10.07	9.44	1.25
YZ	Cap	-0.57	.80	0.87	1.30	5.39	3.01	1.37
RZ	Cap	-0.51	.75	0.91	1.73	2.05	0.919	1.30
RR	Cet	-0.26	.78	0.91	1.44	2.80	1.49	1.31
S	Com	-0.23	.81	0.96	0.880	10.39	9.34	1.26
U	Com	-0.54	.80	1.00	0.920	3.79	3.42	1.21
RT	Com	-0.25	.80	0.94	1.10	4.53	3.22	1.28
RV	CrB	-0.48	.80	0.86	1.34	5.52	2.97	1.39
X	Crt	-0.14	.78	0.92	1.41	2.74	1.50	1.30
UY	Cyg	-0.25	.77	0.94	1.47	2.32	1.25	1.27
XX	Cyg	-0.85	.74	1.02	1.56	1.68	0.901	1.19
XZ	Cyg	-0.33	.78	0.95	1.33	2.58	1.54	1.26
DM	Cyg	-0.88	.72	0.96	1.86	1.70	0.734	1.24

	1	2	3	4	5	6	7	8
DX Del	-0.33	.70	1.03	1.86	1.49	0.681	1.19	
RW Dra	-0.36	.75	0.95	1.64	1.95	0.946	1.26	
SU Dra	-0.18	.82	0.91	0.880	- 9.85	-8.36	1.33	
SW Dra	-0.24	.75	0.97	1.59	1.88	0.961	1.24	
XZ Dra	-0.32	.76	1.00	1.42	1.92	1.11	1.21	
RX Eri	-0.23	.78	0.93	1.38	2.69	1.52	1.28	
SV Eri	-0.08	.83	0.87	0.850	- 2.98	-2.49	1.41	
SS For	-0.19	.78	0.97	1.27	2.48	1.57	1.24	
RR Gem	-0.40	.70	1.06	1.79	1.45	0.691	1.17	
SZ Gem	-0.30	.81	0.95	0.920	10.80	9.23	1.27	
SW Her	-0.31	.79	0.93	1.26	3.28	2.02	1.29	
TW Her	-0.40	.75	1.02	1.47	1.75	0.998	1.19	
VX Her	-0.34	.73	0.99	1.72	1.69	0.808	1.22	
VZ Her	-0.36	.80	0.99	0.950	3.92	3.38	1.23	
AG Her	-0.19	.80	0.94	1.10	4.53	3.22	1.28	
AR Her	-0.33	.79	0.92	1.29	3.35	2.00	1.30	
DY Her	-0.82	.71	1.00	1.85	1.58	0.706	1.21	
SV Hya	-0.32	.77	0.97	1.39	2.19	1.28	1.24	
SZ Hya	-0.27	.79	0.99	1.09	2.83	2.14	1.22	
VX Hya	-0.66	.74	0.96	1.70	1.82	0.862	1.25	
WZ Hya	-0.27	.79	0.94	1.24	3.21	2.04	1.28	
DH Hya	-0.31	.82	0.97	0.690	-7.67	-8.93	1.25	
DE Lac	-0.60	.72	1.04	1.69	1.55	0.772	1.18	
RR Leo	-0.34	.79	0.98	1.12	2.92	2.12	1.23	
RV Leo	-0.28	.83	0.96	0.570	-2.00	-2.77	1.27	
RX Leo	-0.19	.75	0.90	1.76	2.08	0.910	1.31	
SS Leo	-0.20	.79	0.95	1.20	3.13	2.06	1.27	
TV Leo	-0.40	.78	0.92	1.41	2.74	1.50	1.30	
V LMi	-0.27	.72	0.94	1.91	1.74	0.723	1.26	
X LMi	-0.17	.78	0.95	1.33	2.58	1.54	1.26	
U Lep	-0.24	.80	0.97	1.01	4.16	3.32	1.25	
EH Lib	-1.05	.77	0.97	1.39	2.19	1.28	1.24	
RR Lyr	-0.24	.73	0.91	1.89	1.86	0.762	1.29	
RZ Lyr	-0.29	.80	0.94	1.10	4.53	3.22	1.28	
K Lyr	-0.36	.73	0.99	1.72	1.69	0.807	1.22	
ST Oph	-0.35	.77	0.97	1.39	2.19	1.28	1.24	
V445 Oph	-0.40	.72	1.05	1.67	1.53	0.777	1.18	
V567 Oph	-0.89	.72	0.92	1.95	1.79	0.714	1.28	
VV Peg	-0.31	.81	0.94	0.950	11.22	9.16	1.28	
AV Peg	-0.41	.73	1.01	1.67	1.64	0.816	1.21	
BH Peg	-0.19	.76	1.00	1.42	1.91	1.12	1.21	
CG Peg	-0.32	.74	0.98	1.66	1.78	0.875	1.23	
DH Peg	-0.59	.81	0.91	1.05	12.33	8.88	1.32	
DY Peg	-1.16	.77	0.91	1.54	2.44	1.22	1.30	

1	2	3	4	5	6	7	8	
TU	Per	-0.22	0.71	0.99	1.86	1.59	0.701	1.22
AR	Per	-0.37	.72	1.05	1.67	1.53	0.777	1.18
RU	Psc	-0.41	.77	0.91	1.54	2.44	1.22	1.30
XX	Pup	-0.28	.79	0.95	1.20	3.13	2.06	1.27
BB	Pup	-0.32	.79	0.96	1.18	3.06	2.08	1.26
V440	Sgr	-0.32	.77	1.01	1.28	2.03	1.32	1.20
RU	Scl	-0.31	.79	0.99	1.09	2.83	2.14	1.22
VY	Ser	-0.15	.76	0.95	1.54	2.08	1.07	1.26
AN	Ser	-0.28	.74	1.01	1.59	1.70	0.893	1.20
AP	Ser	-0.60	.75	0.97	1.59	1.87	0.961	1.24
AT	Ser	-0.12	.79	0.96	1.18	3.06	2.08	1.26
AV	Ser	-0.31	.79	1.00	1.06	2.76	2.16	1.21
T	Sex	-0.50	.80	0.87	1.30	5.39	3.01	1.38
SS	Tau	-0.43	.77	1.06	1.15	1.82	1.37	1.15
U	Tri	-0.35	.76	1.04	1.32	1.78	1.15	1.17
RV	UMa	-0.31	.76	0.97	1.50	2.02	1.09	1.24
SX	UMa	-0.51	.81	0.86	1.21	14.21	8.38	1.40
TU	UMa	-0.25	.79	0.94	1.24	3.21	2.04	1.28
ST	Vir	-0.39	.78	1.00	1.19	2.32	1.61	1.21
UU	Vir	-0.32	.77	0.97	1.39	2.19	1.28	1.24
XX	Vir	+0.13	.75	0.95	1.64	1.95	0.946	1.26
AS	Vir	-0.26	.78	0.95	1.33	2.64	1.54	1.26
AT	Vir	-0.28	.80	0.95	1.07	4.40	3.25	1.27
AU	Vir	-0.47	.78	0.88	1.52	2.95	1.45	1.34
BB	Vir	-0.33	.83	0.99	0.430	-1.50	-2.87	1.23
M3								
	v37	-0.48	.85	0.87	0.450	-0.600	-0.920	1.44
	v65	-0.24	.79	0.85	1.49	3.87	1.87	1.40
	v119	-0.28	.80	0.91	1.19	4.90	3.33	1.32
M92								
	v3	-0.19	.73	0.91	1.90	1.87	0.762	1.29
	v8	-0.17	.82	0.95	0.750	-8.37	-8.75	1.28
CW								
VZ	Aql	+0.23	.68	1.16	1.74	1.29	0.663	1.11
TW	Cap	1.46	.74	1.10	1.38	1.48	0.951	1.13
TU	Cas	0.32	.67	1.14	1.84	1.30	0.627	1.12
SU	Cyg*	0.58	.74	1.07	1.45	1.56	0.934	1.15
UY	Eri	0.34	.74	1.14	1.29	1.39	0.977	1.11
AP	Her	1.02	.71	1.15	1.54	1.32	0.755	1.18

* См. текст

1	2	3	4	5	6	7	8
BL Her	0.11	0.74	1.08	1.43	1.53	0.939	1.14
CC Lyr	1.38	.75	1.04	1.42	1.68	1.02	1.17
V465 Oph	0.54	.75	1.12	1.23	1.44	1.08	1.11
V478 Oph	1.21	.77	1.14	0.950	1.50	1.46	1.09
SV Per*	1.05	.78	1.11	0.901	1.74	1.76	1.11
AW Per	0.81	.70	1.09	1.74	1.40	0.794	1.15
ST Tau	0.60	.67	1.19	1.75	1.24	0.642	1.10
SZ Tau	0.49	.70	1.13	1.66	1.34	0.722	1.16
W Vir	1.24	.76	1.25	0.792	1.06	1.33	1.01
AL Vir	1.01	.68	1.22	1.63	1.21	0.683	1.08

M5

v42	1.41	.75	1.17	1.10	1.32	1.11	1.07
v84	1.43	.77	1.04	1.20	1.90	1.35	1.17

C

U Aql	0.84	.64	1.20	1.92	1.22	0.580	1.10
TT Aql	1.14	.71	1.42	0.973	0.834	0.898	0.950
FF Aql	0.62	.66	1.26	1.69	1.14	0.639	1.06
FM Aql	0.78	.70	1.40	1.12	0.893	0.831	0.972
KL Aql	0.78	.64	1.35	1.66	1.06	0.622	1.02
V496 Aql	0.83	.66	1.32	1.58	1.07	0.657	1.06
V572 Aql	0.58	.67	1.27	1.61	1.14	0.687	1.05
η Aql	0.86	.64	1.33	1.70	1.08	0.616	1.06
Y Aur	0.58	.69	1.21	1.58	1.21	0.714	1.07
RT Aur	0.57	.67	1.17	1.79	1.27	0.636	1.10
RX Aur	1.06	.65	1.31	1.67	1.10	0.632	1.04
SY Aur	1.00	.64	1.31	1.73	1.11	0.611	1.08
AN Aur	1.01	.70	1.32	1.28	1.02	0.798	1.01
BK Aur	0.90	.66	1.29	1.64	1.12	0.647	1.11
RW Com	1.21	.68	1.23	1.61	1.19	0.865	1.07
RY CMa	0.67	.68	1.33	1.43	1.05	0.720	1.02
RZ CMa	0.62	.72	1.20	1.35	1.24	0.855	1.07
TW CMa	0.84	.62	1.40	1.71	1.03	0.596	1.01
GZ Car	0.62	.68	1.30	1.48	1.09	0.711	1.06
RS Cas	0.80	.64	1.34	1.68	1.07	0.620	1.06
RY Cas	1.08	.66	1.27	1.67	1.13	0.642	1.12
RW Cas	1.17	.60	1.46	1.73	0.992	0.577	1.00
SU Cas	0.28	.72	1.27	1.20	1.10	0.890	1.03
SW Cas	0.73	.68	1.30	1.48	1.09	0.711	1.06

* CM. ТЕКСТ

	1	2	3	4	5	6	7	8
SY	Cas	0.61	.67	1.20	1.73	1.23	0.644	1.09
SZ	Cas*	1.13	.65	1.50	1.34	0.881	0.865	0.960
VV	Cas	0.79	.66	1.23	1.74	1.18	0.629	1.08
VW	Cas	0.78	.62	1.27	1.91	1.15	0.562	1.07
XY	Cas	0.65	.65	1.30	1.69	1.10	0.629	1.05
AP	Cas	0.83	.62	1.50	1.55	0.930	0.620	0.970
BY	Cas	0.50	.67	1.24	1.66	1.18	0.657	1.07
CF	Cas	0.69	.62	1.33	1.82	1.10	0.577	1.04
DD	Cas	0.99	.64	1.39	1.60	1.02	0.635	1.00
DL	Cas	0.90	.66	1.32	1.58	1.07	0.657	1.03
FM	Cas	0.76	.63	1.31	1.79	1.12	0.590	1.05
IX	Cas	0.96	.60	1.27	2.01	1.15	0.535	1.08
V	Cen	0.74	.67	1.31	1.54	1.08	0.680	1.03
XX	Cen	1.04	.68	1.38	1.33	0.979	0.740	0.991
V339	Cen	0.98	.61	1.47	1.66	0.968	0.604	0.982
V381	Cen*	0.70	.66	1.34	1.56	1.05	0.683	1.03
CR	Cep	0.79	.67	1.40	1.37	0.967	0.711	0.990
δ	Cep	0.73	.65	1.26	1.76	1.14	0.616	1.07
X	Cyg	1.21	.66	1.43	1.39	0.940	0.690	0.985
SZ	Cyg	1.18	.62	1.43	1.66	1.00	0.516	1.00
TX	Cyg	1.17	.67	1.36	1.45	1.02	0.699	1.01
VY	Cyg	0.89	.64	1.32	1.72	1.10	0.613	1.04
VZ	Cyg	0.69	.66	1.27	1.67	1.13	0.642	1.06
DT	Cyg	0.40	.68	1.18	1.70	1.25	0.669	1.10
GH	Cyg	0.89	.69	1.27	1.46	1.12	0.736	1.04
MW	Cyg	0.78	.65	1.32	1.65	1.09	0.634	1.04
V386	Cyg	0.72	.68	1.26	1.56	1.16	0.706	1.04
V402	Cyg	0.64	.69	1.31	1.38	1.06	0.751	1.02
V532	Cyg	0.52	.66	1.19	1.81	1.23	0.620	1.10
V538	Cyg	0.78	.64	1.40	1.59	1.01	0.636	1.00
TX	Del	0.79	.61	1.41	1.75	1.02	0.580	1.01
W	Gem	0.90	.64	1.24	1.85	1.18	0.590	1.08
RZ	Gem	0.70	.68	1.14	1.78	1.30	0.665	1.12
ξ	Gem	1.01	.64	1.46	1.49	0.951	0.653	0.975
V	Lac	0.70	.68	1.17	1.72	1.28	0.665	1.10
X	Lac	0.73	.67	1.26	1.62	1.15	0.665	1.06
Y	Lac	0.64	.69	1.18	1.63	1.25	0.794	1.09
Z	Lac	1.04	.64	1.40	1.59	1.01	0.636	1.00
RR	Lac	0.81	.69	1.31	1.38	1.06	0.751	1.02
BG	Lac	0.72	.69	1.37	1.27	0.969	0.775	0.990
SV	Mon	1.18	.70	1.42	1.08	0.871	0.842	0.960
WW	Mon	0.67	.64	1.52	1.38	0.880	0.667	0.950

* См. текст

1		2	3	4	5	6	7	8
S	No r	0.99	.63	1.41	1.63	1.01	0.616	1.00
Y	Oph	1.23	.71	1.42	0.980	0.843	0.898	0.951
BF	Oph	0.61	.68	1.30	1.48	1.09	0.711	1.03
AU	Peg *	0.38	.63	1.29	1.82	1.13	0.586	1.06
SX	Per	0.63	.70	1.27	1.38	1.10	0.780	1.04
UX	Per	0.66	.71	1.18	1.48	1.26	0.790	1.08
VX	Per	1.04	.65	1.33	1.64	1.08	0.636	1.03
AS	Per	0.70	.67	1.26	1.62	1.15	0.665	1.06
X	Pup	0.42	.66	1.53	1.22	0.830	0.721	0.940
S	S ge	0.92	.66	1.28	1.66	1.12	0.644	1.05
U	S gr	0.83	.66	1.36	1.52	1.03	0.669	1.02
W	S gr	0.88	.64	1.32	1.72	1.10	0.614	1.04
X	S gr	0.84	.67	1.38	1.41	1.00	0.794	1.00
Y	S gr	0.76	.65	1.28	1.72	1.12	0.621	1.06
AP	Sgr	0.70	.65	1.32	1.65	1.08	0.629	1.04
V350	Sgr	0.71	.64	1.41	1.57	1.00	0.639	1.00
RV	Sco	0.78	.68	1.34	1.41	1.03	0.726	1.01
SS	Sct	0.56	.67	1.27	1.61	1.14	0.667	1.05
S	Tra	0.80	.66	1.34	1.56	1.05	0.665	1.02
U	Vul	0.90	.69	1.37	1.26	0.982	0.519	0.990
X	Vul	0.80	.68	1.37	1.35	0.989	0.731	1.00
SV	Vul	1.65	.59	1.56	1.62	0.921	0.583	0.965

* См. текст

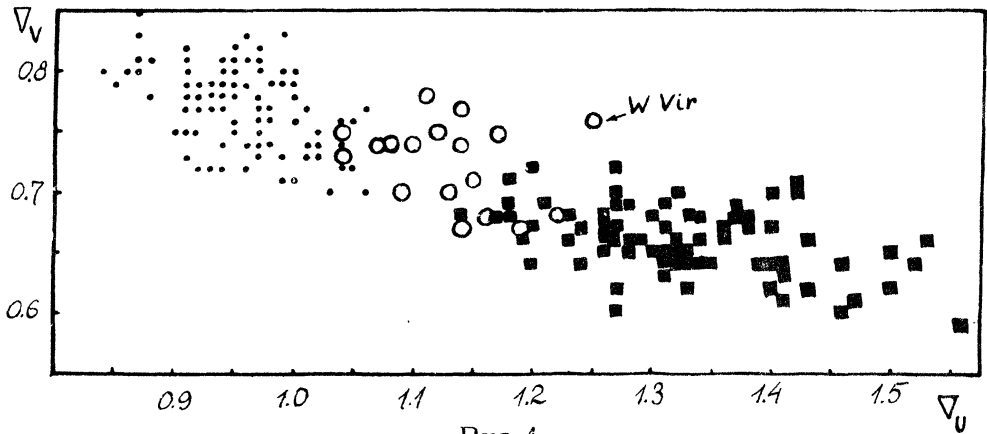


Рис.4

Для средних значений градиентов имеем :

Тип	$\bar{V}_U$	$\bar{V}_V$
RR	0.96	0.77
CW	1.13	0.71
Cδ	1.31	0.66

Хотя области, занимаемые звездами различных типов, частично перекрываются, можно проводить идентификацию типа цефеиды по ее положению на диаграмме градиентов. Этот способ наиболее удобен тогда, когда представляет интерес только тип цефеиды, поскольку он позволяет избежать громоздкой работы по определению периода и формы кривой блеска. В данном случае достаточно иметь наблюдения в системе U, B, V, позволяющие определить величины V_U и V_V . Если же переменная на диаграмме градиентов находится далеко от границ раздела между типами, тогда достаточно иметь только V_U , т. е. можно ограничиться наблюдениями U и B величин.

Именно по значениям градиентов звезды SU Cyg и SV Per, которые в ОКПЗ отнесены к типу Cδ, включены нами в список звезд CW. Переменные SZ Cas, AU Peg и V381 Cen причислены к классическим цефеидам, вместо CW. Звезды BK Aur, TW CMa, U и X Vul, в ОКПЗ классифицированные только как "C", по значениям градиентов принадлежат к типу Cδ.

Было установлено, что для переменных типа RR Lyr V_U зависит от разности спектральных классов, определенных по линиям водорода и металлов — V_s (рис. 5). Величины V_s взяты из данных Престона [11].

Поскольку на диаграмме градиентов цефеиды разделились по типам, следует ожидать зависимости градиентов от периода P. Для исследованных звезд $\lg P$ приведен в колонке 2 табл. 1. Зависимость (V_U , $\lg P$) приведена на рис. 6. Видно, что величина V_U в общем увеличивается с возрастанием периода. Однако в четко выделяющейся группе переменных RR_{ab} имеется обратная зависимость — с увеличением периода значение V_U убывает. Связь (V_V , $\lg P$) не представляет интереса, поскольку в ней, очевидно, должна быть зависимость, обратная рассмотренной — с увеличением $\lg P$ надо ожидать в целом уменьшения V_V .

Кроме того отметим, что

- на диаграмме градиентов звезды RR_{ab}, RR_c и RR_d, так же как классические цефеиды типов A, B и C по Эггену [12], не разделяются;
- звезды с нестабильными периодами не выделяются на диаграмме градиентов;
- не обнаружено зависимости между V_U или V_V и амплитудами изменения блеска;
- W Vir на диаграмме градиентов находится в стороне от остальных звезд CW. Для нее $V_U = 1.24$, $V_V = 0.76$.

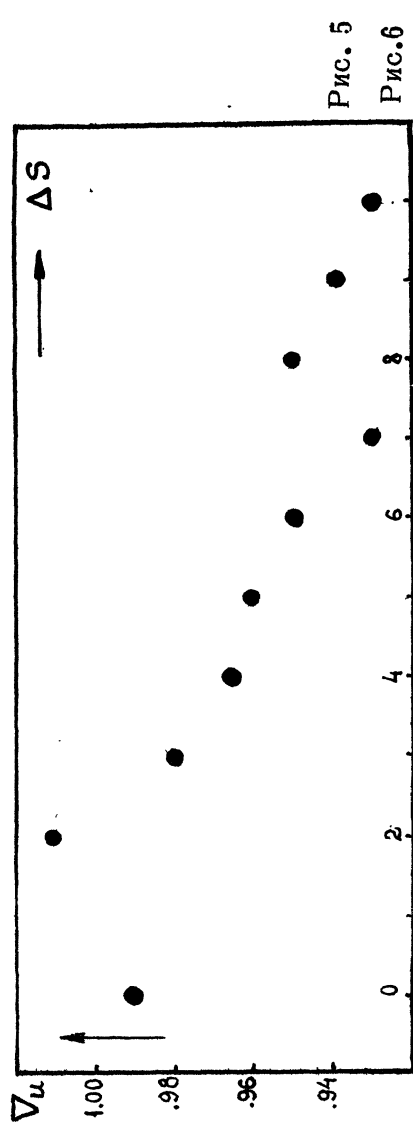
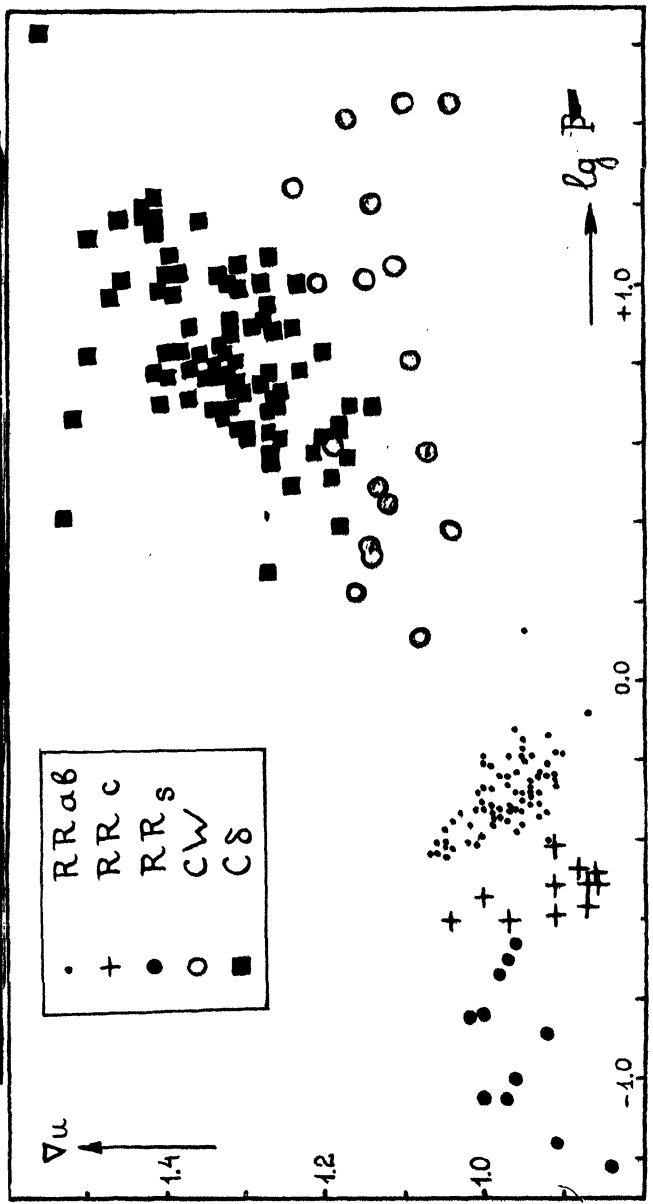


Рис. 5

Рис. 6



2. Как уже отмечалось, градиенты переменной звезды связаны с процессами, вызывающими изменения блеска. Поэтому представляется интерес рассмотреть, чем определяется положение цефеид на диаграмме градиентов.

Будем считать, что переменность блеска звезды вызывается изменениями размеров и температуры фотосферы. Принимая, что она излучает как абсолютно черное тело (АЧТ) с температурой T , для светимости звезды в Q -м диапазоне можно написать:

$$L_Q \sim R^2 I_Q(T), \quad (2)$$

где $Q = U, B, V$; R — радиус звезды; $I_Q(T)$ — интенсивность излучения в изофотной длине волны λ_Q системы U, B, V . Изофотные длины волн принимались равными: $\lambda_U = 3680 \text{ \AA}$, $\lambda_B = 4450 \text{ \AA}$, $\lambda_V = 5640 \text{ \AA}$ [13]. С достаточной степенью точности излучение АЧТ можно аппроксимировать формулой Вина. В этом случае при изменении радиуса и температуры от R_1, T_1 до R_2, T_2 находим:

$$\Delta m_Q = -1.086 \left(2 \ln \frac{R_1}{R_2} - C_Q \delta \right), \quad (3)$$

где $\delta = \frac{T_1 - T_2}{T_2 T_1}$, C_Q — постоянная. Для принятых изофотных

длин волн $C_U = 3.9095 \cdot 10^4$, $C_B = 3.2330 \cdot 10^4$, $C_V = 2.6350 \cdot 10^4$. Если $R_1 = R_2$, из формул (3) на диаграмме градиентов получаем точку с координатами:

$$V_U = \frac{C_U}{C_B} = 1.21, \quad V_V = \frac{C_V}{C_B} = 0.815,$$

соответствующую изменениям температуры АЧТ. При изотермическом расширении или сжатии АЧТ, очевидно, получаем $V_U = V_V = 1$.

В общем случае формулы (3) для градиентов дают:

$$V_U = \frac{\alpha - C_U \delta}{\alpha - C_B \delta}, \quad V_V = \frac{\alpha - C_V \delta}{\alpha - C_B \delta}, \quad (4)$$

где $\alpha = 2 \ln \frac{R_1}{R_2} \sim \frac{\Delta R}{R}$ при малых изменениях радиуса. Отсюда

видно, что при изменениях радиуса и температуры АЧТ гради-

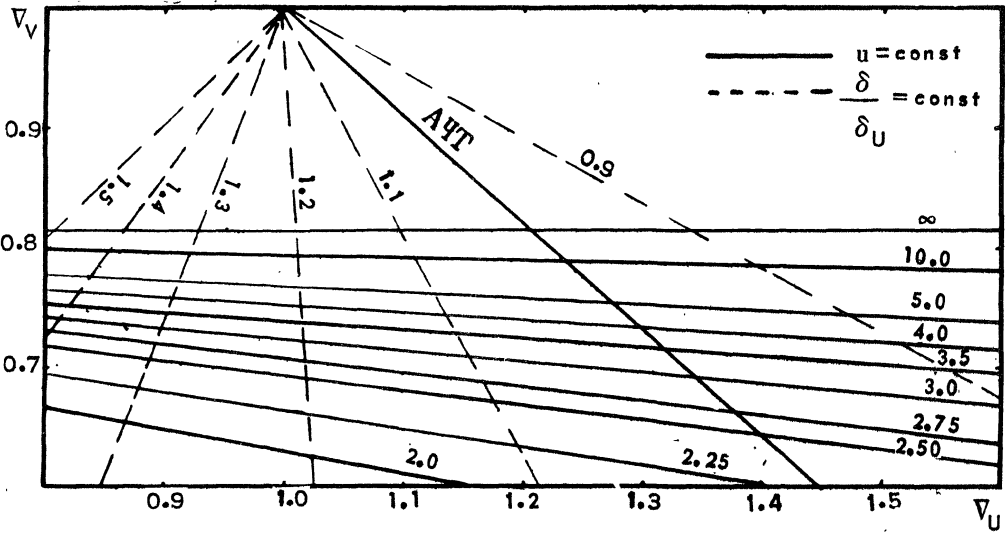


Рис. 7

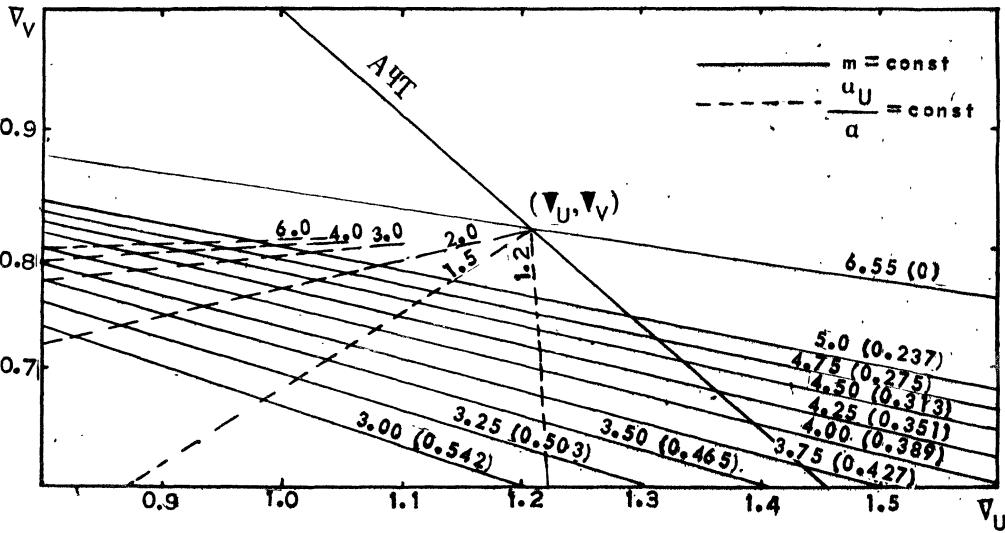


Рис. 8

енты связаны линейно:

$$\nabla_U = \frac{\nabla_U - \nabla_V}{1 - \nabla_V} - \frac{\nabla_U - 1}{1 - \nabla_V} \nabla_V, \quad (5)$$

или после подстановки численных значений

$$\nabla_U = 2.135 - 1.135 \nabla_V.$$

Эта прямая проходит через точки (1.1) и (∇_U, ∇_V) и на рис. 7–8 обозначена как АЧТ. Положение точки на прямой (5) определяется параметром

$$\frac{\alpha}{\delta} = C_B \frac{\nabla_V - \nabla_V}{1 - \nabla_V}. \quad (6)$$

Таким образом, у переменных звезд, группирующихся вблизи этой прямой, из уравнения (6) можно определить отношение изменения радиуса к изменению температуры.

Однако из сравнения рис. 4 и 7 или зависимостей (1) и (5) видно, что цефеиды не располагаются вдоль линии АЧТ. Отсюда заключаем, что рассмотренная модель не описывает изменения блеска цефеид.

Модель В.

Оставаясь в рамках гипотезы АЧТ, можно предположить, что в рассматриваемом диапазоне длин волн излучение фотосферы нельзя представить одной эффективной температурой. Действительно, звезды типов СW и Сδ вблизи максимума блеска и звезды типа RR Lyr во всех фазах изменения блеска имеют спектральные классы А или ранние F, для которых характерны наибольшие величины балмеровских скачков. В результате, излучение АЧТ, хорошо представляющее излучение цефеид в В- и V-диапазонах, может приводить к заметным отклонениям в U-диапазоне. Это обстоятельство можно учесть, положив $\delta_U \neq \delta$, где теперь δ относится только к полосам В и V. При этом первая из формул (4) принимает вид:

$$\nabla_U = \frac{\alpha - C_U \delta_U}{\alpha - C_B \delta}, \quad (7)$$

вторая остается неизменной. Подставив в формулу (7) выражение для δ из (6), находим:

$$\nabla_U = \frac{1-u}{\nabla_V-1} (\nabla_V - \nabla_V) , \quad (8)$$

где $u = \frac{\delta_U}{\alpha} C_U$ — свободный параметр. Таким образом, получаем семейство прямых, проходящих через точку $(0, \nabla_V)$ с угловыми коэффициентами $K_U = \frac{1-u}{\nabla_V-1}$. При $u \approx 2.00 + 10.00$ они охватывают область цефеид (рис. 7). В этой модели по ∇_U и ∇_V можно вычислить следующие отношения переменных параметров:

$$\frac{\delta_U}{\alpha} = \frac{u}{C_U} = \frac{1}{C_U} \left(1 + \nabla_U \frac{1 - \nabla_V}{\nabla_V - \nabla_V} \right) \quad (9)$$

и

$$\frac{\delta}{\delta_U} = \frac{\nabla_U}{u} \cdot \frac{1 - \nabla_V}{\nabla_V - \nabla_V} = \frac{\nabla_U (1 - \nabla_V)}{\nabla_U - \nabla_V - \nabla_V (\nabla_U - 1)} . \quad (10)$$

Для исследованных звезд эти величины приведены в 7 и 8 колонках таблицы 1.

Из формулы (10) находим, что линии равных $\frac{\delta}{\delta_U}$ образуют се-

мейство прямых, проходящих через точку (1.1) (см. рис. 7). Величина этого отношения близка к единице у классических цефеид и возрастает с переходом к звездам типа RR Lyr. Очевидно, на линии

АЧТ отношение $\frac{\delta}{\delta_U} = 1.0$. Как и можно было ожидать, $\frac{\delta}{\delta_U}$ боль-

ше всего отличается от единицы у звезд ранних спектральных классов, обладающих наибольшими величинами бальмеровских скачков. Наоборот, у долгопериодических цефеид возможны случаи, когда изменение температуры в ультрафиолете (U) превосходит изменения в фотографической и визуальной областях спектра (B, V).

Рассмотрим величину $u \sim \frac{\delta_U}{\alpha}$. Для классических цефеид характерны сравнительно небольшие значения u , приблизительно

2.25 + 3.5. С уменьшением ∇_U величина u возрастает (см. табл. 1) и достигает наибольших значений у переменных типа RR Lyr. Поскольку одновременно ∇_V приближается к ∇_V , можно заключить, что с переходом к звездам типа RR Lyr относительная амплитуда изменения радиуса уменьшается. Если $\nabla_U = \nabla_V$, то параметр $u = \infty$, т. е. $\alpha = 0$. В этом случае колебания блеска вызываются только изменениями температуры, так как $R_1 = R_2$ и из формулы (10) находим:

$$\frac{\delta}{\delta_U} = \frac{\nabla_U}{\nabla_V}.$$

Среди рассмотренных звезд есть семь переменных типа RR Lyr, у которых $\nabla_U > \nabla_V$, и они располагаются над линией $u = \infty$. При этом $\frac{\delta_U}{\alpha} < 0$ и $\frac{\delta}{\alpha} < 0$. В рассматриваемой модели это означает, что у них, в отличие от обычных цефеид, при увеличении температуры (возрастание блеска) происходит также увеличение радиуса звезды.

Модель А.

В рамках гипотезы АЧТ наряду с предыдущей моделью можно рассматривать и другую возможность. Коэффициент поглощения вещества атмосферы звезды сильно зависит от длины волны и скачкообразно возрастает на бальмеровском пределе, находящемся вблизи максимума кривой пропускания полосы U. Следовательно, радиус звезды в ультрафиолете должен быть больше, чем в областях В и V. При этом можно ожидать, что его амплитуда изменения отличается от амплитуды изменения радиуса в фотографической и визуальной областях. Тогда $\alpha_U \neq \alpha$, где α — изменения радиуса, одинаковые для В и V диапазонов. В этой модели принимается, что $\delta_U = \delta_V = \delta_W = \delta$. Очевидно, что

$$\nabla_U = \frac{\alpha_U - C_U \delta}{\alpha - C_V \delta}$$

с помощью (6) находим:

$$\nabla_U = \nabla_V \frac{m - 1}{\nabla_V - 1} (1 - \nabla_V), \quad (11)$$

где $m = \frac{\alpha_U}{C_U \delta}$ — свободный параметр. Отсюда видно, что градиенты образуют семейство прямых, проходящих через точку (0, 1). Как видно из рис. 3, при $K_m = \nabla_U \frac{m - 1}{\nabla_V - 1} \approx 3.00 \div 5.00$, что соответ-

вует $m \approx 0.54 \pm 0.23$, эти прямые охватывают полосу цефеид.

В данной модели для звезды по значениям градиентов получаем следующие величины, приведенные в 5 и 6 колонках табл. 1:

$$\frac{a_U}{\delta} = C_{Um} = C_U \left(1 - \frac{\nabla_U}{\nabla_U} \frac{1 - \nabla_V}{1 - \nabla_V} \right) \quad (12)$$

и

$$\frac{a_U}{a} = \nabla_{Um} \frac{1 - \nabla_V}{\nabla_V - \nabla_V} = \frac{\nabla_U (1 - \nabla_V) - \nabla_U (1 - \nabla_V)}{\nabla_V - \nabla_V} \quad (13)$$

Из табл. 1 видно, что величина $\frac{a_U}{\delta}$ в среднем немного уменьшается при переходе от классических цефеид к звездам типа RR Lyr. Как и в модели В, это, по-видимому, связано с уменьшением относительной амплитуды изменения радиуса звезды.

Рассмотрим величины $\frac{a_U}{\delta}$ и $\frac{a}{\delta}$, определяющиеся формулами

(13) и (6). Как и следовало ожидать, у большинства цефеид $\frac{a_U}{a} > 1$,

т. е. относительное изменение радиуса в диапазоне U больше, чем в

В и V диапазонах. Из формулы (13) находим, что отношения $\frac{a_U}{a}$

постоянны на прямых линиях, проходящих через точку (∇_U, ∇_V) , которые на рис. 8 изображены пунктиром. Отсюда видно, что для клас-

сических цефеид $\frac{a_U}{a}$ обычно не превышает 1.25 (см. также табл. 1).

При этом у них возможны случаи, когда $\frac{a_U}{a} < 1$. С переходом к

короткопериодическим цефеидам $\frac{a_U}{a}$ быстро возрастает, что связано с приближением ∇_V к ∇_V . Одновременно $\frac{a}{\delta}$ приближает-

ся к нулю. При $\nabla_V = \nabla_V$ нет изменений радиуса в областях В и V,

поэтому $\frac{a}{\delta} = 0$ и $\frac{a_U}{a} = \infty$. Для тех звезд, у которых $\nabla_V > \nabla_V$,

получаем $\frac{a_U}{a} < 0$ и $\frac{a}{\delta} < 0$. Из второго неравенства, как и

раньше, следует, что у этих звезд с увеличением радиуса должно происходить увеличение температуры. А из условия $\frac{a_U}{a} < 0$ получаем, что при увеличении радиуса звезды в В и V-диапазонах происходит его уменьшение в U-диапазоне, т. е. они изменяются в противофазе.

Сравнение моделей.

Обе рассмотренные модели дают возможный характер изменений параметров звезды в процессе колебаний блеска. Поэтому из полученных данных трудно сделать окончательный выбор между ними. Все же подчеркнем, что линии равных m лучше следуют положению цефеид на диаграмме градиентов (см. рис. 4 и 8). Это проявляется

в том, что параметр $\frac{a_U}{\delta} \sim m$ мало изменяется вдоль всей полосы цефеид, в то время как величина $u \sim \frac{\delta_U}{a}$ может принимать значения от 2.00 до ∞ , а также менять знак. Если, исходя из этого, отдавать предпочтение модели А, тогда получаем, что несовпадение "ультрафиолетового" радиуса с "видимым" играет в цефеидах более существенную роль, чем несовпадение соответствующих температур.

Конечно, в реальных звездах следует ожидать условий $a_U \neq a$ и $\delta_U \neq \delta$, проявляющихся одновременно. В рассматриваемом приближении АЧТ это дает систему прямых

$$\nabla_U = \frac{m \nabla_U - u \nabla_V}{\nabla_V - 1} - \frac{m \nabla_U - u}{\nabla_V - 1} \nabla_V, \quad (14)$$

зависящих от двух параметров m и u , введенных выше. При заданном m все они проходят через точку $(-m \nabla_U, \nabla_V)$. Однако здесь не будет проводиться анализ этого случая, поскольку он содержит еще больше различных возможных комбинаций между параметрами, из которых с помощью имеющихся данных нельзя будет сделать определенный выбор.

Уже из более простых моделей А и В следует, что нужно более детальное изучение динамических условий в атмосферах пульсирующих переменных. Для этой цели можно использовать имеющиеся расчеты моделей звездных атмосфер. Такой анализ градиентов блеска цефеид будет рассмотрен в другой работе.

3. Из предыдущего ясно, что градиенты являются важными характеристиками цефеид, позволяющими определить соотношения между физическими параметрами, ответственными за изменения блеска. Например, с их помощью удастся установить, что амплитуда колебаний возрастает с переходом во внешние слои звезды, и вычислить величину этого увеличения. Градиенты дают связь между амплитудами изменений радиуса и температуры. Кроме того, полученные данные позволяют качественно представить динамическую картину процессов во внешних слоях звезды в течение изменений блеска. Все это значительно расширяет объем результатов, которые можно получить на основании фотоэлектрических U, B, V-наблюдений.

Литература:

1. И. Г. Колесник, Ф. И. Лукацкая, ПЗ 17, 224, 1970 .
2. W. Fitch et al., Lun. and Planet. Lab. Comm. 5, pt. 2, 1966.
3. C. Sturch, ApJ 143, 744, 1966.
4. R. Mitchell et al., TTB 3, № 24, 1964.
5. K. Kwee, L. Brown, BAN Suppl. 2, № 3, 1967.
6. W. Wisniewski, H. Johnson, Lun. and Planet Lab. Comm. 7, pt. 2, 1968.
7. A. Michalowska-Smak, J. Smak, AA 15, 333, 1965.
8. P. Oosterhoff, BAN 14, 199, 1960.
9. H. Arp, AJ 62, 129, 1957.
10. C. Sturch, Kitt Peak Obs. Contr. № 223, 1967.
11. G. Preston, ApJ 130, 507, 1959.
12. O. Eggen, ApJ 113, 367, 1951.
13. Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Gr. VI, vol. I, page 346. Springer-Verlag, 1965.

Июль 1969