

О ПЕРЕМЕННОСТИ БЛЕСКА АР-ЗВЕЗД

I. ЭФФЕКТЫ ВАРИАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ $T_{\text{эфф}}$ И $g_{\text{эфф}}$

Л. И. Снежко

В рамках модели наклонного ротатора рассмотрены эффекты вариаций на поверхности звезды $T_{\text{эфф}}$ и $g_{\text{эфф}}$. Показано, что наблюдаемые значения амплитуд кривых блеска и кривых изменений линии достигаются уже при малых амплитудах вариаций $\Delta T_{\text{эфф}} \leq 700^\circ \text{K}$ и $\Delta \lg g_{\text{эфф}} \leq 0.5$. Основной вклад в фотометрическую переменность вносят вариации $T_{\text{эфф}}$, так что включение в рассмотрение вариаций $g_{\text{эфф}}$ не объясняет изменение с длиной волны узкополосных кривых блеска.

Effects of variations of T_{eff} and g_{eff} at the star's surface are considered within the framework of an oblique-rotator model. It is shown that the observed values for the amplitudes of the light curves and line variation curves can be reached even at small variation amplitudes of $\Delta T_{\text{eff}} \leq 700^\circ \text{K}$ and $\Delta \lg g_{\text{eff}} \leq 0.5$. The main contribution to the photometric variability is made by the variations of T_{eff} , so the inclusion of the variations of g_{eff} into consideration does not account for the behaviour of narrow-band light curves with wavelength.

Уже первый обширный фотометрический обзор [1] показал, что переменность блеска и цвета с малой амплитудой $\Delta m \leq 0^{\text{m}}1$ является характерной особенностью пекулярных и магнитных А-звезд [2, 3]. Период фотометрической переменности совпадает с периодом спектральных изменений и изменений магнитного поля в модели наклонного ротатора, принимаемым равным периоду вращения звезды. Выполненные в последние годы узкополосные наблюдения как в видимой области спектра, так и в ультрафиолетовой показали, что амплитуда переменности и вид кривой блеска сильно меняются с длиной волны даже в узких спектральных интервалах [4, 5]. При детальной спектрофотометрии у ряда Ар-звезд обнаруживаются периодические изменения водородных линий [6].

В рамках общепринятой в настоящее время модели наклонного ротатора наблюдаемая фотометрическая переменность объясняется вращением звезды с неоднородной поверхностью. Было предложено несколько объяснений фотометрической неоднородности поверхности Ар-звезд, связанных с наличием магнитного поля и «пятнистого» распределения элементов в атмосферах этих звезд. Наличие в звезде магнитного поля с энергией, составляющей несколько процентов от гравитационной, приводит к заметному отклонению фигуры звезды от сферической [7], что согласно теореме Цейшеля должно вызвать вариации $T_{\text{эфф}}$ на поверхности звезды. Кроме того, выход силовых трубок поля должен приводить к образованию горячих пятен на поверхности [8]. Эти эффекты были рассмотрены в [2, 9], где показано, что наблюдаемые амплитуды изменений блеска (но не цвета) легко достигаются при вариациях температуры по поверхности $\Delta T \leq 1000^\circ \text{K}$. В [10] показано, что привлечение и вариаций эффективного ускорения силы тяжести $g_{\text{эфф}}$, определяемых в основном конфигурацией магнитного поля, может объяснить наблюдаемую фотометрическую переменность $\alpha^2 \text{CVn}$ в широком спектральном интервале. Наблюдаемая «пятнистость» распределения кремния, элементов группы железа и редкоземельных элементов и относительно

большой вклад их в поглощение при $\lambda < 3000 \text{ \AA}$ использовались в [11—13] для объяснения неоднородности поверхности Ар-звезд: избыток поглощения приводит к перегреву внутренних и охлаждению внешних слоев атмосферы в «пятнах». Этот механизм привлекается для объяснения фотометрической переменности Ар-звезд как в ультрафиолетовой, так и в видимой областях спектра [5, 12—14]. Обусловленная «пятнистостью» переменность покровного эффекта в фотометрических полосах не может быть основной причиной переменности в видимой области спектра [2], хотя и должна влиять на вид кривых блеска [8].

Сложная картина наблюдаемой фотометрической переменности Ар-звезд определяется, по-видимому, совместным действием всех перечисленных выше механизмов, однако вклад каждого из них требует оценки. Относительная простота кривых блеска (одиночные и двойные волны) при все усложняющейся в детальных исследованиях картине «пятнистости» (до 8 пятен), обнаруживаемая короткопериодическая переменность в континууме и в водородных линиях у некоторых Ар-звезд [15, 16] заставляют думать, что «backwarming effect» при «пятнистости» распределения элементов не является единственной причиной переменности Ар-звезд, тем более, что вклад редкоземельных элементов в общее поглощение был завышен [10].

Для получения количественных оценок влияния вариаций по поверхности звезды $T_{\text{эфф}}$ и $g_{\text{эфф}}$ мы провели расчет линии H_γ и непрерывного спектра в ее окрестностях, используя модели атмосфер Михаласа [17]. Расчет проводился в рамках модели наклонного ротатора: ось вращения звезды составляет угол i с лучом зрения, магнитная ось составляет угол α с осью вращения. В рассматриваемой модели вариации физических условий относительно магнитной оси при $i \neq 0$ и $\alpha \neq 0$ вызывают изменения потока излучения с периодом, равным периоду вращения. Ранее выполненный расчет [9] показал, что эффект вариаций $T_{\text{эфф}}$ значительно сильнее эффекта несферичности, поэтому фигура звезды принималась сферической. Распределение $T_{\text{эфф}}$ и $g_{\text{эфф}}$ по поверхности звезды задавалось в виде:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{эфф}} &= T_0, \\ g_{\text{эфф}} &= g_0 \end{aligned} \right\} \text{ при } \mu_2 \leq \mu' \leq \mu_1, \text{ т. е. в зоне магнитного экватора,} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{эфф}} &= T_0 + \Delta T f_i(\mu'), \\ \lg g_{\text{эфф}} &= \lg g_0 + \Delta \lg g f_i(\mu') \end{aligned} \right\} \text{ при } \mu_1 < \mu'_1 \leq 1 \text{ и } -1 \leq \mu' < \mu_2, \quad (2)$$

т. е. в зоне магнитных полюсов.

Здесь $f_i = (|\mu'| - |\mu_i|) / (1 - |\mu_i|)$, $i=1, 2$, $\mu' = \cos \theta'$, где θ' — полярный угол в магнитной системе координат. Поток излучения дается интегралом по площади видимой полусферы звезды

$$H_\lambda = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 I_\lambda(\varphi, \mu) \mu d\mu, \quad (3)$$

$$I_\lambda = \int_0^\infty S_\lambda(\tau_\lambda) \exp(-\tau_\lambda) d\tau_\lambda. \quad (4)$$

Функция источника S_λ как для непрерывного спектра, так и в частотах линии H_γ вычислялась по методике, изложенной в [18]. Таблицы S_λ считались для сетки моделей Михаласа [17], необходимые при счете квадратур (4) и (3) значения находились интерполяцией по $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$. Уширение водородных линий считалось, согласно Гриму [19], по схеме, близкой к принятой в [17]. Выбор значений амплитуд вариаций $T_{\text{эфф}}$ и $g_{\text{эфф}}$ определялся следующими соображениями. Многолетние наблюдения Ар-звезд не показали какого-либо заметного отличия их общих характеристик от таковых нормальных А-звезд. Следовательно, вариации $T_{\text{эфф}}$ и $g_{\text{эфф}}$ не могут значительно превышать ошибки определения этих параметров из наблюдений. Отсюда мы приняли, что $|\Delta T| \leq 700^\circ \text{ K}$, $|\Delta \lg g| \leq 0.5$. Исходя из гладкости наблюдае-

мых кривых блеска и кривых изменений водородных линий у Ар-звезд, предполагаемые вариации $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$ не могут быть сосредоточены на поверхности Ар-звезд в малых областях. Эти соображения определили выбор значений ΔT_i , $\Delta \lg g_i$ и μ_i , описывающих вариации $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$ в рассматриваемых моделях. Все необходимые расчеты были проведены в ВЦ САО АН СССР.

В табл. 1 приведены параметры рассмотренных моделей. Модели с $\Delta \lg g = 0$ и $\Delta T = 0$ позволяют выяснить эффекты вариаций по поверхности отдельно для $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$.

В табл. 2 и 3 для $i=75^\circ$, $\alpha=90^\circ$ приведены изменения потока в непрерывном спектре при $\lambda=4340 \text{ \AA}$, потока в частотах линии H_γ при $\Delta\lambda=0$ и

ТАБЛИЦА 1

Параметры	Горячие модели			Холодные модели		
	1	1'	1''	2	2'	2''
T_0	10100	10100	10100	8000	8000	8000
$\lg g_0$	3.4	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5
ΔT_1	500	500	0	400	400	0
$\Delta \lg g_1$	0.4	0	0.4	0.4	0	0.4
μ_1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ΔT_2	700	700	0	200	200	0
$\Delta \lg g_2$	0.5	0	0.5	0.4	0	0.4
μ_2	-0.7074	-0.7074	-0.7074	-0.7074	-0.7074	-0.7074

ТАБЛИЦА 2

Мо- дели	1				1'				1''			
	Фаза	H_γ		W_{H_γ}	$\lambda 4340$	H_γ		W_{H_γ}	$\lambda 4340$	H_γ		W_{H_γ}
		$\Delta\lambda=0$	$\Delta\lambda=8\text{ \AA}$			$\Delta\lambda=0$	$\Delta\lambda=8\text{ \AA}$			$\Delta\lambda=0$	$\Delta\lambda=8\text{ \AA}$	
0.00	0 ^m 000	0 ^m 000	0 ^m 000	14.32	0 ^m 000	0 ^m 000	0 ^m 000	13.24	0 ^m 000	0 ^m 000	0 ^m 000	14.94
0.10	0.011	0.013	0.005	14.17	0.010	0.014	0.015	13.37	0.000	0.000	-0.011	14.64
0.20	0.031	0.040	0.016	13.94	0.031	0.042	0.045	13.61	-0.001	0.001	-0.029	14.12
0.25	0.034	0.044	0.018	13.91	0.034	0.046	0.049	13.65	-0.001	0.001	-0.031	14.08
0.30	0.029	0.036	0.016	14.00	0.028	0.039	0.041	13.58	0.000	0.001	-0.025	14.22
0.40	0.006	0.004	0.005	14.30	0.006	0.006	0.008	13.31	0.000	0.000	-0.003	14.84
0.45	-0.003	-0.007	0.001	14.42	-0.003	-0.006	-0.004	13.20	0.000	-0.001	0.006	15.08
0.50	-0.006	-0.011	0.000	14.46	-0.006	-0.010	-0.008	13.17	0.000	-0.001	0.009	15.17

ТАБЛИЦА 3

Мо- дели	2				2'				2''			
	Фаза	H_γ		W_{H_γ}	$\lambda 4340$	H_γ		W_{H_γ}	$\lambda 4340$	H_γ		W_{H_γ}
		$\Delta\lambda=0$	$\Delta\lambda=8 \text{ \AA}$			$\Delta\lambda=0$	$\Delta\lambda=8 \text{ \AA}$			$\Delta\lambda=0$	$\Delta\lambda=8 \text{ \AA}$	
0.00	0 ^m 000	0 ^m 000	0 ^m 000	19.37	0 ^m 000	0 ^m 000	0 ^m 000	18.62	0 ^m 000	0 ^m 000	0 ^m 000	19.11
0.10	0.005	0.005	-0.001	19.08	0.008	0.005	0.006	18.60	-0.003	0.000	-0.006	18.87
0.20	0.011	0.011	-0.003	18.62	0.020	0.012	0.014	18.51	-0.010	-0.002	-0.015	18.56
0.25	0.005	0.005	-0.007	18.64	0.015	0.006	0.009	18.53	-0.010	-0.002	-0.015	18.56
0.30	-0.007	-0.009	-0.015	18.86	-0.001	-0.007	-0.003	18.60	-0.007	-0.001	-0.011	18.66
0.40	-0.043	-0.047	-0.032	19.65	-0.046	-0.043	-0.036	18.81	0.003	0.001	0.003	19.10
0.45	-0.057	-0.059	-0.037	20.00	-0.063	-0.055	-0.048	18.88	0.007	0.002	0.009	19.31
0.50	-0.062	-0.063	-0.039	20.12	-0.068	-0.060	-0.053	18.91	0.009	0.002	0.011	19.39

ТАБЛИЦА 4

Модели	1				2			
	$\lambda 4340$	H_{γ}		$W_{H_{\gamma}}$	$\lambda 4340$	H_{γ}		$W_{H_{\gamma}}$
		$\Delta \lambda = 0$	$\Delta \lambda = 8 \text{ \AA}$			$\Delta \lambda = 0$	$\Delta \lambda = 8 \text{ \AA}$	
0.00	0 ^m 000	0 ^m 000	0 ^m 000	13.92	0 ^m 000	0 ^m 000	0 ^m 000	18.62
0.10	0.001	0.002	0.001	13.90	-0.001	-0.002	-0.001	18.60
0.20	0.001	0.001	0.001	13.92	-0.008	-0.009	-0.006	18.67
0.25	-0.001	-0.002	0.000	13.96	-0.014	-0.016	-0.009	18.78
0.30	-0.006	-0.009	-0.002	14.02	-0.022	-0.025	-0.014	18.95
0.40	-0.017	-0.024	-0.008	14.18	-0.040	-0.043	-0.022	19.33
0.45	-0.021	-0.030	-0.009	14.22	-0.045	-0.049	-0.024	19.44
0.50	-0.022	-0.031	-0.010	14.24	-0.047	-0.051	-0.025	19.50

$\Delta \lambda = 8 \text{ \AA}$, а также изменения эквивалентной ширины линии H_{γ} . Вариации потока даны в звездных величинах относительно начальной фазы. Для выяснения зависимости кривых блеска и изменений $W_{H_{\gamma}}$ от i и α в табл. 4 приведены результаты при $i=75^{\circ}$ и $\alpha=30^{\circ}$. Поскольку все изменения симметричны относительно фазы 0.5, таблицы охватывают только половину периода. На рис. 1 и 2 показаны кривые блеска в непрерывном спектре и кривые изменения $W_{H_{\gamma}}$, на рис. 3 и 4 показана зависимость от длины волны амплитуд кривых блеска в частотах линии H_{γ} при $i=75^{\circ}$ и $\alpha=90^{\circ}$.

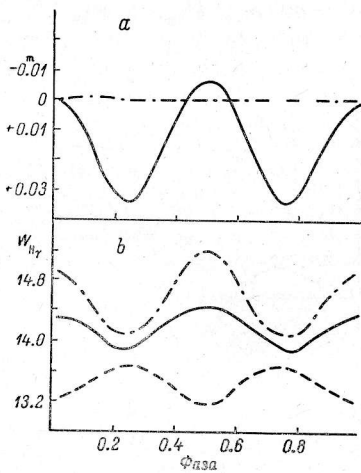


Рис. 1. Изменение потока при $\lambda 4340 \text{ \AA}$ в непрерывном спектре (a) и изменение $W_{H_{\gamma}}$ (b) в зависимости от фазы периода вращения.

Сплошная линия — модель 1; штриховая линия — модель 1'; штрихпунктирная линия — модель 1''.

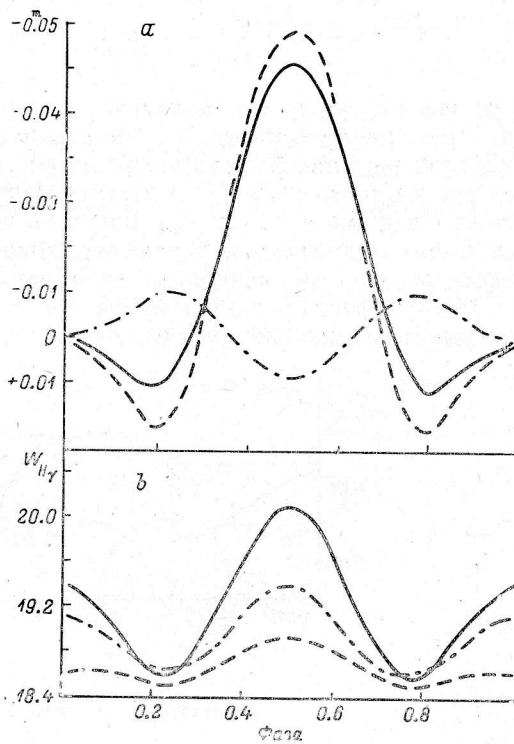


Рис. 2. То же, что на рис. 1.

Сплошная линия — модель 2; штриховая линия — модель 2'; штрихпунктирная линия — модель 2''.

Результаты моделирования показывают, что малые вариации по поверхности звезды $T_{\text{эфф}}$ и $g_{\text{эфф}}$ приводят в модели наклонного ротатора к периодическим изменениям блеска и эквивалентных ширин водородных линий с амплитудами, сравнимыми с наблюдаемыми амплитудами кривых блеска и

кривых изменений ширин водородных линий у Ар-звезд. Сравнение данных табл. 2, 3 и 4 показывает, что относительные высоты максимумов и форма кривых изменений сильно зависят от амплитуды вариаций на поверхности физических условий, а также от параметров i и α модели ротатора. Из рис. 1 и 2 можно видеть, что основной вклад в изменение потока излучения вносят вариации $T_{эфф}$, особенно у горячих моделей. Тем самым включение в рассмотрение вариаций $g_{эфф}$ не может объяснить наблюдаемое у Ар-звезд дифферен-

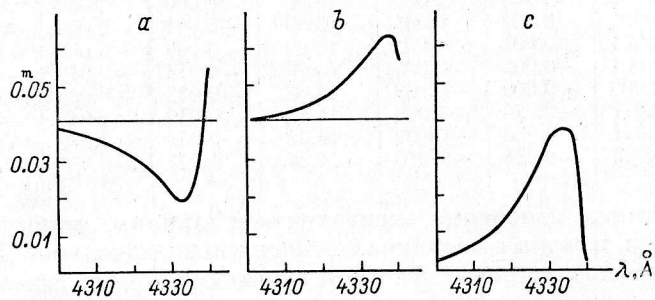


Рис. 3. Изменение с длиной волны амплитуды вариаций потока в частотах линии H_γ .

a — модель 1; b — модель 1'; c — модель 1''. Горизонтальные линии показывают амплитуду в непрерывном спектре.

циальное поведение узкополосных кривых блеска, что оставляет в силе выводы, полученные ранее в [9]. Вклады вариаций $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$ в изменение эквивалентной ширины H_γ , как видно из рис. 1 и 2, противоположны у горячих моделей и одного знака у холодных моделей. Рис. 3 и 4 показывают, что эффекты вариаций $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$ могут быть разделены при сравнительном изучении изменений потока в частотах водородных линий и в прилежащем непрерывном спектре, различных для вариаций отдельно $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$. Изучение этого эффекта в широком спектральном интервале у Ар-звезд также может выявить предполагаемые вариации $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$, поскольку относитель-

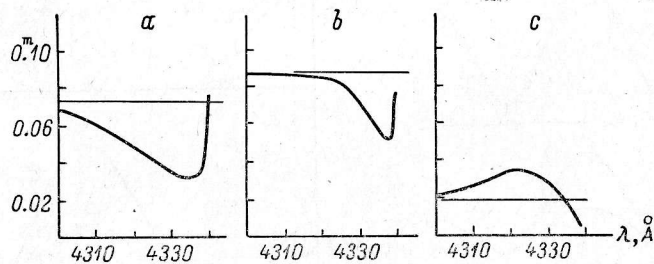


Рис. 4. То же, что на рис. 3.

a — модель 2; b — модель 2'; c — модель 2''.

ные изменения потока излучения в частотах линии H_γ и в прилежащем непрерывном спектре меняются при переходе от холодных звезд к горячим.

Большие эффекты вариаций физических условий на поверхности при малых значениях амплитуд вариаций $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$; возможность получить в рассматриваемой модели наряду с периодической и короткопериодическую переменность требуют дальнейшего исследования этой модели. Нужно отметить, что в модели вариаций на поверхности $T_{эфф}$ и $g_{эфф}$ также возможен эффект переменного «backwarming effect» из-за возникающей при этом «пятнистости» распределения, например, квазимолекулы H_2 , роль которой в поглощении при $\lambda < 3000 \text{ \AA}$ ранее недооценивалась [10]. Для выделения вклада переменного покровного эффекта, для выяснения основного меха-

низма переменности блеска Ар-звезд необходимо накопление данных детальной спектрофотометрии и фотоэлектрических наблюдений в узких полосах и в частотах водородных линий.

Автор благодарен Соколову В. В., создавшему программу счета коэффициента непрерывного поглощения, использованную в данной работе.

Литература

1. A b t H. A., G o l s o n J. C. Colors and variability of magnetic stars. — *Astrophys. J.*, 1962, 136, No. 1, p. 35—50.
2. Х о х л о в а В. Л. О возможности интерпретации переменности блеска и цвета магнитных Ар-звезд с точки зрения модели наклонного ротатора. — *Астрон. ж.*, 1971, 48, вып. 3, с. 534—545.
3. P r e s t o n G. W. Surface characteristics of the magnetic stars. — *Publ. astron. Soc. Pacific*, 1971, 83, No. 495, p. 571—584.
4. M a i t z e n H. M., M o f f a t A. F. J. 11-farben-Photometrie des magnetischen Veränderlichen HD 125248. — *Astron. Astrophys.*, 1972, 16, No. 3, p. 385—394.
5. M o l n a r M. R. Ultraviolet photometry from the OAO. VII. α^2 Canum Venaticorum. — *Astrophys. J.*, 1973, 179, No. 2, p. 527—538.
6. К у м а й г о р о д с к а я Р. П., Ч у н а к о в а Н. М. О характере изменения линий водорода в спектрах магнитных и пекулярных звезд. — *Сообщ. Спец. астрофиз. obs.*, 1973, вып. 10, с. 21—36.
7. M o n a g h a n J. J. Polytropic stars with very strong magnetic fields. — *Z. Astrophys.*, 1968, 69, No. 2, p. 146—153.
8. T r a s k o I. D. Light variations in magnetic stars. — *Astrophys. J.*, 1972, 171, No 3, p. 569—582.
9. С н е ж к о Л. И. О переменности блеска Ар-звезд. — *Астрон. цирк.*, 1972, № 741, с. 3—5.
10. R a k o s c h K. D., S e x l R., W e i s s W. W. Theoretical aspects of light variations of magnetic stars. — *Astron. Astrophys.*, 1974, 31, No. 4, p. 441—446.
11. S t r o m S. E., S t r o m K. M. Effects of silicon opacity on B-and A-star atmosphere. — *Astrophys. J.*, 1969, 155, No. 1, p. 17—26.
12. P e t e r s o n D. M. The photometric variability of Ap-stars. — *Astrophys. J.*, 1970, 161, No. 2, p. 68—94.
13. W o l f S. C., W o l f R. J. uvby Photometry of Ap-stars: the nature of the light variations. — *Astron. J.*, 1971, 76, No. 5, p. 422—430.
14. L e c k r o n e D. S. Ultraviolet photometry from the OAO. VIII. The blue Ap-stars. — *Astrophys. J.* 1973. 185. No. 2, p. 577—596.
15. W o o d H. J. Photoelectric balmer—line photometry. — *Astrophys. J.*, 1968, 152, No. 1, p. 117—122.
16. B o n s a c k W. K., W a l l a c e W. A. Spectrum variations in 56 Ari. — *Publ. astron. Soc. Pacific*, 1969, 82, No. 1, p. 249—273.
17. M i h a l a s D. Balmer-line-blanketed model atmospheres for A-type stars. — *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1966, 13, No. 114, 30 p.
18. С н е ж к о Л. И. К методике расчета контуров линий поглощения. — *Сообщ. Спец. астрофиз. obs.*, 1971, вып. 3, с. 3—16.
19. Г р и м Г. Спектроскопия плазмы. М., Атомиздат, 1969, 452 с.

Декабрь 1974 г.