

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 17

ФЕВРАЛЬ, 1981

ВЫПУСК 1

УДК 524.33+524.352

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНТИВСПЫХИВАЮЩЕЙ ЗВЕЗДЫ RZ PSC

А. Ф. ПУГАЧ

Поступила 18 декабря 1979

Принята к печати 10 сентября 1980

Рассмотрена модель явления в звездах типа Is(A), приводящего к наблюдаемым ослаблениям блеска (антивспышкам). Использованы 2 предположения: 1) Ослабления блеска вызываются появлением над фотосферой звезды гипотетического поглощающего свет абсорбента, оптическая плотность которого растет от нуля до некоторой величины τ_{max} . 2) Дополнительное коротковолновое излучение, наблюдаемое у некоторых антивспыхивающих звезд, возникает в области, лежащей выше зоны действия абсорбента. Следствия модельных расчетов позволяют качественно объяснить многозначный характер связи между блеском и цветом быстрых неправильных переменных звезд, установленный по фотоэлектрическим наблюдениям. Для количественных расчетов использованы фотоэлектрические *UBV* наблюдения антивспыхивающей звезды RZ Psc, проведенные автором в 1972—75 гг. Вычисленные цвета *B—V* и *U—B* хорошо совпадают с наблюдаемыми. Определены относительные интенсивности фотосферы звезды и дополнительного хромосферного излучения в полосах *U*, *B*, *V*; найдена зависимость коэффициента поглощения абсорбента от длины волны $\tau_{\lambda} \propto \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{1.4}$ и получены значения τ_{max} .

1. *Введение.* Несмотря на то благоприятное обстоятельство, что многие неправильные переменные звезды доступны фотоэлектрическим наблюдениям с телескопами умеренного размера, информация колориметрического характера, полученная за последние два десятилетия, в значительно меньшей степени, чем ожидалось, способствовала расширению наших представлений о физической сущности неправильных переменных звезд. Прогресс в этой области большей частью обязан ИК-наблюдениям, благодаря которым возникли и укрепились представления о чрезвычайно важной роли пыли (имеется в виду пыль скоплений и околозвездных оболочек).

чек) как активного агента, влияющего на наблюдаемые характеристики звезд.

Колориметрические наблюдения быстрых неправильных переменных звезд за последние два десятилетия не только не прояснили феноменологическую картину переменности, но, кажется, даже усложнили понимание происходящего своими зачастую противоречивыми результатами. В частности, не выяснено, как меняется цвет неправильных переменных в зависимости от их блеска [1]. И дело совсем не в малочисленности или неточности наших наблюдений — сложным оказался сам предмет исследования. Не только у различных звезд, но иногда даже у одной и той же звезды обнаруживался различный характер связи показателя цвета $B - V$ и величины V . Так, одна из наиболее хорошо изученных в фотометрическом отношении звезд — RY Тау иногда «краснела» при ослаблении блеска, иногда «голубела», иногда при почти постоянном показателе $B - V$ другой показатель цвета $U - B$ менялся на $0^m2 - 0^m3$ [2, 3].

Одно время казалось, что ситуация прояснилась в отношении по крайней мере одной обособленной разновидности звезд — группы быстрых неправильных переменных с алголеподобными ослаблениями блеска — $Is(A)$. Сложилось мнение, что эти звезды не изменяют цвет или же изменяют его в небольших пределах при довольно значительных (порядка 2^m) вариациях блеска [4]. Это обстоятельство легло в основу модели, объясняющей ослабления блеска $Is(A)$ -звезд поглощением его гипотетическим поясом околосветных облаков, состоящих из крупных частиц [5, 6].

Однако постепенное накопление наблюдательного материала вновь возродило ситуацию, сложившуюся при изучении RY Тау, так как звезды с алголеподобными ослаблениями блеска, становясь слабыми, могут.

- а) увеличивать показатель $B - V$, как BH Сер [7] и SU Ауг [2, 8];
- б) не проявлять цветовых изменений, как SV Сер [2];
- в) обнаруживать сложный характер зависимости цвета от блеска, как UX Ори [9, 10] и RZ Псц [16].

Сложность колориметрической картины усугублялась тем обстоятельством, что в переменности некоторых объектов (как, например, у RZ Псц [11]) было выделено два типа ослаблений, сопровождающихся либо постоянством показателя $B - V$, либо его «покраснением».

В последние годы стала известна ранее не обнаруженная особенность $Is(A)$ -звезд — наличие в их спектрах слабой или умеренной эмиссионной линии H_α [12, 13], что совершенно однозначно интерпретировалось исследователями как результат проявления газовых оболочек у этих звезд.

Кроме того, у быстрых неправильных переменных звезд с алголеподобными ослаблениями блеска, BO Сер, UX Ори, WW Вул, обнаружено избыточное ультрафиолетовое излучение [7, 13]. Ультрафиолетовый эксцесс, вероятно, присутствует и в излучении RZ Псц, поскольку наблюдаемый в

максимуме ее показатель цвета $U - B = 0^m 09$ не соответствует спектральному классу G8—K0. Обнаружение этих особенностей привело к убеждению, что в излучении Is(A)-звезд заметная доля в сравнении с излучением фотосферы принадлежит источникам дополнительного излучения как дискретного, так и непрерывного характера. Тот факт, что такими же источниками дополнительного излучения, но проявляющимися в гораздо большей степени, обладают звезды типа RW Возничего, хорошо известен [14, 15].

Теперь распространение вышеописанных особенностей и на группу Is(A)-звезд открывает новые возможности для построения моделей, описывающих наблюдаемые свойства этих интересных звезд. В частности ясно, что при описании колориметрического поведения Is(A)-звезд нельзя игнорировать вклад, вносимый дополнительным в сравнении с фотосферой излучением.

2. *Модель антивспыхивающей звезды.* Исходя из представления о том, что алгоподобные ослабления блеска, так называемые антивспышки, вызываются экранированием света пока гипотетическим поглощающим веществом, рассмотрим упрощенную модель антивспыхивающей звезды. Модель включает звезду главной последовательности, обладающую в отличие от нормальных звезд протяженной оболочкой (назовем ее условно хромосферой), в которой расположены источники дополнительного излучения. Для нас пока не важно, имеет это излучение дискретный или непрерывный характер. Существенно только, чтобы геометрический размер хромосферы был больше по порядку величины или сравним с размером звезды. Интенсивность излучения хромосферы на эффективных длинах волн системы VBU обозначим соответственно i_V , i_B и i_U . Пусть между звездой и хромосферой появляется поглощающая среда, оптическая толщина которой в визуальной области τ_V растет от нуля до некоторой максимальной величины $\tau_{V\max}$. Сейчас мы не задаемся вопросом о генезисе поглощающей среды (абсорбента) и не рассматриваем причины его появления над фотосферой. Отметим только, что появление абсорбента на луче зрения связывается в этой модели с наблюдаемым ослаблением блеска.

Обозначим интенсивность излучения фотосферы на ранее упомянутых длинах волн через I_V , I_B и I_U , а оптическую толщину абсорбента τ_V , τ_B и τ_U . Тогда наблюдаемые в максимуме блеска фотоэлектрические величины m_V , m_B и m_U можно выразить через интенсивности:

$$\begin{aligned} m_V &= -2.5 \lg(I_V + i_V), \\ m_B &= -2.5 \lg(I_B + i_B), \\ m_U &= -2.5 \lg(I_U + i_U). \end{aligned} \quad (1)$$

Аналогично для минимума блеска:

$$\begin{aligned}
 m'_V &= -2.5 \lg [I_V \cdot \exp(-\tau_{V \max}) + i_V]; \\
 m'_B &= -2.5 \lg [I_B \cdot \exp(-\tau_{B \max}) + i_B]; \\
 m'_U &= -2.5 \lg [I_U \cdot \exp(-\tau_{U \max}) + i_U].
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

В этой системе число неизвестных (9) можно сократить, если наделить абсорбент какими-нибудь определенными оптическими свойствами. Поскольку об этих свойствах априори ничего не известно, будем считать, что экранирующее вещество поглощает в разных длинах волн как межзвездная среда, для которой

$$A_V = 3.2 E_{B-V}; \quad E_{U-B} = 0.8 E_{B-V}. \tag{3}$$

Таким образом закон поглощения, принятый в форме (3), позволяет выразить τ_B и τ_U через τ_V :

$$\tau_B = 1.312 \tau_V; \quad \tau_U = 1.576 \tau_V. \tag{4}$$

Кроме этого, знание спектрального класса звезды, а следовательно неискаженного межзвездным поглощением показателя цвета $(B-V)_0$ дает возможность получить дополнительное уравнение

$$(B-V)_0 = -2.5 \lg \frac{I_B}{I_V}. \tag{5}$$

Решая систему семи уравнений с семью неизвестными относительно $\tau_{V \max}$, получаем уравнение для наибольшего значения оптической толщи, которой соответствует минимум блеска в полосе V :

$$\begin{aligned}
 & \frac{(-0.4 m_B) \text{ dex} - (-0.4 m'_B) \text{ dex}}{[-0.4 (B-V)_0] \text{ dex} \cdot [(-0.4 m_V) \text{ dex} - (-0.4 m'_V) \text{ dex}]} = \\
 & \frac{1 - \exp(-1.312 \tau_{V \max})}{1 - \exp(-\tau_{V \max})}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Определив отсюда $\tau_{V \max}$, находим неизвестные значения интенсивностей I_V, I_B, I_U, i_V, i_B и i_U . Вычисления по приведенным выше формулам дают в конечном итоге расчетную зависимость цветов $B-V$ и $U-B$ от величины V . В качестве пробного объекта для проверки предложенной методики возьмем RZ Psc — типичную антивспыхивающую звезду, у которой, как указывалось выше, подозревается присутствие ультрафиолетового избытка.

RZ Psc интересна еще и тем, что относится к числу наиболее холодных антивспыхивающих звезд, так как подавляющее большинство Is (A)-

звезд принадлежит к спектральным классам А и F. Это обстоятельство играет немаловажную роль при выборе пробного объекта, поскольку в холодной звезде относительно сильнее проявляется присутствие дополнительного излучения в B и особенно в U полосах. Помимо этого RZ Psc удобна еще и тем, что расположена вдали от галактической плоскости ($b_1 = 35^\circ$) и ее излучение мало подвержено действию межзвездного покраснения.

Трехцветные фотоэлектрические наблюдения RZ Psc проводились автором в 1972—75 гг. в Высокогорной экспедиции ГАО АН УССР на пике Терскол. Результаты UBV измерений (средние за ночь) представлены точками на рис. 1 и 2. Кроме того в табл. 1 даны усредненные наблюдаемые U , B , V величины переменной для максимума и минимума, которые

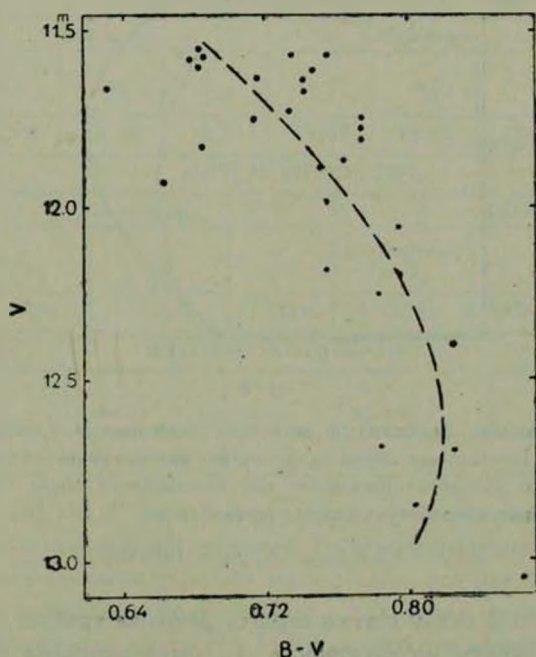


Рис. 1. Наблюдения (кружки) и расчетная зависимость изменения наблюдавшегося цвета $B-V$ при изменении блеска RZ Psc в предположении, что на показатель $B-V$ влияют поглощение и излучение хромосферы.

использовались при расчетах. Решение в общем случае дает для RZ Psc интенсивности фотосферы и хромосферы, однако интенсивность i_V получается отрицательной. Этот результат естественным образом связан со спектральными особенностями дополнительного коротковолнового излучения. Как следует из многочисленных наблюдений распределения энергии,

дополнительный коротковолновый избыток излучения у тех звезд, где он уверенно регистрируется, начинает обнаруживаться в синей области спектра у $\lambda \approx 4000 \text{ \AA}$ и резко возрастает в сторону коротких волн. На длинах волн больше $4000 \text{ \AA}$ излучение хромосферы отсутствует, либо необнаружимо мало. Отрицательное значение i_V несомненно свидетельствует о том, что у RZ Psc хромосфера не излучает, а поглощает в области длин

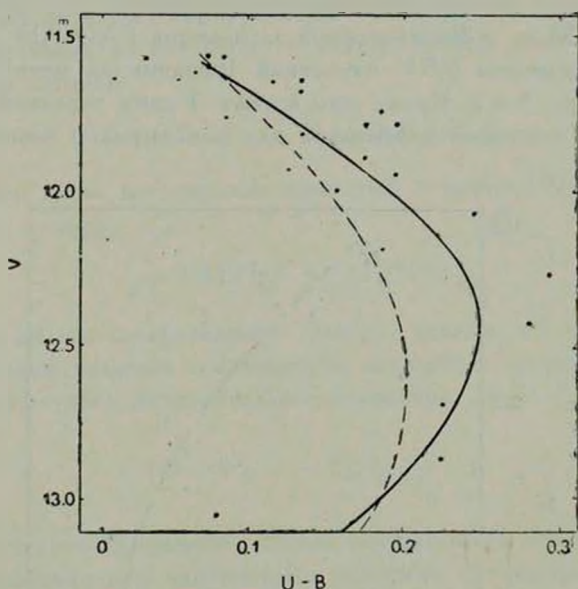


Рис. 2. Наблюдения (кружки) и расчетные зависимости (линии) цвета $U-B$ и блеска переменной. Пунктирная линия представляет вычисленную зависимость $(U-B)-V$ при допущении, что абсорбент поглощает как межзвездная среда. Сплошная линия — если закон поглощения абсорбента задается выражением:

$$A_V = 3.2 E_{B-V}, \quad E_{U-B} = 1.08 E_{B-V}.$$

волн $\lambda > 4000 \text{ \AA}$. В связи с этим строгое решение требует, чтобы конкретно для данной звезды интенсивность i_V была записана как функция от I_V , поскольку часть поглощенного фотосферного излучения пропорциональна интенсивности I_V . Записав выражение для выходящего суммарного излучения в фильтре V соответственно для максимума и минимума как

$$I_V(1 - \alpha) \quad \text{и} \quad I_V(1 - \alpha) \exp(-\tau_{V_{\text{max}}}), \quad (7)$$

где α — доля фотосферного излучения, поглощенного хромосферой в фильтре V , $e^{-\tau_V}$ — часть V -излучения, поглощенная абсорбентом, полу-

чаем в частном случае для RZ Psc выражение для максимальной оптической толщи абсорбента:

$$(-0.4 m_V) \text{ dex} = \exp[-\tau_{V \max}][(-0.4 m_V') \text{ dex}] \quad (8)$$

и выражения для вычисления блеска и цветов переменной при изменении оптической толщи:

$$\begin{aligned} V &= -2.5 \lg [I_V (1 - \alpha) \exp(-\tau_V)]; \\ B &= -2.5 \lg [I_B \exp(-1.312 \tau_V) + i_B]; \\ U &= -2.5 \lg [I_U \exp(-1.576 \tau_V) + i_U]. \end{aligned} \quad (9)$$

Таблица 1

НАБЛЮДАЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Символ	Максимум			Минимум			$(B-V)_0$
	m_V	m_B	m_U	m_V	m_B	m_U	
Значение	11.60	12.30	12.39	13.02	13.81	13.93	0.81

ИНТЕНСИВНОСТИ

Символ	Фотосфера			Хромосфера		
	I_V	I_B	I_U	поглощение (1—2)	i_B	i_U
Значение	1.01234	0.48180	0.41246	0.98781	0.04454	0.07228

ОПТИЧЕСКИЕ ТОЛЩИ

Символ	$\tau_{V \max}$	$\tau_{B \max}$	$\tau_{U \max}$
Значение	1.302	1.708	2.360

По формулам (6) были определены величины переменной и результаты вычислений представлены на графиках 1 и 2 пунктирными линиями. Сравнение их с наблюдаемыми точками показывает, что предложенная модель и метод учета влияния дополнительного излучения верно отражают наблюдаемую картину для цвета $B-V$ и находятся в качественном согласии с наблюдаемым цветом $U-B$. Качественное согласие состоит в том, что звезда по мере увеличения оптической толщи абсорбента сначала увеличивает показатель $U-B$ по закону межзвездного покраснения, но в какой-то момент, когда доля проходящего через абсорбент излучения становится настолько малой, что доминирующим оказывается излучение хромосферы, показатель $U-B$ начинает уменьшаться. Это и определяет наблюдаемый загиб зависимости $U-B$ от V . Причина количественного несоответствия наблюдаемых и вычисленных показателей $U-B$ лежит в том, что мы брали закон поглощения абсорбента таким, каким он наблюдается у меж-

звездной среды. используя такое приближение в качестве первого шага. Сейчас есть возможность ввести необходимую поправку. Изменим несколько закон поглощения абсорбента, приняв его в виде

$$A_V = 3.2 E_{B-V}, \quad E_{U-B} = 1.08 E_{B-V}. \quad (9a)$$

Просчитанная с этими новыми значениями зависимость показана на рис. 2 жирной линией. Хорошее совпадение с наблюдениями говорит о правильности подобранного закона поглощения. Из уравнения (9a) следует, что

$$\tau_B = 1.312 \tau_V; \quad \tau_U = 1.80 \tau_V. \quad (10)$$

Отсюда можно вычислить зависимость коэффициента поглощения абсорбента χ_λ от длины волны на ограниченном интервале длин волн $\Delta\lambda = 5510-3800$ Å. Этот интервал определяется разностью эффективных длин волн полос V и U для цветовой температуры 4900° . Вычисления дают:

$$\chi_\lambda \propto \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{1.4}. \quad (11)$$

Промежуточные результаты вычислений указаны в табл. 1. Используя значения i_B и i_U , можно определить показатель цвета $(U-B)_{\text{тр}}$ самой хромосферы, который оказывается равным -0^m53 . Это значение близко к показателям цвета $U-B$ некоторых звезд типа Т Тельца и вспыхивающих звезд, имеющих в хромосфере источники нетеплового излучения [17].

3. *Заключение.* Таким образом, предложенная модель цветových изменений RZ Psc во время антивспышек основана на двух наблюдательных фактах:

- а) особой, меняющей знак, зависимости цвета $U-B$ от V ;
- б) наличии дополнительного ультрафиолетового излучения, проявляющегося в том, что в максимуме блеска показатель $U-B$ не соответствует спектральному классу G8—K0.

Кроме этого в основу модели легли два предположения:

1. Ослабления блеска происходят вследствие появления над фотосферой звезды некоторого поглощающего свет агента с оптической плотностью τ_λ , причем τ_λ меняется от нуля до $\tau_{\lambda, \text{max}}$.
2. Дополнительное ультрафиолетовое излучение, влияющее на величины B и U , возникает в области, лежащей над фотосферой достаточно высоко для того, чтобы появление абсорбента не поглотило существенной части дополнительного излучения.

Вытекающие из этих посылок следствия позволяют объяснить многозначный характер зависимости показателей $B-V$ и $U-B$ от блеска переменной V . Кроме этого появляется возможность качественного описания

цветового поведения других быстрых неправильных переменных звезд, ибо соответствующим подбором параметра τ , можно объяснить не только постоянство показателя $B-V$ при ослаблении блеска, но и его увеличение или уменьшение.

Главная астрономическая
обсерватория АН УССР

A PHENOMENOLOGICAL MODEL OF THE ANTIFLARE STAR RZ PSC

A. F. PUGACH

A model of the phenomenon which leads to the light-fading of the brightness of $Is(A)$ stars is discussed. Two hypotheses have been used.

1. The appearance of some obscuring matter over the star-disk causes the light fading, optical depth of matter τ increasing from 0 up to $\tau_{\max}$.
2. Short-wave excess of radiation emergences in the zone lying over the region of light absorption. The model proposed allows to account for a multiplex relation between V magnitudes and $B-V$, $U-B$ colours that have been shown by some rapid irregular variables. The results of numerical calculation were compared with the observed V , $B-V$, and $U-B$ magnitudes of RZ Psc which have been obtained by the author in 1972-1975. Calculated colours $B-V$ and $U-B$ coincided with the observed ones. The UBV intensities of short-wave excess and values $\tau_{\max}$ as well as the extinction law of obscuring matter $\kappa_{\lambda} \propto (1/\lambda)^{1.1}$ are found.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Мирзоян, в сб. «Ранние стадии эволюции звезд», Наукова Думка, Киев, 1977, стр. 100.
2. Г. В. Зайцева, Переменные звезды, 16, 435, 1968.
3. Г. В. Зайцева, В. М. Лютый, А. М. Черепашук, Астрофизика, 10, 357, 1974.
4. W. Wenzel, in "Non-Periodic Phenomena in Variable Stars", IAU Colloq., Budapest, 1969, p. 61.
5. W. Wenzel, MVS, 5, 75, 1970.
6. S. Rössiger, W. Wenzel, AN, 295, 47, 1974.
7. W. Wenzel, V. Bruckner, MVS, 8, 35, 1978.
8. Put Kuan, Ap. J., 210, 129, 1976.
9. Е. А. Колотилов, Астрофизика, 13, 33, 1977.
10. Е. А. Колотилов, Г. В. Зайцева, В. И. Шенаврин, Астрофизика, 13, 449, 1977.
11. Г. В. Зайцева, Письма АЖ, 4, 283, 1975.
12. Г. В. Зайцева, В. Ф. Есипов, Астрон. цирк., № 712, 7, 1972.
13. Г. В. Зайцева, Е. А. Колотилов, Астрофизика, 9, 185, 1973.

14. П. П. Петров, в сб. «Ранние стадии эволюции звезд», Наукова Думка, Киев, 1977, стр. 66.
15. G. H. Herbig, Adv. Astron. Astrophys. 1. 47, 1962.
16. А. Ф. Пугач, в сб. «Вспыхивающие звезды, флуоры и объекты Хербига—Аро», Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1980, стр. 153.
17. Г. А. Гурздян, Вспыхивающие звезды, Наука, М., 1973.