

К ВОПРОСУ О ПОВЕДЕНИИ МИРИД НА ДИАГРАММЕ ($B - V$), ($V - R$)

В. В. Цымбал, В. Е. Панчук

Оценено влияние измерений радиуса, температуры и поглощения в полосах молекулы окиси титана на B -, V -, R -цвета долгопериодических переменных звезд. Овалы, описываемые миридами на диаграммах ($B - V$), ($V - R$), интерпретированы как результат независимых изменений температуры и числа поглощающих молекул N (TiO). При переходе от максимального блеска к минимальному N (TiO) увеличивается почти на два порядка, что невозможно объяснить в рамках термохимического равновесия атмосфер мирид. Наблюдения в B - и V -лучах, используемые при исследовании фундаментальных характеристик холодных переменных звезд, в значительной степени «не проникают» под нестационарные околозвездные оболочки.

An influence of variations of radius, temperature and absorption in the bands of titanium oxide molecule on B , V , R (the colours of long-period variables) is estimated. Ovals made by mira-type stars on the diagrams ($B - V$), ($V - R$) are interpreted as a result of independent variations of the temperature and the number of absorbing N (TiO) molecules. During the transition from the maximum brightness to the minimum brightness N (TiO) increases almost by a factor of two that can not be explained in the framework of thermochemical equilibrium of the atmospheres of mira-type stars. Observations in B and V used for investigations of fundamental characteristics of the cold variables don't «penetrate» to a considerable extent under the non-stationary circumstellar envelopes.

При рассмотрении результатов фотометрических наблюдений холодных звезд особый интерес представляет интерпретация положений показателей цвета на диаграмме ($B - V$), ($V - R$). Именно в этих цветах имеется наибольшее количество уверенных наблюдений. В диапазоне U холодные звезды слабы, точность наблюдений невелика, кроме того, из-за присутствия у ряда объектов эмиссионных линий этот диапазон непригоден для изучения абсорбционных характеристик атмосфер. Наблюдения в цветах I , J , K и L требуют применения охлаждаемых приемников излучения и менее распространены. Именно в цветах B и V амплитуды изменения блеска долгопериодических переменных звезд (мирид) максимальны. Показатели цвета звезд типа Миры Кита периодически изменяются с изменением блеска звезды [1]. При амплитуде изменения блеска в полосе V около 4^m показатели цвета $B - V$ и $V - R$ меняются в пределах $0.1 - 0.3^m$ и $1.5 - 5.0^m$ соответственно. Основные моменты, которые трудно объяснить при обосновании того или иного механизма переменности блеска мирид, следующие:

а) изменение радиуса звезды, полученного из фотометрических наблюдений и изменение радиуса, полученного из кривой лучевых скоростей (видимая область спектра), не согласуются друг с другом [2];

б) кривая изменения показателей цвета $B - V$ не повторяет кривую изменения блеска, причем амплитуда колебаний $B - V$ и величина сдвига по фазе относительно кривой изменения блеска различны для разных мирид;

в) наблюдаются неправильные изменения формы и амплитуды кривой блеска от цикла к циклу.

Ниже мы попытаемся количественно интерпретировать поведение мирид в B -, V -, R -лучах.

Рассмотрим сначала звезды кислородной последовательности, не подчеркивая особо факт переменности блеска. Теоретические показатели цвета естественно вычислять из теоретических распределений энергии, полученных, в свою

очередь, в результате расчета модели атмосферы. Для углеродных звезд такие попытки уже выполнены. В случае М-звезд ситуация значительно усложнена тем, что спектр поглощения молекулы окиси титана формируется в самых верхних слоях атмосферы, структура которых при расчетах моделей атмосфер определяется неуверенно. Спектр TiO, рассчитанный в предположении о солнечном химическом составе, существенно отличается от наблюдаемого — теоретические полосы глубже наблюдаемых. Совпадения можно достичь, сдвигая шкалу эффективных температур на несколько сотен градусов в область высоких температур или уменьшая отношение полного числа атомов кислорода и углерода O/C. Обе процедуры снижают число молекул TiO в атмосфере. Занижение величины силы осциллятора электронного перехода, образующего α -систему полос, не оправдано, так как к настоящему времени силы осцилляторов определены независимо для нескольких электронных систем и маловероятно, что все значения f_e завышены на одну величину. Если принять

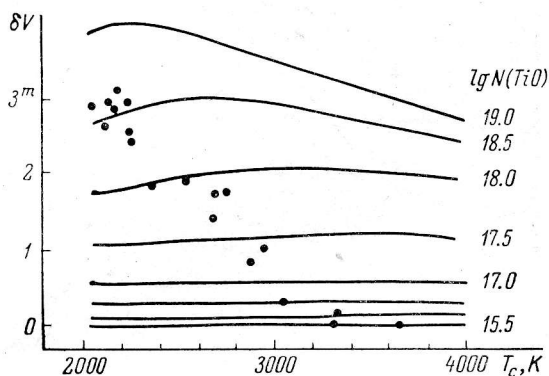


Рис. 1. Сравнение теоретических и наблюдаемых поправок в полосе V за поглощение на молекулах TiO.

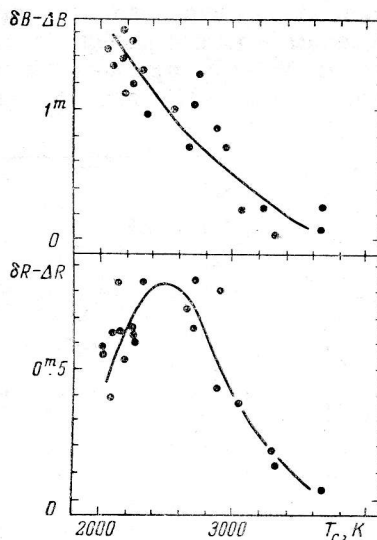


Рис. 2. Сравнение теоретических и наблюдаемых поправок в полосах B и R за поглощение на связанно-связанных переходах.

во внимание, что в атмосферах холодных звезд возможны отклонения от диссоциативного равновесия, то кажется естественным не связывать однозначно температуру и число поглощающих частиц. Схема расчета теоретических показателей цвета существенно упрощается, если полное число поглощающих частиц $N(\text{TiO})$ считать параметром задачи.

В работе [3] показано, что распределение энергии в непрерывном спектре М-звезд в диапазоне $\lambda < 1.2$ мкм практически совпадает с функцией Планка при температуре, равной эффективной температуре звезды T_e . Считая излучение фотосферы планковским, используем модель Шустера—Шварцшильда. Оптическая толщина слоя, формирующего спектр TiO, равна $\tau_\lambda = k_\lambda N(\text{TiO})$. Здесь k_λ — коэффициент поглощения на одну частицу. Температуру слоя молекул окиси титана T_0 , для которой проведем вычисления k_λ , примем равной $T_0 = 0.7 T_e$ [4]. Следует отметить, что при низких температурах k_λ слабо зависит от T_0 и свойства модели не критичны к соотношению T_0 и T_e . Коэффициент поглощения k_λ определяется в приближении сглаживания по вращательной структуре [5], силы осцилляторов для шести систем электронных переходов приведены в [6]. Факторы Франка—Кондона вычислены в [7].

Имея вычисленный поток излучения, мы можем получить показатель цвета в фотометрической системе Джонсона. Связь вычисленных и наблюдаемых показателей цвета осуществляется при помощи калибровочных поправок, определяемых из наблюдаемых распределений энергии в спектрах опорных звезд. Для системы B, V, R соответствующие поправки имеются в [8]. Прежде чем сравнивать теоретические и наблюдаемые показатели цвета, сделаем еще одно

допущение. Известно, что кроме полос TiO планковские величины B , V , R искажаются поглощением в атомных линиях и полосах других молекул. Исходя из вида спектра, примем, что в полосе V поглощение происходит только в полосах TiO. Тогда дополнительное поглощение в цветах B и R , остающееся после учета поглощения на TiO, определим из сравнения наблюдаемых (δB и δR) и теоретических (ΔB и ΔR) блокировочных поправок.

В работе [9] получены новые значения величины блокировки излучения для U -, B -, V -, R -, I -цветов ряда М-звезд. Поправки за поглощение в соответствующих цветах δU , δB , δV , δR и δI определялись авторами путем привязки в нескольких пиках наблюдаемого распределения энергии к функции Планка, рассчитанной при некоторой температуре T_c . Определим в нашей модели совокупность значений N (TiO), при которых вычисленные поправки ΔV совпадают с наблюдаемыми

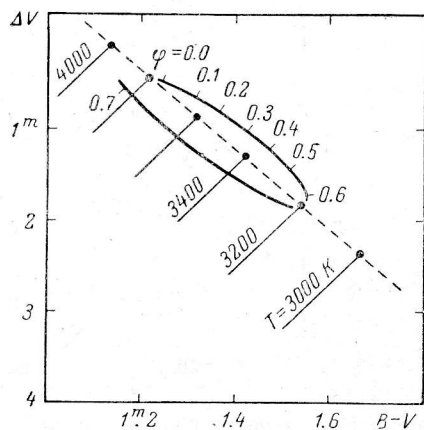


Рис. 3. Характеристики чернотельного излучения фотосфер звезд.

Сплошной линией отмечены отклонения от излучения АЧТ, связанные с изменениями радиуса фотосферы.

Рис. 4. Влияние параметров модели T_c и N (TiO) на характеристики излучения атмосфер звезд.

Штриховой линией отмечена связь N (TiO) и T_c , приведенная в таблице.

ными δV из [9] при $T_c = T_c$. Полученные значения приведены в таблице. Методика получения средних значений N (TiO) ясна из рис. 1. Точками нанесены значения δV , полученные в [9] для индивидуальных звезд.

T_c , К	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800
$\lg N$ (TiO)	18.75	18.45	18.15	17.80	17.35	16.85	16.25	15.75	15.2	15.0

Пользуясь зависимостью N (TiO) от T_c , рассчитаем эмпирические поправки к нашей модели в полосах B и R . Различия в наблюдаемых и теоретических коэффициентах блокировки нанесены на рис. 2. Эти расхождения свидетельствуют о присутствии дополнительных, кроме TiO, источников непрозрачности. В полосе B это преимущественно поглощение в атомных линиях с низкими потенциалами возбуждения, интенсивность таких линий резко возрастает с понижением температуры. В полосе R дополнительная блокировка излучения обусловлена полосами молекул CN и H_2O . Действительно, в атмосферах кислородных звезд максимум концентрации молекул H_2O достигается при $T = 2100$ К, а максимум концентрации молекул CN находится при $T > 3000$ К. Мы не проводим количественный анализ зависимости $\delta R - \Delta R$ от T_c , потому что в спектрах звезд соотношение интенсивностей полос H_2O и CN существенно отличается от спектров нормальных М-звезд.

Обратимся теперь к интерпретации B -, V -, R -цветов звезд.

1. Наблюдаемые изменения в B - и V -цветах нельзя объяснить только изменениями эффективной температуры и радиуса звезды при пульсациях. На рис. 3 в плоскости V , ($B-V$) нанесены значения, соответствующие чернотельному излучению при данных T_e , и изменения в $B-V$ и V , соответствующие изменению радиуса фотосферы звезды r . Изменения r и T_e для различных фаз кривой изменения блеска взяты из работы [10]. Видно, что изменения радиуса и температуры фотосферы приводят к вариациям V и $B-V$, не согласующимся с наблюдениями. Кроме того, значения температур из работы [10] существенно сдвинуты относительно величин T_e из таблицы.

2. Вычислим теперь B -, V -цвета в функции T_e , используя $N(\text{TiO})$ из таблицы в качестве параметра и вводя эмпирические поправки к B -цвету $\delta B - \Delta B$. На рис. 4 приведены значения V и $B-V$ в функции эффективной температуры для различных концентраций поглощающих молекул TiO над 1 cm^2 фотосферы. Из рис. 4, а видно, что увеличение в цвете V на 4 звездных величины может

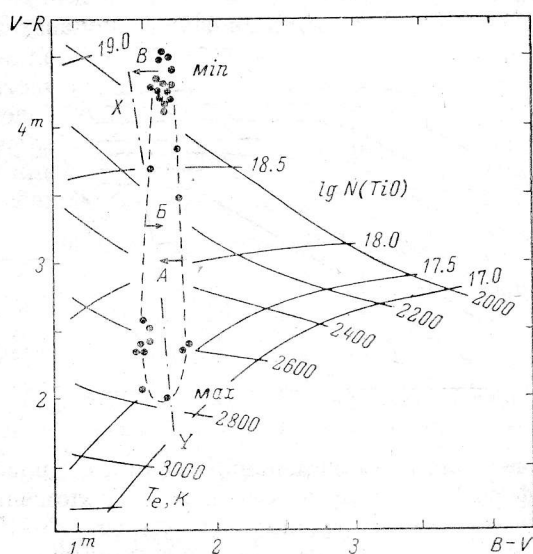
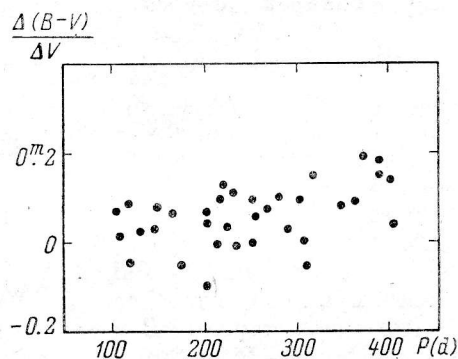
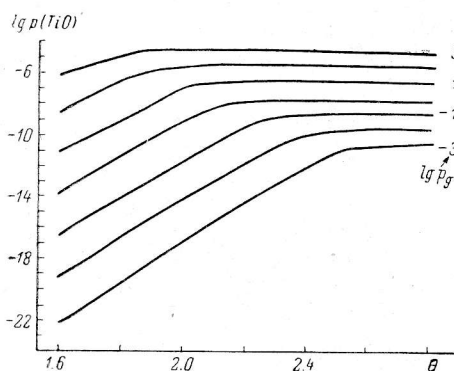


Рис. 5. Корреляция градиента $\Delta(B-V)/\Delta V$ с периодом изменения блеска звезды. Построена по данным работы [11] для восходящих ветвей изменения блеска.

Рис. 6. Связь наблюдаемых и теоретических показателей цвета $B-V$, $V-R$ для мирид. Объяснение см. в тексте.

происходить и при постоянной концентрации $N(\text{TiO})$, но необходимое для этого изменение $T_e = T_e$ не согласуется с изменением ИК-цветов, наблюдаемым у мирид. На рис. 4, б штриховой линией показаны величины $B-V$, соответствующие значениям $N(\text{TiO})$ из таблицы. Видно, что для низких температур характерно небольшое уменьшение $B-V$ с ростом T_e и, следовательно, с ростом блеска в V , а для высоких температур $B-V$ увеличивается с ростом блеска в V . В монографии Я. Я. Икаунiekса [1] отмечено, что «на $B-V$ одинаково влияют как эффективная температура, так и поглощение TiO . В таком случае не должно быть наблюдаемого изменения с фазой изменения блеска. Таким образом, причина изменения с фазой и разброса с периодом и спектром долгопериодических переменных звезд не ясна». Наши расчеты показывают, что показатель цвета $B-V$, являясь функцией T_e и $N(\text{TiO})$, может изменяться с фазой изменения блеска, причем, если изменения T_e происходят в различных диапазонах, характер изменения $B-V$ будет различным. На рис. 5 приведены величины относительных градиентов $\Delta(B-V)/\Delta V$, определенные для восходящих ветвей индивидуальных максимумов 30 мирид. Градиенты определены по данным работы [11]. Если между относительным градиентом $\Delta(B-V)/\Delta V$ и периодом существует корреляция, то она может быть аналогом зависимости период-спектр, согласно которой мириды с большими периодами имеют более поздний спектральный подкласс. Действительно, из анализа рис. 4 следует, что при изменении T_e величина градиента $\Delta(B-V)/\Delta V$ переменна.

3. Вычислим также R -цвета, используя эмпирические поправки, указанные на рис. 2. Тогда для сетки T_0 , N (TiO) мы можем определить поведение мирид в плоскости ($B-V$), ($V-R$). Результаты такого сравнения приведены на рис. 6. Точками и штриховой линией нанесены положения звезды O Ceti для различных фаз кривой изменения блеска [12]. Так как модель тонкого слоя не учитывает влияния радиуса на показатель $B-V$, оценим это влияние отдельно. Из рис. 1 следует, что на нисходящей ветви кривой изменения блеска ($\varphi = 0^m3 \div 0^m4$) изменение радиуса фотосферы увеличивает $B-V$ почти на 0^m1 . Чтобы освободить наблюдаемые $B-V$ (правая часть петли на рис. 6) от влияния r , следует сдвинуть кривую в направлении, указанном стрелкой A на 0.1 вдоль оси $B-V$. Аналогичным образом на восходящей части кривой изменения блеска ($\varphi = 0.6 \div 0^m8$) изменение r приводит к покраснению звезды в $B-V$ на 0^m1 относительно планковского показателя цвета (рис. 1). В этом случае учет



влияния радиуса сводится к сдвигу учет части петли на рис. 6 на 0.1 в сторону более синих $B-V$ (стрелка B). Не исключено, что ширина петли в направлении $B-V$ полностью объясняется колебаниями радиуса фотосферы. Если

Рис. 7. Зависимость парциального давления молекул TiO от температуры, вычисленная для разных значений полного газового давления. Содержание всех элементов принято равным солнечному.

учет влияния изменения радиуса проводить относительно состояния фотосферы в максимуме блеска, то положение минимума на плоскости ($B-V$), ($V-R$) следует сдвинуть вдоль оси $B-V$ на 0^m3 влево (стрелка B на рис. 6). Мы не рассматриваем эффекта влияния r на величину $V-R$ потому, что малые поправки к величине R не изменяют существенно формы петли на рис. 6, а только сдвигают ее вдоль оси $V-R$. Поведение наблюдаемых показателей цвета, исправленных за изменения r (т. е. приведенных к 1 cm^2 поверхности звезды), можно схематично изобразить прямой XU в плоскости ($B-V$), ($V-R$). Мы не проводим более детального учета влияния r на $B-V$ по следующей причине. Изменения радиуса фотосферы можно получить из анализа лучевых скоростей v_r тех компонент линий, которые формируются в горячей области атмосферы [10]. Холодные компоненты линий показывают совершенно противоположные колебания v_r . В фотографическом диапазоне раздвоение линий почти всегда отсутствует, и лучевые скорости, измеренные по абсорбциям, приводят к изменениям r , не согласующимся с радиусами, полученными при фотометрических наблюдениях в ИК-диапазоне [2]. К сожалению, измерения v_r в ИК-диапазоне известны нам только для R Leo [10], а на рис. 6 приведены результаты фотометрии для O Ceti.

Таким образом, сравнение теоретических и наблюдаемых показателей $B-V$ и $V-R$ позволяет сделать вывод о второстепенной роли изменений радиуса и о существенных вариациях N (TiO) с фазой изменения блеска.

Рассмотрим связь N (TiO) и T для нашей модели. На рис. 7 приведены зависимости парциального давления p (TiO), вычисленные в функции полного газового давления p_g для солнечного химического состава. Методика расчета дана в [5] и [6]. Видно, что при $T < 2000 \div 2200 \text{ K}$ увеличение p (TiO) не произойдет ни при каких разумных значениях p_g . Поэтому невозможно в рамках химического равновесия объяснить полученную при интерпретации B -, V -, R -цветов мирид связь параметров N (TiO) и T_0 (или N и T_0). Использование N (TiO) в качестве свободного параметра модели представляется оправданным.

Отсутствие жесткой связи между N и T в случае мирид легко объяснить двухслойной схемой строения атмосферы, изложенной в [10]. Поведение хо-

лодной оболочки, мощность которой достаточна для формирования спектра TiO, в известной степени обособлено от колебаний горячих фотосферных слоев. Такая схема позволяет объяснить сдвиг колебаний $B-V$ или $U-B$ по отношению к изменению блеска в V и разную величину этого сдвига у мирид с разными периодами изменения блеска. Разброс величины градиента $\Delta(B-V)/\Delta V$ (рис. 5) также может быть обусловлен наличием сложной и нестабильной связи между горячей и холодной оболочками.

В заключение отметим, что холодные полуправильные переменные звезды типа SRa имеют эмиссионные спектры, характерные для мирид, и отличаются от последних только амплитудами изменения блеска в B - и V -лучах и более сильными изменениями формы кривой блеска от периода к периоду. Не исключено, что в области спектральных классов M различие между миридами и SR-звездами связано с различием условий в упомянутых выше холодных оболочках и в другом отношении не затрагивает звезду.

Литература

1. И к а у н и к с Я. Я. Долгопериодические переменные звезды. Рига, «Зинатне», 1971. 135 с.
2. W a l l e r s t e i n G. Are long-period variables really pulsating? — Journ. Roy. Astron. Soc. Canada, 71, 1978, N 4, p. 298—308.
3. T s u j i T. Spectral energy distribution and effective temperature scale of M-giant stars. — Astron. and Astrophys., 1978, 62, N 1—2, p. 29—50.
4. Ш а в р и н а А. В. Температурная последовательность M-гигантов по молекулярному спектру окиси титана. — Астрометрия и астрофизика, 1977, 32, с. 29—33.
5. Ц ы м б а л В. В. Синтетические спектры M-звезд. Канд. дис. Одесса, 1980.
6. П а н ч у к В. Е. Методы исследования атмосфер холодных звезд. Канд. дис. Нижний Архыз, 1978.
7. Ц ы м б а л В. В. Таблицы факторов Франка—Кондона с учетом колебательно-вращательного взаимодействия для астрофизически важных молекул. I. Окись титана. Одесса, 1977. 48 с. Депонир. в ВИНТИ 20 янв. 1977, № 246-77.
8. С т р а й ж и с В. Многоцветная фотометрия звезд. — Вильнюс, «Моклас», 1977, 312 с.
9. S m a k J., W i n g R. E. Effect of titanium oxide absorption on broad-band filter photometry. — Acta Astron., 1979, 29, N 2, p. 187—198.
10. H i n k l e K. H. Infrared spectroscopy of Mira variables. I. R Leonis. The CO and OH vibration-rotation overtone bands. — Astrophys. J., 1978, 220, p. 210—228.
11. C e l i s S. L. Light and colour variation of the Mira stars. — Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 1977, 29, N 1, p. 15—30.
12. M e n d o z a E. E. Multicolour photometry of long-period variables. — Bol. observ. Tonantzintla y Tacubaya, 1967, 4, N 28, p. 114—148.

Поступила в редакцию 14.04.81