

УДК 524.336-54

Л. С. Кудашкина

Астрономическая обсерватория Одесского национального университета им. И. И. Мечникова  
65014 Одесса, парк Шевченко

### Долгопериодические переменные звезды

*В обзоре приведена информация о звездах типа Миры Кита и объектах, прилегающих к ним на диаграмме Герцшпрунга — Рассела. Дано подробное описание наблюдательных характеристик. Отмечены важные наблюдательные работы, касающиеся многоцветной фотометрии, мазерного излучения, ударных волн, потери массы, двойственности мирид, проблемы пульсационной моды, точных измерений угловых диаметров, статистических исследований, кинематических характеристик и др. Также отмечены наиболее интересные проблемы, связанные с долгопериодическими переменными, а также уделено внимание классификации и эволюционному статусу.*

*ДОВГОПЕРІОДИЧНІ ЗМІННІ ЗІРКИ, Кудашкіна Л. С. — Наводиться інформація про зірки типу Міри Кита та об'єкти, що примикають до них на діаграмі Герцшпрунга — Рассела. Надано докладний опис спостережених характеристик. Відзначено важливі роботи з багатокольорної фотометрії, мазерного випромінювання, ударних хвиль, втрати маси, подвійності мірид, з проблеми пульсаційної моди, точних вимірювань кутових діаметрів, статистичні дослідження, кінематичні характеристики та інше. Також відзначені найбільш цікаві проблеми, зв'язані з довгоперіодичними змінними зірками, а також приділена увага до класифікації та еволюційного статусу.*

*LONG PERIODIC VARIABLE STARS, by Kudashkina L. S. — The information on Mira-type stars and stars adjacent to them at the Hertzsprung — Russel diagram is presented. A detailed description of their observational characteristics is given. We give a survey of important observational works concerning: multicolor photometry with special attention to the IR emission, maser emission, shock waves, mass loss, binarity, the problem of the pulsational mode, direct measurements of angular and linear dimensions, statistic investigations, study of kinematic characteristics etc. The most interesting problems regarding long periodic variable stars are specified. Some attention is given to the classification and evolutionary stage of these objects.*

## 1. ВВЕДЕНИЕ. ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНЫХ ЗВЕЗД. СТАДИЯ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ

В теории звездной эволюции некоторые звезды на определенной стадии становятся долгопериодическими переменными (ДПП). Представляет интерес изучение их эволюционного статуса и пульсационной активности. На диаграмме Герцшпрунга — Рессела эти объекты располагаются в области звезд больших светимостей и низких температур, то есть в области красных гигантов и сверхгигантов. Наиболее многочисленными из них — звезды типа Миры Кита. К ним примыкают звезды полуправильных (SR) типов переменности, ОН/ИК-звезды (в большинстве это SR-сверхгиганты). Не исключено, что все эти объекты — звезды асимптотической ветви гигантов (АВГ) — генетически связаны между собой и находятся на разных этапах эволюции к наиболее вероятной для них заключительной стадии — планетарной туманности.

Положение звезды на диаграмме Герцшпрунга — Рессела является функцией ее светимости  $L$ , радиуса  $R$ , начального химического состава, массы  $M$  и возраста  $T$ . Когда звезда израсходует до 12 % водорода от своей начальной массы, она покидает главную последовательность. С точностью до порядка величины возраст звезды, покидающей главную последовательность, составляет  $T = 1.1 \cdot 10^{10} M/L$  лет [17], где масса  $M$  и светимость  $L$  выражены в солнечных единицах.

Краткое качественное описание эволюции звезды умеренной массы ( $\leq 9M_{\odot}$ ) после главной последовательности к асимптотической ветви гигантов приводится ниже (рис. 1).

Изменение температуры и светимости звезды со временем (т. е. ее движение на Г-Р-диаграмме) обусловлены изменением ее внутренней структуры. Последнее связано с выгоранием в звезде ядерного топлива. Положение на главной последовательности (ГП) зависит от начального содержания гелия ( $Y$ ) и тяжелых элементов, в основном — металлов ( $Z$ ) (рис. 2). Продолжительность горения водорода в недрах звезд умеренной массы с  $X = 0.7$ ,  $Z = 0.02$  составляет  $T_{\text{ms}} = 5 \cdot 10^3 (M_{\odot}/M)^{2.5}$  лет. Звезда в это время остается в пределах главной последовательности на диаграмме Г-Р, а в ее недрах возникает невырожденное гелиевое ядро. Оболочка звезды

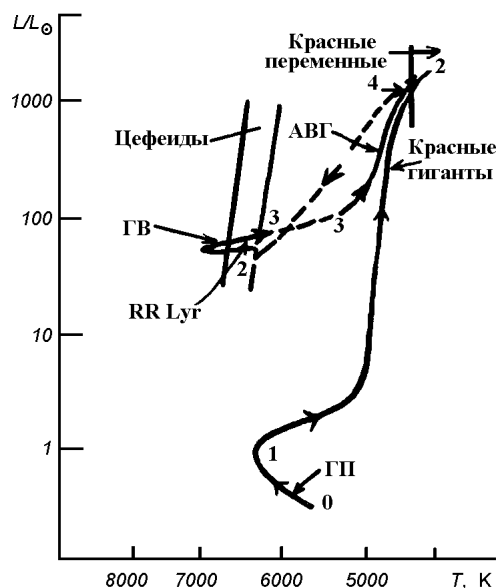


Рис. 1. Эволюция звезды умеренной массы. Стадия главной последовательности (ГП) — водородное горение в ядре (0—1); стадия красного гиганта — водородное горение в оболочке (1—2); стадия горизонтальной ветви (ГВ) — гелиевое горение в ядре и водородное в оболочке (2—3); асимптотическая ветвь гигантов (АВГ) — двойной слоевой источник (3—4). Взято из работы [87]

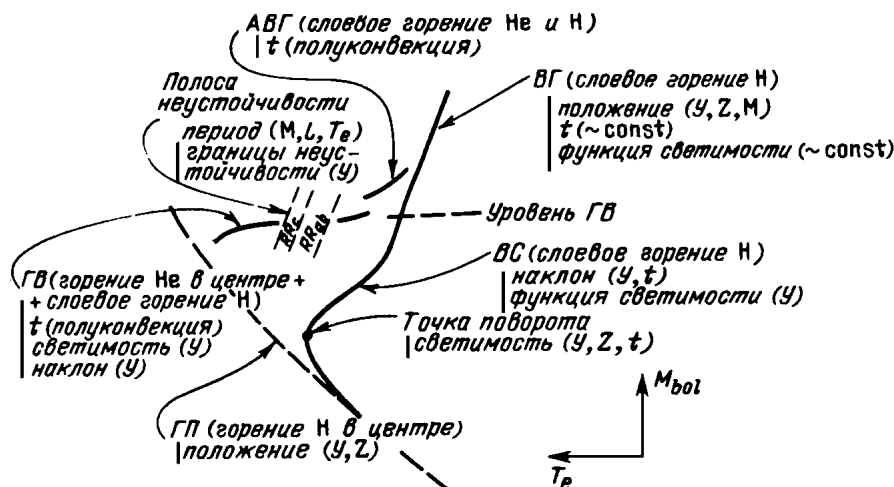


Рис. 2. Участок Г-Р-диаграммы для сильно проэволюционировавших звезд одного возраста. Здесь на главной последовательности (ГП) остались только маломассивные звезды, у которых водород еще не успел выгореть в ядре. Пояснения см. в тексте. Рисунок взят из работы [18]

остается радиативной, поэтому ее химический состав практически не изменяется [20]. Точка поворота при данном возрасте ( $t$ ) и вся изохрона в целом сильно зависят от  $Z$  и  $Y$  (рис. 2).

После выгорания водорода в центре образуется гелиевое ядро. Его сжатие вызывает повышение температуры на границе гелиевого ядра и возникновение слоевого источника горения водорода. При этом оболочка звезды расширяется [108]. Звезда становится последовательно субгигантом и красным гигантом. Звезды одинакового возраста, но разных масс образуют на этой стадии ветвь гигантов (ВГ). В этой области звезды живут недолго, — порядка  $10^8$  лет при массе порядка солнечной. Появление конвективной оболочки изменяет эволюцию звезды. Светимость звезды начинает увеличиваться, а расширение оболочки замедляется. Проникновение конвективной оболочки в недра звезды ведет к изменению химического состава атмосферы. Практически полностью исчезает литий, бериллий, бор, уменьшается на 30 % содержание углерода с соответствующим увеличением содержания азота и значительно уменьшается отношение  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  — от 90 до 20. Положение ветви гигантов также зависит от  $t$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Сжатие невырожденного гелиевого ядра ведет к постепенному повышению его центральной температуры. Горение гелия начинается в тот момент, когда центральная температура достигает  $1.5 \cdot 10^8$  К, и звезда перемещается на горизонтальную ветвь (ГВ) [20]. Положение горизонтальной ветви (ГВ) слабо зависит от возраста, зато очень чувствительно к начальному содержанию гелия.

После того как в центре выгорит гелий, образовав углеродно-кислородное ядро, реакции переместятся в слой вокруг ядра, где гелий еще сохранился, а в более высоких слоях продолжается горение водорода. На этой стадии звезды вновь превращаются в красные гиганты, образуя на диаграмме Герцшпрунга — Рессела асимптотическую ветвь гигантов (АВГ).

Выгорание гелия в ядре одиночной звезды умеренной массы ведет к образованию в ее недрах компактного вырожденного углеродно-кислородного ядра. Химический состав этого ядра (C/O) определяется исходной массой

звезды и скоростью реакции  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ .

Конвективная оболочка в этих звездах проникает сначала в область, отделяющую водородную оболочку от гелиевого слоя, а затем всего за несколько десятков тысяч лет, почти достигает границы С-О-ядра. Массивный гелиевый слой ( $M_{\text{He}} \approx M_{\odot}$ ) оказывается при этом размытым перемешиванием с оболочкой.

После окончания процесса перемешивания все звезды с С-О-ядрами становятся довольно сходными по структуре. Компактные ( $\sim 10^9$  см) вырожденные ядра окружены двойным слоевым источником энергии, осуществляющим переработку водорода сначала в гелий, а затем — в углерод и кислород. Над водородным слоевым источником находится глубокая конвективная зона, простирающаяся до поверхности звезды. Для этих звезд часто используется название «звезды асимптотической ветви гигантов» (АВГ). На эту ветвь попадают звезды и малых масс ( $0.8\text{--}2.3$ ) $M_{\odot}$  после истощения гелия в ядрах. Таким образом, АВГ — магистральный путь эволюции всех звезд с начальными массами ( $0.8\text{--}9$ ) $M_{\odot}$  на последних стадиях ядерной эволюции. Звезда в это время является красным сверхгигантом с эффективной температурой 2000—3000 К. Отличительная особенность звезд АВГ — очень малая толщина по массе слоевых источников:  $10^{-4}\text{--}10^{-6}M_{\odot}$  [20].

Еще в 1967 г. [113] было установлено, что горение гелия в слоевом источнике нестационарно и происходит во вспышечном режиме. Эта фаза эволюции получила название «фаза термических пульсаций». На самом верху Г-Р диаграммы у термически пульсирующей АВГ-звезды внешняя атмосфера становится неустойчивой, и рождается переменная типа Миры [127] (рис. 1, положение 4).

Выделим четыре группы проблем, связанных с ДПП. В каждой из этих групп приведем некоторые вопросы, требующие решения (табл. 1).

Каковы же пути решения этих проблем? В настоящее время собран достаточно большой наблюдательный материал практически во всех диапазонах длин волн. Особенно это касается ближней и дальней ИК-области. В визуальной же области поле деятельности оставлено в основном за любителями астрономии. Ведь получить полную кривую блеска мириды технически непросто из-за периодов колебаний блеска, близких к 1 г. (и соответствующих сезонных пропусков в наблюдениях) и больших амплитуд ( $5\text{--}10^m$ ).

Таблица 1. Проблемы, связанные с долгопериодическими переменными звездами

Наблюдательные	Теоретические	Эволюционные	Другие
(1) Трудно получить полную кривую блеска звезд типа Миры в одной системе	(1) Пульсационная мода — первый обортон или фундаментальная? (неопределенность в массах звезд)	(1) Связь между миридами и подобными им красными полуправильными гигантами	(1) Изменение величины периода — противоречит теории пульсаций
(2) Разрыв лучевых скоростей — невозможно получить радиус	(2) Переключение пульсаций (на стадии гелиевой вспышки?)	(2) Является ли М — S — C последовательность эволюционной?	(2) Классификация полуправильных переменных
(3) Аппроксимация кривой блеска — мультипериодичность?	(3) Динамические модели атмосфер	(3) Различные населения — различия в массах, металличности	(3) Определение расстояний, соотношение «период—светимость»
(4) Влияние молекулярного поглощения на кривую блеска	(4) Природа потери массы	(4) Роль потери массы как фактора эволюции	(4) Природа горба на кривой блеска звезд типа Миры

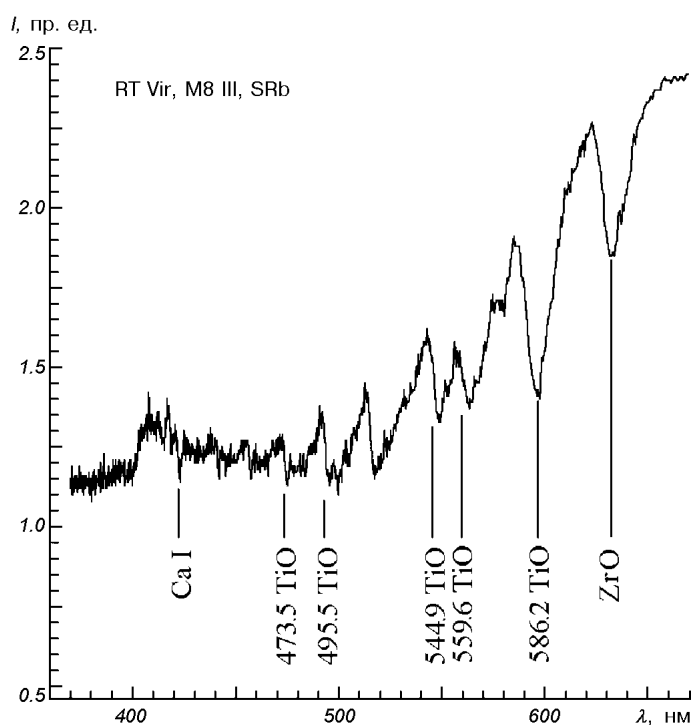


Рис. 3. Участок спектра долгопериодической переменной типа SRb RT Девы. Спектр получен с объективной призмой на 70-см менисковом телескопе Абастуманской астрофизической обсерватории Е. В. Менченковой и Л. С. Кудашкиной, обработан Г. М. Рудницким

Спектральные наблюдения осложнены наличием огромного числа молекулярных полос (рис. 3). Однако составить первое впечатление о характере переменности блеска звезды, классифицировать ее и разработать дальнейшую программу ее исследования помогает именно интегральная кривая блеска в видимом диапазоне спектра.

Хороший обзор современного состояния проблем, связанных с переменными типа Миры дан Вудом [134]. Описаны современные модели атмосфер, пульсационные моды, потеря массы и эволюция мирид.

В последние годы наметилась следующая тенденция в изучении ДПП. По наблюдательным данным выводятся статистические зависимости, которые затем уточняются с помощью теоретических гипотез. После этого полученные средние параметры полагаются в основу теоретической модели. И наконец, модель (кривые блеска, спектры и т.п.) сравнивается с наблюдениями.

## 2. ЭВОЛЮЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЗВЕЗД АСИМПТОТИЧЕСКОЙ ВЕТВИ ГИГАНТОВ

В оболочках АВГ-звезд кислород является наиболее обильным из элементов, катализирующих горение водорода. Поэтому в холодных атмосферах этих звезд после образования молекул СО остается значительное количество свободного кислорода, способного создавать окислы различных элементов, типичных для атмосфер М-звезд. Эволюция АВГ-звезды состоит в постепенном увеличении массы С-О-ядра, сопровождаемом потерей вещества обо-

лочки. В результате светимость звезды увеличивается, а масса уменьшается. Тепловые вспышки в гелиевом слоевом источнике приводят к постепенному увеличению содержания углерода в оболочке. Звезда становится углеродной, причем тем скорее, чем меньше начальное содержание тяжелых элементов.

Из зависимости светимости АВГ-звезды от массы вырожденного С-О-ядра, приведенной в работе Пачинского [104], следует, что звезды с массой ядра, приближающейся к значению  $1.4M_{\odot}$ , должны иметь светимость, превышающую  $M_{\text{bol}} = -7^{\text{m}}$ , но не выше, чем  $M_{\text{bol}} = -7.3^{\text{m}}$ . Ренцини и др. [109] показали, что светимость звезд с  $M > 5M_{\odot}$  в начале стадии вспышек в гелиевом слое должна превышать  $-6.0^{\text{m}}$ .

В Малом Магеллановом Облаке нет углеродных звезд со светимостью выше  $M_{\text{bol}} = -6.0^{\text{m}}$ , но там есть такие кислородные звезды. Почему же звезды большой светимости находящиеся на АВГ, не являются углеродными?

Ренцини [108] показал, что в звездах высокой светимости с массивными С-О-ядрами температура на дне конвективной оболочки может быть столь высокой, что изотоп  $^{12}\text{C}$  быстро превращается в  $^{13}\text{C}$  и  $^{14}\text{N}$ , и звезда или вообще не становится углеродной, или она с увеличением массы ядра может из углеродной снова стать кислородной. В более поздних работах рассмотрены различные последствия, так называемого «hot bottom burning», когда в конце АВГ-эволюции у звезд с начальными массами 4 или 5 солнечных, дно конвективной оболочки может ненадолго погрузиться в горящий слоевой источник водорода [56]. В частности, это также может привести к тому, что сформировавшиеся углеродные звезды снова превратятся в кислородные [94]. Еще одним результатом действия «hot bottom burning»-эффекта является, по-видимому, повышение содержания лития в АВГ-звездах [127].

Однако если количество атомов углерода станет больше количества атомов кислорода, в этом случае после образования сильно связанных молекул СО останется углерод, который войдет в состав СН,  $\text{C}_2$ , CN и полностью определит вид спектра. Причиной увеличения содержания углерода в оболочке красного сверхгиганта является проникновение конвективной оболочки звезды в слои, обогащенные продуктами горения гелия. Углеродные звезды являются красными сверхгигантами с радиусами в несколько сотен солнечных. Для них характерен 10—100-кратный избыток тяжелых элементов, продуктов s-процесса, также образующихся в ходе гелиевых слоевых вспышек в недрах звезд умеренных масс асимптотической ветви.

Среди ярких красных гигантов находятся S-звезды, спектры которых выделяются сильными полосами ZrO. Цирконий — один из элементов s-процесса, поэтому объяснение происхождения этих звезд нужно искать в рамках тех же сценариев, которые объясняют образование углеродных звезд. В спектрах этих редко встречающихся звезд (класса S), кроме сильных линий Ca II, наблюдаются линии Ca I  $\lambda$  422.7 нм и Ba II  $\lambda$  455.4 нм. В спектрах относительно немногих «чистых» звезд S нет полос TiO. Особенно типичны для них полосы окислов химических элементов, образующихся в s-процессе: ZrO, YO, LaO. Число известных звезд этого класса около 700. Нельзя обойти вниманием звезды с повышенным содержанием бария. В связи с этим отметим работу [99], в которой проведена классификация бариевых звезд и найдено, что эти объекты составляют весьма разнородную группу. Выделено пять явных классов, среди которых — звезды гало и четыре группы, принадлежащие населению диска. Основные результаты работы [99] поддерживают сценарий, что бариевые звезды

— не слишком массивные двойные, обогащенные барием от более развитого компаньона. Отмечено, что некоторые звезды могут казаться бариевыми, будучи на самом деле сверхгигантами, в которых линия бария увеличена эффектом гравитации.

Кроме того, у многих ДПП в спектрах отождествлены линии технеция — наиболее долгоживущего изотопа, образующегося в s-процессе. Это  $^{99}\text{Tc}$  с периодом полураспада  $2.1 \cdot 10^5$  лет. Предпринят анализ эквивалентных ширин линий  $\lambda\lambda$  429.706, 426.227, 423.819 нм [21]. Звезды, в спектрах которых обнаружены линии технеция, характеризуются усилением линий других элементов s-процесса.

Таким образом, основной характеристикой спектров звезд класса M являются полосы TiO, относительно слабые у звезд ранних подклассов, но усиливающиеся по мере перехода к более поздним звездам. У поздних гигантов класса M хорошо заметны полосы  $\text{H}_2\text{O}$  на  $\lambda = 1.8$  и  $2.7$  мкм. Для продолжения классификации после M8 в качестве критерия используются интенсивность молекулярных ИК-полос TiO и VO.

Звезды класса R имеют в спектрах сильные полосы CN и  $\text{C}_2$ . Класс R подразделяется на подклассы R0—R9 в соответствии с интенсивностью полос молекулярного углерода.

Звезды класса N подобны звездам класса R, но у них наблюдаются значительные депрессии в фиолетовой и ультрафиолетовой областях спектра. Класс делится на подклассы от N0 до N7.

Для спектров углеродных звезд C0—C9 характерны сильные полосы поглощения  $\text{C}_2$ , CN, CH. В спектрах поздних углеродных звезд наблюдаются полосы поглощения HCN и  $\text{C}_2\text{H}_2$  вблизи  $\lambda = 3.1$  мкм и эмиссия вблизи 11 мкм. Можно считать, что класс C частично заменил R и N (R0 = C1, R5 = C4).

Звезды трех основных классов M, C, S различаются в первую очередь содержанием элементов, и в меньшей степени по температуре и светимости. Среди них встречаются объекты и промежуточных типов. Последовательность M — MS — S — SC — C, по-видимому, характеризует увеличение отношения содержаний углерода и кислорода [7] и отражает различие в температурах. Но играет ли она эволюционную роль? Этот вопрос остается пока открытым.

### 3. ПОТЕРЯ МАССЫ КРАСНЫМИ ГИГАНТАМИ КАК ВАЖНЫЙ ФАКТОР ЭВОЛЮЦИИ

При отсутствии потери массы все звезды с массами более  $1.4M_{\odot}$  заканчивали бы свою эволюцию как сверхновые.

Поздние стадии эволюции звезд умеренных масс определяются потерей вещества, которая обнаруживается спектроскопически. Образование пыли в истекающем веществе приводит к появлению значительных ИК-избытков излучения звезд. Одним из следствий интенсивной потери вещества является образование планетарных туманностей.

Так, например, на основе анализа диаграммы C/N — O/N делается вывод, что планетарные туманности образованы не звездным ветром красных гигантов, а вследствие интенсивной потери массы в конце эволюции на АВГ [102].

Потеря массы становится существенным эволюционным фактором, если ее скорость превосходит скорость горения водорода в слоевом источнике:  $dM_{\text{H}}/dt \approx 10^{-11} L/L_{\odot}$ . Сравнивая скорость горения водорода со скоростью потери вещества, найдем, что потеря вещества становится основным эволю-

ционным фактором при  $R/R_{\odot} \geq (20/\eta)(M/M_{\odot})$ . Если  $\eta \approx 1$ , то все звезды с вырожденными углеродно-кислородными ядрами удовлетворяют этому условию [20].

Различные определения темпа потери массы приводят к разным результатам даже для одной звезды. Наряду с использованием прямых измерений радиусов мирид и зависимости «период — абсолютная величина в К-полосе», для решения указанных проблем используются также наблюдения в линиях СО и мазерных радиополосах.

По мере продвижения звезды на Г-Р-диаграмме в какой-то момент потеря массы начинает играть определяющую роль в дальнейшей эволюции звезды. В работе [123] для звезд с начальными массами  $0.89 \leq M/M_{\odot} \leq 5.0$  была рассчитана эволюция до конца асимптотической ветви гигантов с учетом потери массы. В результате для звезд на АВГ получены многократные фазы сверхветра, что в конце концов приводит к образованию планетарных туманностей.

От темпа потери массы зависит, успеет ли ядро достичь предела Чандрасекара ( $1.4M_{\odot}$ ) или вся оболочка «испарится» раньше.

Согласно расчетам Францмана [27] в случае даже очень большой потери массы ( $\alpha = 10$  в формуле Реймерса [107]):

$$dM/dt = -4 \cdot 10^{-13} (\alpha LR)/M \quad (M_{\odot}/\text{год}),$$

где  $L$ ,  $M$ ,  $R$  — светимость, масса и радиус звезды в солнечных единицах), продолжительность эволюции звезд с массой  $(5-9)M_{\odot}$  на стадии вспышек в гелиевом слое примерно  $2 \cdot 10^5$  лет. Однако Вуд [136] указывает, что использовавшаяся на протяжении многих лет формула Реймерса не дает достаточно быстрого увеличения потери массы со светимостью на АВГ. Он же предполагает, что именно пульсационный период должен быть главным фактором в определении темпа потери массы.

В работах [130, 131] показано, что отношение потоков в линиях 25 мкм и 12 мкм ( $F_{25}/F_{12}$ ) является функцией оптической глубины оболочки; источники с тонкими оболочками будут ярче в коротких длинах волн вследствие вклада от «хвоста» рассеяния Рэлея — Джинса, лежащего в основе распределения энергии этих звезд. Темп потери массы имеет четко выраженную корреляцию с показателем цвета  $K = 11$  мкм. А кинематические свойства зависят от пульсационного периода как, например, высота над Галактической плоскостью. Для вычисления темпа потери массы используется уже не формула Реймерса, а модифицированная версия выражения других авторов.

Изучение широкополосных спектров в области длин волн от 1 до 100 мкм 23 углеродных ДПП (все звезды из каталога IRAS) показывает, что темп потери массы коррелирует с показателем цвета  $J - K$ :  $\lg(dM/dt) = -6.0/(J - K - 0.2) + 2.0$ , где  $dM/dt$  в  $10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$ , а  $2 \leq J - K \leq 7$ . Еще лучше он коррелирует с цветом  $K - L$ :  $\lg(dM/dt) = -9.0/(K - L + 1.4) + 2.75$ , где  $1 \leq K - L \leq 8$ . В рамках модели сферической пылевой оболочки с законом непрозрачности  $\propto \lambda^{-1.3}$ , температурой формирования пыли 950 К и с ускорением пыли до расстояний  $10^{15}$  см получен темп потери массы  $(0.1-50) \cdot 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$  [84].

Ван дер Вин и Руджерс [118] использовали поток в ОН-линии (1612 МГц), интенсивность которого изменяется пять раз за один цикл колебаний блеска, для определения темпа потери массы. С помощью соотношения

$$L_{\text{ОН}} = D^2 S_{\text{ОН}},$$



где  $L_{\text{OH}}$  — светимость в линии OH,  $S_{\text{OH}}$  — поток в линии OH,  $D$  — расстояние в килопарсеках, получено выражение

$$dM/dt = 1.8 \cdot 10^{-7} v_e S_{\text{OH}}^{0.5} D (f_{\text{OH}})^{-1},$$

где  $dM/dt$  — в единицах  $M_{\odot}/\text{год}$ ,  $S_{\text{OH}}$  — в Ян\*,  $f_{\text{OH}}$  — в единицах  $1.6 \cdot 10^{-4}$  (постоянное отношение между молекулами  $\text{H}_2$  и OH).

Теоретическое изучение потери массы холодными звездами не дает пока однозначного ответа на вопрос о его причинах. Упомянем основные обсуждаемые сейчас возможности. Конвекция в оболочках холодных звезд рождает поток механической энергии в хромосферу и корону, частично расходуемый на сброс вещества. Другая возможность связана с образованием пылинок в оболочке звезды. Давление излучения на пылинки обеспечит силу, необходимую для потери вещества. Большинство красных гигантов пульсирует. Нелинейные пульсации могут приводить время от времени к выбросу значительной массы. По крайней мере, ударные волны, рожденные звездной пульсацией, могут увеличить высоту однородной атмосферы и обеспечить, таким образом, достаточно большую плотность газа в точке конденсации пыли, что приведет к наблюдаемому значению темпа потери массы. В работе [25] была сделана оценка ускорения газа в результате давления излучения на молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  и CO. Результат действия этого механизма сильно зависит от массы и содержания элементов O и C. Бертре и Винтерс [85], изучив соотношения между показателями ИК-цветов и темпом потери массы для ближайших звезд (красных сверхгигантов, OH/ИК-звезд, углеродных и кислородных мирид), считают, что потеря массы от звезд типа Миры является результатом двух процессов: (1) диссипация импульса ударной волны, приводящая к уплотнению атмосферы, что, в свою очередь, дает начало образованию пыли, и (2) радиационное давление на пылевые частицы, которое дает начало истечению и ускоряет ветер до его окончательной скорости. Значения темпов потери массы для звезд были взяты из других работ, где они вычислены из скоростей потоков в линиях OH и CO.

Интенсивная потеря вещества существенно изменяет спектр интегрального излучения звезды. Пыль экранирует звезду от внешнего наблюдателя и перерабатывает оптическое излучение в инфракрасное.

Для ближайших красных гигантов с интенсивной потерей вещества возможно прямое обнаружение пылевой оболочки по поляризации света звезды.

Потеря вещества красными сверхгигантами со скоростью ( $10^{-6}$ — $10^{-4}$ )  $M_{\odot}/\text{год}$  позволяет объяснить наблюдаемые спектры инфракрасных и красных сверхгигантов переизлучением оптического излучения звезды с температурой поверхности 2000—3000 К пылью с температурой 300—1000 К. Этот подход ведет к довольно хорошему количественному согласию вычисленных спектров с наблюдаемыми [20].

#### 4. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ФОТОМЕТРИЧЕСКОМУ ПОВЕДЕНИЮ

Отдельной областью исследования является форма кривой блеска мириды. В классе звезд с переменностью типа Миры Кита есть огромное разнообразие подвидов, характеризующихся различными формами кривых блеска. Впервые такую классификацию провел Людендорфф [91]. Согласно этой классификации есть три главных разновидности кривых блеска: симметрич-

\*  $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Гц})$

ная, асимметричная и содержащая нестационарности (горб, двойной максимум и т. п.).

Однако у одной и той же звезды можно обнаружить признаки почти всех подклассов. И это понятно, поскольку процессы, идущие внутри звезды и в ее оболочке, отражаются на потоке энергии, который она излучает, а значит и на ее кривой блеска. Но эти изменения видны только при наблюдениях порядка десятков лет, а на протяжении всего нескольких последовательных циклов кривую блеска все же можно отнести к какому-нибудь одному определенному подклассу.

Ранее считалось, что кривая блеска, особенно в визуальной области спектра, не является фундаментальной характеристикой мириды, поскольку обусловлена влиянием полос молекул. Однако в 1980-х гг. стали появляться работы, свидетельствующие о том, что форма кривой изменения блеска в визуальной области несомненно связана с физическими свойствами звезды. В частности, асимметрия кривой блеска может быть связана с силой ударной волны, рожденной звездной пульсацией, так как оптические свойства силикатной пыли, которая конденсируется в потоке потери массы, зависят от физических условий во время процесса конденсации, в большой мере определяемого силой ударной волны. Индикатором этого процесса могут являться силикатные пылевые эмиссионные структуры около 9.7 и 18 мкм. Например, известно, что звезды с очень сильной особенностью на 9.7 мкм, имеют ярко выраженную асимметрию кривой блеска [121, 122].

Из этих соображений в работе [76] введены новые параметры, характеризующие кривую блеска ДПП (фурье-амплитуды составляющих кривую блеска гармоник, отношения между ними, сдвиги фаз, параметры крутизны ветвей) и рассматриваются корреляции между ними и основными параметрами (периодом, амплитудой блеска, асимметрией). Уже предварительный анализ показал наличие более 60 корреляций между этими параметрами. Следует отметить, что с асимметрией кривой блеска коррелирует 11 параметров из 25 вычисленных [77]. Кроме того, звезды явно разделяются по крайней мере на три группы: основная, промежуточная и малоамплитудная (углеродная). Циркониевые звезды лежат в области больших периодов и амплитуд, что скорее говорит об их поздней стадии на АВГ [12, 13]. Однако в работе [76] не были учтены пространственно-кинематические характеристики этих звезд.

Интересным выводом работы [11] является то, что изменение формы кривой блеска при движении в область больших периодов обусловлена изменчивостью только восходящей ветви. А для циркониевых и кислородных мирид поздних спектральных подклассов темп увеличения блеска уже не зависит от длины периода и становится постоянным, начиная с некоторого значения.

Часто для изучения формы кривой блеска применяется следующий метод. Кривая блеска аппроксимируется тригонометрическим полиномом вида

$$m(t) = a_0 - \sum_{k=1}^s r_k \cos(2\pi k(t - t_k)/P),$$

где  $s$  — степень тригонометрического полинома,  $r_k$  — полуамплитуда,  $t_k$  — начальная эпоха для максимума (или минимума) блеска колебания с периодом  $P_k = P/k$ . Вычисленные таким образом амплитуды для всех колебаний, складывающих кривую блеска, фазы максимумов и/или минимумов, сдвиги фаз относительно главного колебания, а также параметры крутизны ветвей, называются фурье-коэффициентами кривой блеска. Под-

робно этот метод описан в работе [33].

Для звезд одинакового периода фурье-амплитуда главного колебания кривой блеска уменьшается с переходом к более поздним спектральным подклассам [12], что, возможно, отражает эволюционные изменения для звезд с различными массами и металличностями.

Аналогичные зависимости между фурье-амплитудами разных гармоник кривых блеска и сдвиги фаз их максимумов рассмотрены в работе [39]. Также делается вывод о возможности исследования пульсаций мирид методом изучения фурье-коэффициентов средних кривых блеска.

Еще одна работа [47] включает анализ кривых блеска всех представителей ДПП — мирид (подтипов M — S — C), полуправильных (SR) и медленных неправильных (L) пульсирующих переменных. Получены различные зависимости, из которых явствует, что мириды заметно отличаются от полуправильных переменных, что снимает все сомнения относительно их обособленности. В то же время M-мириды и C-мириды сильно отличаются между собой свойствами кривых блеска. Колебания SR-звезд экстремально нестабильны. Особенно интересно, что большинство полуправильных переменных — мультипериодичны. Они показывают в основном два периода, отношение между которыми лежит в пределах  $1.7 \leq P_1/P_2 \leq 1.95$ . Находим у Вуда [135], что отношения фундаментальной моды к первому обертому  $P_0/P_1 \approx 3$ , а первого обертона ко второму  $P_1/P_2 \approx 1.2$ , и еще меньше для высших мод. Вероятно, полуправильные переменные пульсируют не только в радиальных модах, и найденные в работе [95] периоды принадлежат независимым колебаниям.

Еще одним интересным результатом работы [95] является то, что две мириды, S Tr1 и Y Per, считаются ошибочно классифицированными, так как их поведение больше характерно для SR-звезд. А пять звезд — T CVn, BG Cyg, Z Sco, S Aql, T Aql — лежат между SR и основной группой мирид. Они слишком стабильны, чтобы оказаться SR-звездами, но их амплитуды чрезвычайно малы по сравнению с миридами. Заметим, что эти два последних факта, а также определения периодов мультипериодических SR-звезд почти точно совпадают с выводами авторов работ [13, 34, 76, 80], что является лучшим доказательством их истинности.

Итак, анализ корреляций между фотометрическими параметрами кривых блеска мирид может привести к интерпретации их внутреннего строения, пульсационной активности и эволюционного статуса. Основную сложность представляет выбор модели процесса. Разнообразные модели учитывают одни эффекты, пренебрегая другими. В реальной же звезде все эффекты действуют одновременно. К тому же, рассматривая корреляции между средними параметрами одной выборки звезд, мы дополнительно включаем временной фактор, т. е. имеем модель процесса, которая эволюционирует во времени. Кроме того, неизвестны зависимости модельных параметров от массы и химического состава. В результате значения коэффициентов корреляции, рассчитанные между модельными и наблюдательными параметрами, могут значительно отличаться друг от друга, даже если модель процесса выбрана правильно. По крайней мере, относительно эволюционного статуса мирид можно сделать следующее предположение. Поскольку Кинан и Мак-Нейл [69] установили, что с увеличением периода спектр ДПП становится более поздним, можно принять, что короткие периоды (в однородной по кинематическим характеристикам группе ДПП) имеют звезды более раннего эволюционного статуса, и вычисленные для них фурье-коэффициенты различных параметров кривых блеска можно приписать ранним стадиям ДПП звезд асимптотической ветви. Однако и здесь нет полной определенности. Известно, что у мирид от максимума

блеска до минимума спектральный подкласс может изменяться на шесть единиц и более [115]. Можно ли использовать средний подкласс, как в работе [69], или необходимо выбирать минимум блеска, который считается «нормальным» состоянием мириды [16]? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо сравнить, на сколько различаются определения, сделанные по средним значениям спектральных подклассов и подклассам в минимуме блеска. На сегодняшний день таких определений нет.

Для решения вопроса о типе звездной пульсации необходимо сначала классифицировать все изменения фотометрических параметров, присущие ДПП, а затем провести классификацию звезд по этим параметрам. Подобная работа была проделана Марсаковой и Андроновым [97] для звезд типа Миры и Чинаровой и Андроновым [47] для полуправильных переменных. Изучая параллельно индивидуальные особенности поведения звезд (быстрые параболические изменения периода, аналогичные изменениям у  $R Aql$ ; изменения среднего блеска со временем, как у  $\chi Cyg$ ), можно получить информацию о возможном прохождении звезды через стадию гелиевой вспышки и/или переключении пульсационной моды [19, 35, 96]. Так например, исследованы кривые блеска звезд с прогрессивными изменениями периодов. У двух из них,  $R Aql$  и  $R Nu\alpha$ , наблюдается сильное уменьшение амплитуды, в основном за счет поярчания минимума. Если расположить эти звезды по изменениям амплитуды и наклонов ветвей кривой блеска, то образовавшаяся последовательность хорошо согласуется с положением этих звезд на различных стадиях гелиевой вспышки согласно существующим моделям. Например, согласно модели Вуда и Зарро [138], где даны зависимости светимостей во время вспышки и между вспышками от массы ядра, и сравнены темпы изменения периода с предсказанными по теоретическим вычислениям гелиевой вспышки.

Продолжая обзор статистических исследований ДПП, нельзя не отметить работы, связанные с исследованиями показателей цвета этих звезд. Одной из наиболее ранних работ является работа Стрелковой [24]. В ней сделана попытка классифицировать мириды по поведению кривых показателей цвета. Выделены четыре типа изменений показателя цвета относительно кривой блеска. I тип —  $CI$  изменяется в одной фазе с блеском (звезда в минимуме блеска краснее, чем в максимуме); II тип —  $CI$  изменяется в противофазе с изменением блеска (звезда в максимуме блеска краснее, чем в минимуме); III тип —  $CI$  изменяется незначительно; IV тип (и  $IV^*$  тип) — две волны изменения  $CI$  за один цикл изменения блеска (максимум показателя цвета соответствует поочередно максимуму и минимуму блеска или сдвинут на  $1/8$  периода. В последнем случае минимум  $CI$  соответствует максимуму и минимуму блеска). Однако у отдельной звезды на протяжении нескольких циклов изменения блеска могут встречаться практически все эти типы. Учитывая последнее, интересно было бы проверить наличие связи между типами кривых блеска (например, по Людендорффу [91]) и типами кривых показателей цвета (например, по работе [24]).

Перечислим еще несколько работ, касающихся показателей цвета.

Выведено соотношение между показателем цвета  $R - I$  и эффективной температурой  $T_{\text{эф}}$  у гигантов подклассов  $K0 - M3$  [120]. Найдена корреляция между спектральными классами, классами светимости и показателями цвета [7].

Наблюдаются также корреляции между показателями цвета и другими фотометрическими и фундаментальными параметрами ДПП. Киселева [9] показала, что величины показателей цвета  $U - B$  и  $V - R$  для индивидуальной звезды любого спектрального класса среди ДПП и  $B - V$  для титановых

(кислородных) звезд зависят от яркости звезды в максимуме блеска. S- и C-звезды такой корреляции не показывают для  $B - V$ , но разброс значений указывает на изменение показателей цвета при различных максимумах. Форма кривой цвета индивидуальной звезды вблизи максимума блеска изменяется мало. Однако амплитуда изменения  $V - R$  ДПП коррелирует с амплитудой изменения блеска (для всех типов ДПП). Построены также зависимости показателей цвета  $B - V$ ,  $V - R$  ДПП от периода. Было также найдено, что в среднем значения  $B - V$  для титановых переменных, имеющих большую пространственную скорость, меньше, а  $V - R$  — больше, чем для звезд с малой пространственной скоростью. Величины  $B - V$  и  $V - R$  ДПП зависят от величины относительного содержания O и C в атмосфере звезды. Уменьшение [O/C] (в последовательности M — S — C) имеет следствием увеличение  $B - V$  и уменьшение  $V - R$  [9].

В работе [55] опубликовано соотношение между эффективными температурами, показателями цвета и болометрическими поправками для гигантов класса M. Надо заметить, что переменные систематически смещены относительно области, занимаемой не переменными M-гигантами на зависимости «эффективная температура  $T_{\text{эф}}$  — цвет» [37]. Для данного показателя цвета (исследовались  $V - R$  и  $R - I$ ) переменные классифицируются примерно на 0.5 подкласса позже, чем не переменные. Там же найдено, что для данной абсолютной силы молекулярной полосы переменные с периодами меньше 300 дней имеют температуры континуума на 300 K выше, чем не переменные. Более долгопериодические переменные следуют соотношению для не переменных гигантов.

Содержание большого числа различных молекул в атмосферах ДПП обуславливает специфические особенности их переменности блеска. В атмосфере o Set, например, вблизи минимума блеска содержится на луче зрения около  $2 \text{ г/см}^2$  водяных паров. Сильные полосы  $\text{H}_2\text{O}$  титановых звезд спектральных классов M8 могут поглощать даже 1/4 часть излучения всей звезды. Полосы окиси титана сильнее всего влияют на величины  $B$  и  $V$ , и энергия, излучаемая звездой в видимой области спектра, составляет малую часть всей испускаемой ею энергии. Поэтому визуальный блеск звезды может сильно изменяться даже при небольших колебаниях общего излучения. Однако одной из главных характеристик мирид является изменение ИК-блеска [15].

##### 5. ПЕРЕМЕННОСТЬ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

Излучение в ИК-области спектра часто имеет неоднозначное объяснение по двум причинам. Во-первых, звездные фотосферы также излучают в ИК-диапазоне. Во-вторых, сильный звездный ветер часто связан с образованием пылевых частиц на больших расстояниях от звезды. Излучение этой пыли (с характерной температурой 600 K) добавляется к излучению других компонентов.

Так как все долгопериодические переменные имеют температуры менее 4000 K, максимум их излучения лежит за 1 мкм. В ИК-диапазоне имеются промежутки непрерывного спектра, свободного от линий. Это — область  $\lambda = 1.04 \text{ мкм}$ . Локвуд [89] получил кривые блеска в этой области для 13 ДПП звезд спектрального класса M10. Все исследованные звезды были переменны в спектральном диапазоне  $\lambda = 1.04 \text{ мкм}$  более чем на  $3^m$ . Максимум ИК-блеска запаздывает по отношению к визуальному на 0.1—0.2 периода.

Ле Бертре [83] была проведена многоцветная ( $U, B, V, R, I, J, H, K, L, M, N, N_1, N_2, N_3, Q_0$ ) фотометрия и показано, что с увеличением длины

волны экстремумы имеют тенденцию наступать раньше. Кроме того, замечено, что амплитуды уменьшаются с увеличением длины волны и примерно постоянны, начиная с  $\lambda = 3.5$  мкм до 10 мкм. Так, для мириды OH/IR 286.50+0.06 амплитуды в  $JHKL$ M-полосах равны соответственно 2.87, 2.11, 1.44, 0.89,  $1.02^m$ . Такие же выводы следуют из ИК-фотометрии на  $\lambda = 1...10$  мкм [61].

В результате многочисленных исследований мирид в ИК-диапазоне обнаружены также корреляции между периодом переменности, амплитудой на  $\lambda = 2.2$  мкм, показателем цвета [3.5 мкм] – [10 мкм], расстоянием по лучевой скорости двух пиков мазерного излучения молекулы OH и наличием эмиссии  $H_2O$ . Кроме того, двухцветные диаграммы (например,  $J - H - H - K$ ) позволяют проводить сравнение с нормальными (не переменными) М-гигантами [70]; исследовать корреляции между показателями цвета и периодами; сравнивать ДПП между собой и разделять звезды по характерным признакам, что, в конце концов, приводит к определению их физической природы.

Аналогичные зависимости, только для большего числа звезд, рассматриваются в работе [129]. Представлены данные  $JHKL$ -фотометрии для 193 ДПП. Обсуждаются различные соотношения период — цвет. Зависимости  $J - H - \lg P$ ,  $H - K - \lg P$ ,  $K - L - \lg P$  и  $J - K - \lg P$  аппроксимированы методом наименьших квадратов, и выделены две последовательности ДПП. При данном периоде одинаковые величины в этих двух группах имеют звезды с разными спектральными классами и ИК-цветами. Звезды более коротких периодов ( $\lg P < 2.35$ ) имеют цвета, характерные для мирид в шаровых скоплениях. Прямым продолжением этой работы является изучение очень красных звезд (27 углеродных и 31 кислородной) из каталога IRAS и RAFGL в полосах 12, 25 и 60 мкм [103]. Приведены средние кривые блеска в  $K$ -полосе; построено распределение периодов O- и C-звезд; построены зависимости «амплитуда в полосе —  $\lg P$ ». Амплитуда уменьшается с увеличением длины волны, при этом средний коэффициент корреляции  $\rho = -0.93$ . Кроме этого, в работе [103] построена диагностическая диаграмма, определяющая несколько районов, в каждом из которых доминирует определенный тип объектов. В результате определены болометрические поправки, оценены расстояния до объектов, вычислены абсолютные болометрические величины и светимости. Использовалась зависимость

$$M_{bol} = -2.34 \lg P + 1.26.$$

Средняя светимость для всех звезд с периодами меньше 1000 сут получилась равной  $(0.98 \pm 0.17) \cdot 10^4 L_{\odot}$  или  $M_{bol} = -5.23 \pm 0.19$ . Также были оценены темпы потери массы, которые оказались равными  $0.87 \cdot 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$  для звезд с  $P < 1000^d$  и  $1.3 \cdot 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$  для звезд с  $P > 1000^d$ .

В работе [86] определены  $T_{эф}$  и болометрические поправки для сверхгигантов класса М по наблюдаемым распределениям энергии в области спектра  $\lambda\lambda$  0.36—3.4 мкм и оценкам потока излучения на больших длинах волн.

Фист [53] предположил, что соотношения «ИК-цвет — период» могут быть использованы для исследования различий металличностей мирид в разных звездных системах. Интересным результатом этой работы является вывод зависимости  $T_{эф}$  от  $(J - K)_0$ , которая скомбинирована из таких зависимостей для мирид и не мирид, звезд М-типа:  $\lg T_{эф} = -0.590(J - K)_0 + 4.194$ . Из анализа этого соотношения выведено, что мириды в БМО с периодами в пределах от 200 до 300 сут имеют средние металличности около  $\lg Z = -0.6$ , а в Sgr I (галактический балдж) это значение близко к  $-0.2$ .

Важное спектроскопическое свойство мирид в ИК-области — наличие сильной абсорбционной системы полос  $\text{H}_2\text{O}$ , которые проявляются слабее или отсутствуют в М-гигантах и сверхгигантах. Особенно сильные и широкие полосы водяного пара мириды имеют на  $\lambda\lambda = 1.4$  и  $1.9$  мкм [70]. Однако это не согласуется с определениями Тернера и Хейлиса [116] максимальной температуры мирид, которая, по-видимому, близка к 3100 К. Молекулы воды диссоциируют при  $T = 2500$  К. Возможно, полосы  $\text{H}_2\text{O}$  формируются в удаленных от звезды областях.

У звезд с очень протяженными атмосферами и со звездным ветром, оптически толстым в некоторых областях спектра, радиус может зависеть от длины волны, что приводит к занижению  $T_{\text{эф}}$ . Диаметры звезд  $\sigma$  Ceti и R Leo в сильных полосах поглощения TiO вдвое превосходят их диаметры в континууме [81, 88]. Принято, что «истинными» являются диаметры при  $\lambda \approx 2$  мкм [53]. При этом, однако, необходимо учитывать потемнение к краю. Например, в работе [110] так был измерен угловой диаметр  $\sigma$  Ceti и вычислена средняя эффективная температура  $2270 \pm 140$  К.

У ДПП имеется избыток ИК-излучения. Он представляет собой добавку к той интенсивности излучения, которую можно ожидать у черного тела с цветовой температурой, определяемой по спектральному типу звезды. Согласно современным представлениям, избыточное излучение возникает в пылевой оболочке, окружающей центральную звезду, которая переизлучает поглощенную из УФ- и оптического диапазона энергию в виде ИК-излучения.

Распределение энергии в спектрах двух самых ярких звезд позднего типа с ИК-избытками — NML Cyg (звезды типа Миры) и известной углеродной OH/ИК-звезды IRC+10216 — можно интерпретировать как чернотельное излучение фотосферы с  $T_{\text{эф}} \approx 2000$  К плюс избыточное излучение на  $\lambda\lambda = 8$ —14 мкм, а в некоторых случаях — на  $\lambda = 20$  мкм, которое характерно для силикатных частиц (например  $\text{MgSiO}_4$  и  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ). Следует отметить, что во всех случаях крайне больших ИК-избытков радиоастрономы обнаружили также излучение OH от этих звезд.

Что касается объекта IRC +10216, то это углеродная звезда ( $T = 2000$  К), окруженная обширной пылевой оболочкой, в основном состоящей из графитовых частиц. На оптических фотографиях звезда выглядит как протяженный объект  $18.0^{\text{m}}$ . На  $\lambda = 2$  мкм источник переменный с периодом 600 сут [15].

ИК-звезды получили название OH/ИК-звезд, так как они показывают сильную эмиссию OH  $\lambda = 18$  см, и максимум их излучения лежит около  $\lambda = 10$  мкм. OH/ИК-звезды являются продолжением последовательности красных гигантов в область низких температур. Они обладают экстремально высоким темпом потери массы, в некоторых случаях до  $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$ . Большинство этих звезд — переменные типа Миры. Эффективные температуры их не превышают 1000 К, а показатель цвета  $I - K$  — не меньше  $6^{\text{m}}$ . Известные OH/ИК-мириды: TX Cam, IK Tau, RW And, WX Ser. OH/ИК-звезды подробно рассмотрены в обзоре [62].

В спектрах ДПП есть слабый избыток излучения в интервале 0.7—8 мкм, и особенно хорошо заметен у таких звезд, как S Per, VX Sgr.

В спектрах титановых (M) звезд в области  $\lambda \approx 1$  мкм и более коротких длин волн доминирующими являются полосы TiO: ИК-система TiO с острой головой у  $\lambda = 885.9$  нм лучше пригодна для классификации звезд от M2 до M8; около  $\lambda = 1015.0$  нм — для звезд позже M8, M9, и VO-система — доминирует в M10.

Полосы  $\text{H}_2\text{O}$ , как и VO, приобретают наибольшую интенсивность только в спектрах холодных титановых и циркониевых (S) звезд.

Полосы CN обнаруживаются во многих спектрах ДПП. Самые интенсивные CN-полосы красной системы с многократной головой около  $\lambda = 1090.0$  нм. Полосы ZrO начинаются около  $\lambda = 929.9$  и  $931.5$  нм.

Полосы молекул CO наблюдаются в атмосферах титановых звезд вблизи  $\lambda = 1.56$  мкм и около  $\lambda = 2.4$  мкм в углеродных звездах.

В углеродных и кислородных ДПП давление излучения на частицы в околосредных оболочках выталкивает пыль в межзвездную среду, приводя к вкладу в межзвездную пыль около  $3 \cdot 10^{-3}$  солнечных масс в год по всей Галактике.

#### 6. МАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОБОЛОЧЕК ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Кроме интегральной (визуальной) кривой блеска, периода и ИК-светимости, к фундаментальным характеристикам мириды, которые можно определить из наблюдений, можно отнести и потоки в мазерных радиополосах. Последние также коррелируют с визуальным блеском звезды.

Три вида околосредного мазера, открытые у многих АВГ-звезд (ОН,  $H_2O$ , SiO), обладают переменностью излучения, несомненно связанной с переменностью излучения самой звезды.

Суть мазерного механизма сводится к следующему. Для возникновения мазера необходимо участие как минимум трех уровней рабочих молекул. Посредством некоторого механизма (накачки) производится переброс молекул с уровня 1 на уровень 3, откуда они достаточно быстро совершают переход на уровень 2. При выполнении некоторых условий возможно возникновение избытка населенностей уровня 2 относительно уровня 1. Эта ситуация соответствует случаю, когда согласно формуле Больцмана, описывающей распределения молекул по уровням,

$$n_2/n_1 = (g_2/g_1)\exp(-E_{21}/kT_{x21}),$$

температура  $T_{x21}$  возбуждения перехода 2—1 становится отрицательной, и возникает инверсия населенностей по отношению к термодинамически равновесному случаю. При прохождении через эту область пространства квантов с частотой перехода 2—1 возникает лавина индуцированных переходов, что приводит к многократному усилению излучения в линии 2—1 [22].

В 1965 г. было открыто мазерное излучение вблизи длины волны  $\lambda = 18$  см, соответствующее переходам между подуровнями  $\Lambda$ -удвоенного основного состояния радикала ОН. Спустя четыре года были открыты источники эмиссии на длине волны вращательной линии  $\lambda = 1.35$  см молекулы  $H_2O$  (рис. 4). А еще позже была открыта эмиссия, принадлежащая SiO.

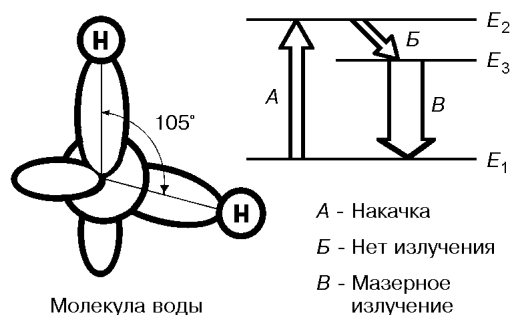


Рис. 4. Схема возникновения индуцированного мазерного излучения



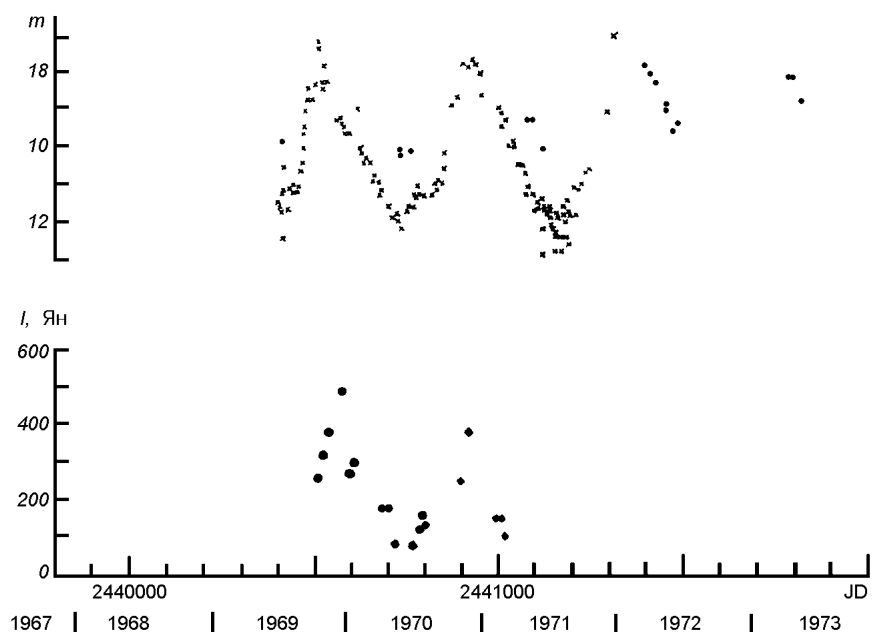


Рис. 5. Корреляция потока в линии  $\text{H}_2\text{O}$  (внизу) с визуальными максимумами звезды (вверху) U Геркулеса. Статистические погрешности в пределах величины точек [23]

Профили линий излучения ОН (в основном 1612 МГц) у звезд состоят из двух пиков, разделенных по лучевой скорости на величину от нескольких км/с до нескольких десятков км/с. Каждый из пиков, в свою очередь, может состоять из нескольких компонентов. Интенсивность излучения резко падает на внешних краях профиля и плавно уменьшается до нуля к середине. Выяснено, что разность лучевых скоростей двух пиков в профиле линии ОН тем больше, чем выше светимость звезды. Наиболее вероятна модель расширяющейся газопылевой оболочки, дающая характерную структуру профиля линии ОН. Модель позволяет объяснить наличие двух пиков, а также переменность излучения ОН, коррелирующую с оптической переменностью звезды. Изменения интенсивности «красного пика» запаздывают по сравнению с переменностью «синего пика». По величине фазовой задержки можно определить линейные размеры оболочки вдоль луча зрения. Получены величины в пределах  $(0.3\text{--}45.6) \cdot 10^{16}$  см [22].

Классификация источников ОН-мазера, связанных с оболочками ДПП, приведена, например, в работе [70]. Указано, что источники можно выделить в три группы: 1) сильные линии 1665/1667 МГц — ассоциируются с переменными типа Миры или полуправильными М-типа с малым или отсутствующим ИК-избытком за 3 мкм; 2) сильная сателлитная линия  $\lambda = 1612$  МГц — источники ассоциируются с миридами, которые показывают избыток за 3 мкм; 3) сверхгиганты ОН/ИК, такие как S Per, AN Sco.

Согласно модели, предложенной Бурдюжей и др. [2], «красные» компоненты 1612 МГц расположены на периферии оболочки М-звезды, а «синие» компоненты располагаются впереди ударного фронта волны, проходящей через фотосферу и оболочку. Компоненты 1665 и 1667 МГц ОН-мазера и мазер  $\text{H}_2\text{O}$  расположены за фронтом ударной волны, ближе к фотосфере. В качестве механизма накачки предлагается ИК-излучение разных длин волн.

Излучение  $\text{H}_2\text{O}$ -мазеров переменного в гораздо большей степени, чем излучение ОН-мазеров. Обращает на себя внимание появление, а затем

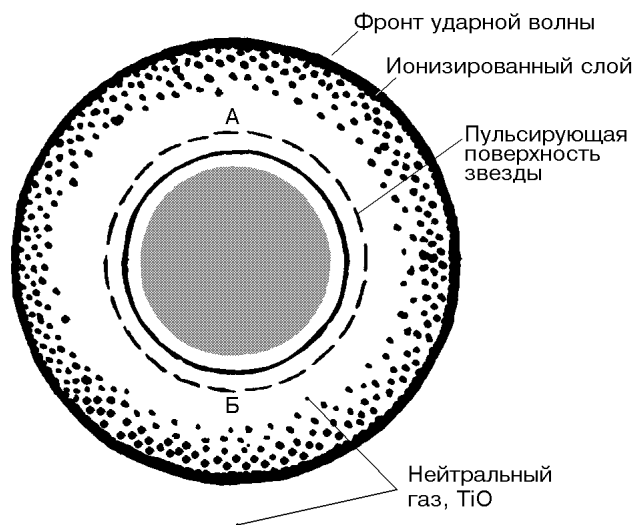


Рис. 6. Пульсирующая поверхность мириды. Буквами А и В показаны границы фотосферы, размер которой порядка 1—2 а. е. [14]

угасание мощных эмиссионных деталей за время всего 2-3 месяца («вспышки»  $\text{H}_2\text{O}$ -мазеров). Вспышка может сопровождаться усложнением структуры профиля. Новые детали часто появляются на лучевой скорости, отличающейся от наблюдавшейся ранее на 2—3 км/с. Корреляция потока в  $\text{H}_2\text{O}$  с визуальным блеском звезды носит сложный характер (рис. 5).

Структура профилей мазерных линий SiO у звезд разнообразна. Наблюдается от одного до трех эмиссионных пиков. Лишь у нескольких звезд имеется четкая «оболочечная» структура профиля, подобная той, которая наблюдается в линии  $\nu = 1612$  МГц. Наблюдается сильная переменность потока в линиях SiO. Излучение SiO часто поляризовано, обычно линейно, степень поляризации 15—30 %. Как показали наблюдения звезды R Cas, степень поляризации  $p$  и позиционный угол  $\Theta$  могут изменяться с фазой оптической переменности звезды  $\varphi$ . Непосредственно перед оптическим максимумом  $\varphi = 0.96$  степень поляризации резко уменьшается, а  $\Theta$  испытывает скачок. Этот эффект может быть связан с прохождением ударной волны через область генерации мазерного излучения. На рис. 6 показаны эти области.

РСДБ-наблюдения показывают, что излучение SiO, по-видимому, возникает во внутренней области околозвездной оболочки, вблизи фотосферы. Можно представить общую структуру мазерной звезды (рис. 7) [51]. Масштаб на рис. 7 не соблюден. Область образования пыли (и мазера  $\text{H}_2\text{O}$ ) находится на расстоянии порядка 10 радиусов звезды, а мазер OH локализуется на расстоянии порядка 100 радиусов звезды.

Следует также отметить, что обнаружено мазерное излучение и от углеродных мирид. Это — SiS (у звезды CW Leo = IRC + 10216), CO (V Hya), HCN и  $\text{H}_{13}\text{CN}$  (Y CMA). Наконец, в двух углеродных звездах (EU And, V778 Cyg) обнаружено мазерное излучение  $\text{H}_2\text{O}$   $\lambda = 1.35$  см. Одно из объяснений [133] состоит в том, что эти звезды находятся в краткосрочной фазе перехода от спектрального класса М к классу С, причем фотосфера звезды уже показывает детали, характерные для углеродных звезд, в то время как околозвездная оболочка еще богата кислородом. Другое объяснение — звезды являются двойными: одна из звезд пары принадлежит классу М и содержит в своей оболочке мазер  $\text{H}_2\text{O}$ , а другая звезда относится к классу С. Однако, учитывая, что мазерное излучение очень чувствительно к изменению условий в окружающей его среде (а в случае двойных звезд это неизбежно), второе объяснение кажется маловероятным.

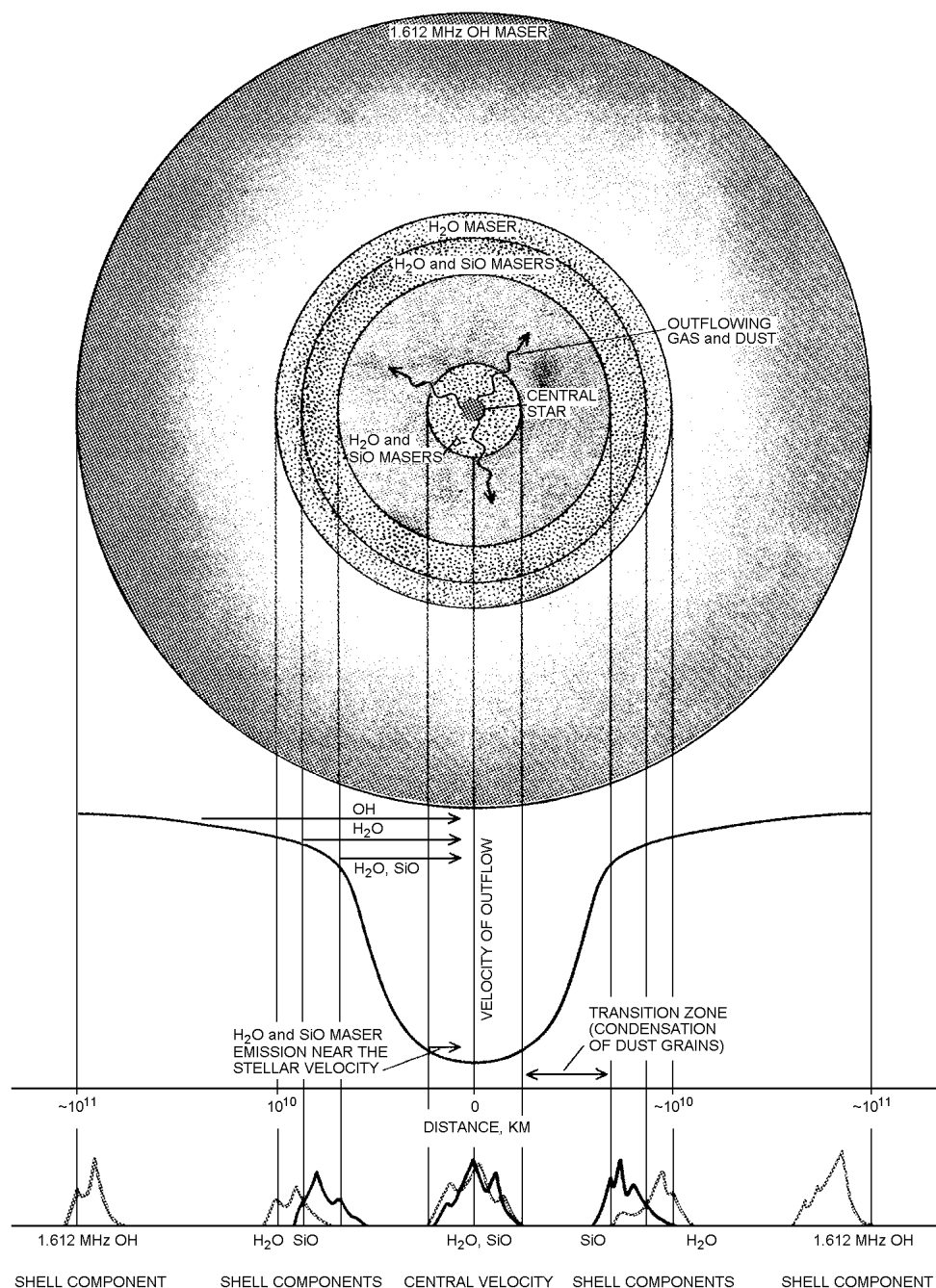


Рис. 7. Схематическая картина красной переменной звезды показывает видимое распределение трех основных околозвездных мазеров. Газ и пыль, выброшенные из звезды, ускоряются под воздействием радиационного давления. U-образная кривая — профиль «скорости истечения». Мазеры найдены в областях, где газ ускоряется плавно [51]

Увеличение чувствительности приемников мазерного излучения позволило обнаружить излучение от большего количества звезд, чем раньше. Таким образом, можно предположить, что от каждой мириды идет излучение в каких-либо мазерных линиях, но интенсивность его различна и зависит, например, от мощности ударной волны, накачивающей H<sub>2</sub>O-мазер,

или инфракрасного излучения и количества пыли, необходимых для возникновения ОН-мазера.

Условно можно разделить ДПП-звезды на мазеры (от которых излучение обнаружено) и не мазеры (от которых излучение не обнаружено). Есть много указаний на то, что мириды, по всем своим фотометрическим параметрам (периоду, спектральному классу и т. д.) относящиеся к более поздним объектам, являются более мощными источниками мазерного излучения.

Исследования показали, что интенсивные вспышки  $\text{H}_2\text{O}$ -мазера часто связаны с более яркими максимумами визуальной кривой блеска звезды [23]. Излучение в  $\text{H}_2\text{O}$  запаздывает по отношению к максимуму визуального блеска на 0.1—0.2 по фазе (рис. 5). Таким образом, интересную информацию можно получить, сравнивая одновременные наблюдения изменений блеска звезды и потока в мазерных линиях.

Изучение мазерных линий водяного пара показывают хорошую корреляцию с потерей массы звездами [58]. В работе [63] сообщается об открытии зависимости переменности профиля  $\text{SiO}$ -мазерной линии от фазы визуальной переменности у 30 звезд типа Миры и SR. Предполагается, что переменность мазера обусловлена пекулярным движением газа и вариацией физических условий в связи со звездными пульсациями.

Особый интерес представляет изучение механизма прохождения ударной волны через фотосферу и атмосферу мириды. Ранее было показано, что ударная волна может распространяться на большие расстояния от звезды. После прохождения ударной волны через фотосферу ДПП скорости реакций релаксации газа не всегда достаточны для достижения равновесных условий к началу следующего цикла пульсаций. Это может проявляться на кривой блеска в виде различных эффектов (изменение высоты максимума и глубины минимума, их продолжительностей). В частности, наблюдательным проявлением прохождения ударной волны может являться горб на кривой блеска мириды. У звезд с такой особенностью к тому же пик мазерной линии  $\text{H}_2\text{O}$  имеет раздвоенную структуру. Если эти эффекты взаимосвязаны, то все звезды, имеющие раздвоенную структуру мазерной линии, должны иметь горб на кривой блеска, пусть даже не во всех циклах переменности блеска.

Во время пульсационного движения атмосферный газ испытывает ускорения и замедления. Так, возможно, и вызываются ударные волны. Их наблюдательными проявлениями можно считать разрыв в кривых лучевых скоростей [65] и наличие эмиссионных линий в спектре.

В газе движение вещества со сверхзвуковой скоростью дает ударную волну [17]. Скорость звука  $a_s$  оценивается формулой  $a_s \approx 11700\sqrt{T_0}$  (где  $T_0$  — температура невозмущенной атмосферы), и для  $3000 \text{ K} \leq T_0 \leq 30\,000 \text{ K}$  имеем  $5 \leq a_s \leq 20 \text{ км/с}$ .

Жийе и др. [57] показали, что скорости порядка 40 км/с достаточно для того, чтобы возникла эмиссия водорода. Он же считает, что корреляция между периодом пульсаций мирид и ударной волной должна быть значительной. Из наблюдений эмиссионных профилей линии  $\text{H}_\alpha$  Миры Кита в 1982 и 1983 гг. около максимума светимости видно, что фаза появления эмиссии может быть различна от одного периода колебаний к следующему. Предполагается, что эта фаза может быть связана с интенсивностью ударной волны и может коррелировать с изменением периода и амплитуды.

Таким образом, в атмосфере ДПП имеется ряд слоев с различными физическими условиями. Та область атмосферы, где образуется эмиссионный спектр, вначале находится глубоко, и излучение, идущее оттуда, экранируется поглощающими молекулами, находящимися во внешних сло-

ях атмосферы. С течением времени экранирование уменьшается, что означает перемещение слоя из области его образования наружу. Под этим слоем также имеется область, содержащая молекулы. Детальный анализ одной из мирид показал, что в ее атмосфере есть две области образования эмиссионного спектра: одна с температурой  $T = 3500$  К, в которой образуются полосы СО и ОН, а другая с  $T = 1000$  К, спектр которой характеризуется линиями металлов низкого возбуждения. При увеличении блеска в спектре появляются эмиссионные линии водорода, смещенные в коротковолновую сторону, причем это смещение до максимума блеска увеличивается, а после максимума — уменьшается [5].

По мере продвижения волны наружу в пройденных ею слоях атмосферы ионизация водорода и температура уменьшаются. Ниже слоя, излучающего яркие линии водорода, находится слой, в котором водород почти не ионизован; поглощение излучения в нем происходит за счет атомов металлов. В таком же состоянии будут наружные слои атмосферы, до которых ударная волна еще не дошла. Наблюдается раздвоение линий абсорбционного спектра. В газе за фронтом волны происходит диссоциация молекул TiO, которая как бы «просветляет» атмосферу звезды в визуальной области спектра. Можно сказать, что минимум блеска мириды — это, по-видимому, и есть ее нормальное состояние, а максимум блеска — «возбуждение» под действием ударной волны. При уменьшении блеска звезда становится краснее, а молекулярные полосы в ее спектре — интенсивнее [15]. Излучение в линиях водорода может достигать 1 % от всего излучения звезды типа Миры Кита.

Горбацкий [6] показал, что общая энергия, излучаемая в эмиссионных линиях, того же порядка, что и диссипирующая энергия волны. Она составляет около  $10^{28}$  Дж/с, что на два порядка меньше светимости звезды, поэтому долгопериодические изменения блеска не являются результатом непосредственного воздействия волны.

Бертшингер и Шевалье [41] получили полуаналитическую модель для временно-зависимой структуры звездной атмосферы, пересекаемой периодическими ударными волнами. Модель применена к переменным типа Миры и показывает хорошее согласие с наблюдениями колебательно-вращательных полос СО  $\Delta\nu = 3$  у четырех переменных типа Миры (*o* Ceti, T Cep,  $\chi$  Cyg, R Cas). Модель дает возможность определять радиус, силу удара и плотность в слое, где формируются линии. Имея, таким образом, полное гидродинамическое описание области, экстраполируя модель для описания большей области по радиусу и вычисляя модельную кривую ударной светимости, авторы заключают, что на ранних фазах визуальная светимость переменных типа Миры подавляется ударной волной  $L_s \sim 10^4 L_\odot$ .

Определенные из наблюдений скорости ударной волны оказываются весьма разнообразными, от 25—35 км/с [5] до 50—70 км/с, а для отдельных звезд — до 90 км/с [57].

Подробный обзор и анализ работ об ударных волнах в ДПП дан в работе [46]. В частности, указывается на то, что Жийе [57] получил высокие скорости ударной волны для *o* Ceti и S Car, интерпретируя профиль  $H_\alpha$  выходом одиночной ударной волны. Однако другие исследователи из анализа эмиссионных и абсорбционных линий находят меньшие скорости распространения ударного процесса, предполагая, что не менее двух ионизирующих ударов движутся одновременно через атмосферу мириды. В этом случае скорость  $V_s$  может не превышать 20—25 км/с.

Распространение периодических ударных волн в атмосфере звезды сильно сказывается на структуре ее атмосферы. Именно ударные волны

могут являться источником возникновения мазерного эффекта. В частности, ударные волны влияют на потерю массы, конденсацию пыли, увеличение размеров атмосферы.

Результаты узкополосной ИК-фотометрии 256 кислородных мирид [32] позволили промоделировать кривые показателей цвета, сравнить их с наблюдаемыми и подтвердить, что фазовое запаздывание между показателями, обусловленными оксидом титана и оксидом ванадия, являются результатом распространения возмущений в расширяющейся атмосфере.

Рекомбинирующий газ за фронтом ударной волны излучает также и в радиоконтинууме, посредством тормозного механизма. Был оценен теоретический поток такого излучения —  $F_\nu \sim 100$  мЯн при радиусе ударного фронта  $r_s \sim 5 \cdot 10^{13}$  см, температуре ионизованного газа за фронтом ударной волны  $T = 20\,000$  К, расстоянии до звезды  $D = 100$  пк,  $\nu = 3 \cdot 10^{10}$  Гц [111]. У мириды R Aql ( $D \sim 300$  пк) в октябре 1978 г. наблюдалось радиоизлучение на 14.9 ГГц с плотностью потока  $5.3 \pm 2.0$  мЯн, а в августе 1985 г. — 0.54 мЯн на той же частоте. Эта величина  $F_\nu$  дает величину яркостной температуры  $T_B = 18\,000$  К.

Рассматриваемые в настоящее время теоретические модели движений в атмосферах предполагают сферическую симметрию. Наблюдения же показывают, что такое предположение не имеет достаточных оснований.

Во-первых, исследования собственной поляризации [29] показывают зависимость степени поляризации от длины волны. Для возникновения поляризации интегрального излучения звезды необходимо, чтобы пространственное распределение рассеивающей свет материи существенно отличалось от сферически-симметричного. Эта асимметрия может быть связана или с концентрацией вещества протяженной оболочки к некоторой плоскости, например, к экваториальной плоскости звезды, или с наличием в оболочке локальных конденсаций, или с направленным выбросом (истечением) материи из более глубоких слоев атмосферы. Если эти неоднородности располагаются на уровне, близком к уровню образования непрерывного спектра, то они должны сказываться на изменении блеска. Возможно, что отклонения от строгой периодичности в изменении всех характеристик ДПП связаны именно с нарушением сферической симметрии.

Во-вторых, выявлена неоднородность распределения Ca II на поверхности некоторых ДПП. Отмечено наличие «ярких пятен» в атмосфере, где возникает излучение в линиях бальмеровской серии. Быстрые изменения блеска в ИК-диапазоне с характерным временем нескольких часов, иногда начинающиеся со спада, не могут быть обусловлены изменением атмосферы в целом, поскольку размеры звезды превышают  $10^{14}$  см, а скорость распространения возмущений не должна превышать звуковую.

В-третьих, наблюдения в мазерных линиях  $H_2O$  и OH указывают на значительную неоднородность вещества, начиная с уровня  $\sim 10^{15}$  см.

Отклонения от сферической симметрии должны возникать вследствие различных неустойчивостей (например, конвективные движения). Другой возможный эффект — неустойчивость самих ударных волн — возникает при движении волны в среде с быстро убывающей плотностью. Кроме того, в условиях очень протяженной атмосферы, нагретой ударной волной, может возникнуть тепловая неустойчивость. Развитие неустойчивостей делает структуру атмосферы неоднородной: в ней образуются уплотнения. Так как скорость процессов образования молекул и конденсации пыли сильно зависит от плотности среды, в областях с повышенной плотностью молекулярное поглощение пылью больше. Этот эффект при достаточно большом масштабе уплотнений может быть наблюдаем. К сожалению, из-за отсутст-

вия практически для всех видов неустойчивостей нелинейной теории пока затруднительно с уверенностью оценить размеры возникающих неоднородностей и другие их характеристики. Отклонения от сферической симметрии могут быть вызваны и наличием достаточно близкого спутника звезды. Визуальная двойственность наблюдается у некоторых мирид. Сама Мира — визуально-двойная, спутник *o* Ceti — белый карлик класса В с периодом обращения около 750 лет, окружен вращающимся газовым диском, который предполагается аккреционным [125].

Однако индикатором двойственности в некоторой степени может служить мазерное излучение, которое чрезвычайно чувствительно к изменению условий (кроме, может быть, SiO-мазера, который располагается очень близко к фотосфере звезды). У двойных звезд, скорее всего, будет отсутствовать излучение в радиолиниях  $H_2O$  и OH.

С изменением блеска звезды изменяется и степень поляризации ее излучения для тех мирид, для которых наблюдается значительная собственная поляризация. Минимальному значению блеска звезды соответствует более высокая степень поляризации, чем максимальному. Высокая степень поляризации наблюдается у звезд с  $P > 350$  и  $P < 200$  сут [4].

В работе [52] изучено поведение параметров поляризации трех звезд типа Миры — T Her, S CrB и V CrB — одновременно с их фотометрическим поведением. Показано, что быстрое увеличение поляризации имеет место не только на фазе 0.8 (так называемая «точка эрупции» — выброс пыли), но и на других фазах около минимума визуального блеска.

Итак, атмосферу звезды типа Миры можно рассматривать разделенной на следующие области: 1) гравитационно связанная фотосфера; 2) хромосфера/корона, которая есть у некоторых, хотя и не у всех поздних гигантов; 3) оболочка, находящаяся в стадии расширения и не связанная гравитационно со звездой (внешняя оболочка). Хромосфера проявляет себя через эмиссионные линии *H* и *K* Ca II, резонансные линии Mg II в ультрафиолете и линии бальмеровской серии [90].

Кроме упоминавшейся выше работы [41], в последнее время появились еще работы, где рассчитываются динамические модели атмосфер АВГ-звезд. Например, в серии работ Хефнер и др. [66, 67] сформулированы основные проблемы создания динамических моделей атмосфер, на которые оказывают влияние ударные волны, рожденные звездными пульсациями, и проведено исследование углеродных звезд путем сравнения синтетических спектров с наблюдениями. Исследована зависимость структуры атмосферы и ее переменность, связанная со звездной пульсацией, молекулярной непрозрачностью и формированием пыли. В частности, обсуждается влияние отношения C/O на непрозрачность газа. Построенные в [67] динамические модели атмосфер указывают, что радиационное давление на молекулы может вносить вклад в управление звездным ветром в обоих типа О- и С-звезд.

## 7. ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ И ТЕОРИЯ ПУЛЬСАЦИЙ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС И РАДИУСОВ ДПП

Переменные звезды типа Миры Кита являются старыми звездами (их возраст превышает  $10^9$  лет) очень поздних спектральных типов. Предполагается, что все они находятся на стадии двойного слоевого источника и во второй раз поднимаются на диаграмме Герцшпрунга — Рассела вдоль ветви гигантов, т. е. принадлежат к асимптотической ветви АВГ. Их светимость слишком изменчива, чтобы быть порожденной первым рукавом гигантов (ВГ), у которых в оболочке вокруг ядра выгорел только водород [90].

Критический момент для звезды на главной последовательности наступает, когда термоядерная реакция превращения водорода в гелий в центре звезды затухает (масса гелиевого ядра достигает 10—12 % массы звезды). Начинается перестройка структуры звезды. Она вызывает переменность красных гигантов. Звезды начинают пульсировать.

Внутреннее строение большинства пульсирующих звезд таково, что они обладают значительной концентрацией массы к центру: плотность вещества в центре на несколько порядков превышает среднюю плотность звезды. Из-за неоднородного (по плотности) распределения вещества пульсации не гомологичны: относительные амплитуды в центре намного меньше, чем на поверхности. Таким образом, пульсации происходят в основном в оболочке звезды. Они практически не затрагивают более глубокие области, где протекают термоядерные реакции [10].

Пульсирующие области должны накапливать или поглощать тепло в фазе наибольшего сжатия и терять его в фазе наибольшего расширения. В этом случае давление в соответствующих областях звезды будет достигать максимума после максимума плотности. Такое может быть в областях, где элемент с высоким содержанием примерно наполовину ионизован. Кроме того, эти области должны располагаться неглубоко. Согласно теории адиабатических колебаний, когда радиус звезды минимален, светимость — максимальна. В это время области с наполовину ионизованным элементом находятся в сжатом состоянии. Для пульсаций в основной моде такая ситуация будет приблизительно по всей звезде, а для более высоких гармоник — в области, внешней по отношению к самому близкому к поверхности узлу колебаний. Только такие самые внешние области и заслуживают внимания при рассмотрении высоких гармоник.

У большинства пульсирующих звезд, за исключением самых внешних областей, колебания происходят почти адиабатически и представляют собой стоячие волны, поэтому положения узлов (в случае обертоновых пульсаций) со временем не изменяются. Период собственных колебаний (для какой-либо моды) определяется в основном средней плотностью вещества звезды, т. е. ее полной массой и радиусом. Пульсационная константа немного зависит от внутреннего строения звезды (чем больше концентрация вещества к центру, тем меньше период основной моды при заданных массе и радиусе) [26].

Однако анализ адиабатических пульсаций, хорошо описывая механические свойства, давая точные значения периодов и правильное представление о распределении амплитуды пульсации вдоль радиуса, не может дать никакой информации о причинах пульсационной неустойчивости звезды.

В случае долгопериодических переменных, наиболее вероятной причиной пульсационной неустойчивости служит ионизация водорода в сравнительно тонкой радиативной оболочке, расположенной непосредственно под фотосферой [20].

Представителями одного из классов пульсирующих красных гигантов являются долгопериодические переменные — звезды типа Миры Кита (мириды). Средние характеристики красного гиганта таковы: радиус  $R = 10^{13}$  см, эффективная температура  $T_{\text{эф}} = 2000$  К, средняя плотность  $\rho = 10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>. Пульсации происходят в динамической шкале времени  $t$ . Это время свободного падения, т. е. время, связанное с динамическим коллапсом объекта или с орбитальным движением спутника на очень близком расстоянии от поверхности звезды. Простая оценка (по порядку величины) дает для красных гигантов период пульсации  $P$  от 3 до 1000 сут:  $t \propto (G\rho)^{-1/2}$  или  $P = 2\pi / [(3\Gamma_1 - 4) \cdot (4/3)\pi G\rho]^{1/2}$ , где  $\Gamma_1$  — показатель адиабаты, равный 5/3. Последнее выражение совпадает с точным значением периода фундаментальной моды радиальных пульсаций однородной модели [10].



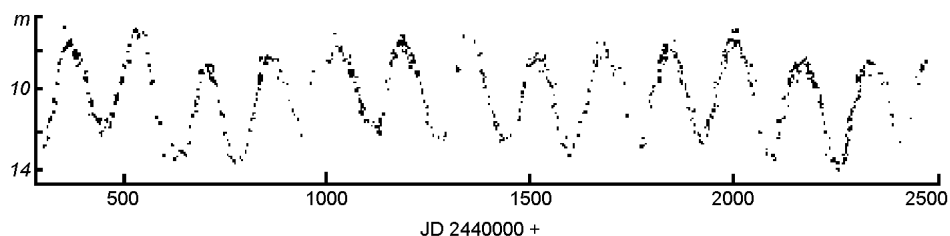


Рис. 8. Блеск двойной мириды Т Геркулеса по наблюдениям членов AFOEV

Линейные неадиабатические расчеты собственных частот колебаний звезд, занимающих крайнюю верхнюю часть области красных гигантов, показали, что у этих объектов пульсационная константа равна

$$Q = P(M/M_{\odot})^{1/2}/(R/R_{\odot})^{3/2} = 0.04^d. \quad (1)$$

По данным о миридах с известными массами и светимостями найдено значение пульсационной константы  $Q \approx 0.06^d$ . Однако полученные в разных работах значения пульсационных констант [41] не решают до конца полемику о пульсационной моде из-за неопределенности в звездных массах. Непосредственно масса оценена только у двойной звезды  $\sigma$  Ceti:  $(0.7\text{—}1.8)M_{\odot}$  [125].

Мириды в большинстве своем являются одиночными звездами. Известно несколько мирид, входящих в симбиотические системы ( $\sigma$  Ceti, UV Aur, RR Tel, R Aqr [125]), и таких, двойственность которых только предполагается (R Aql, U Her). Иногда по кривой блеска заметна двойственность мириды, как, например, у R Aqr. В работе [114] представлена кривая блеска R Aqr за 170 лет, по которой было выделено два главных затмения, и даже замечен один вторичный минимум. Похожая кривая показана для T Her (рис. 8) [<http://cdsarc.u-strasbg.fr/afoev>]. Иногда же двойственность можно только предполагать, например для звезд R Aql, U Her [106].

Непосредственно из пульсационной теории массу мирид получить невозможно, так как продолжительность пульсационного периода изменяется со временем. Лучевые скорости испытывают разрыв, и получить из них радиус не представляется возможным [65]. Нельзя также использовать соотношение «период — светимость», как это делается для цефеид, из-за неопределенности в расстояниях. Таким образом, изучение наблюдательных параметров, которые могли бы быть использованы для оценки массы и возраста мирид, представляют огромный интерес. Из наблюдений  $\text{H}_2\text{O}$ -мазера можно оценить звездный радиус (например, для W Hya он оказался равен  $3.5 \cdot 10^{13}$  см [36]). Располагая данными о пульсационной константе и значением пульсационного периода, можно было бы оценить и массу звезды.

Наблюдаемые периоды колебаний блеска большинства ДПП соответствуют периоду первого обертона пульсаций. Говоря о пульсациях мирид, нельзя не отметить работу [93], которая может в корне изменить привычное представление о звездах типа Миры и еще больше придвинуть границы их свойств к звездам типа SR. В этой работе проведен частотный анализ фотографической кривой блеска мириды BS Lyr, который обнаружил кроме доминантного периода ( $P_0 = 304.7$  сут), второй период  $P_1 = 272.3$  сут. Они отождествлены как первый и второй обертоны. Заподозрено также наличие третьего колебания с ( $P_2 = 179$  сут), которое могло бы соответствовать третьему обертоны.

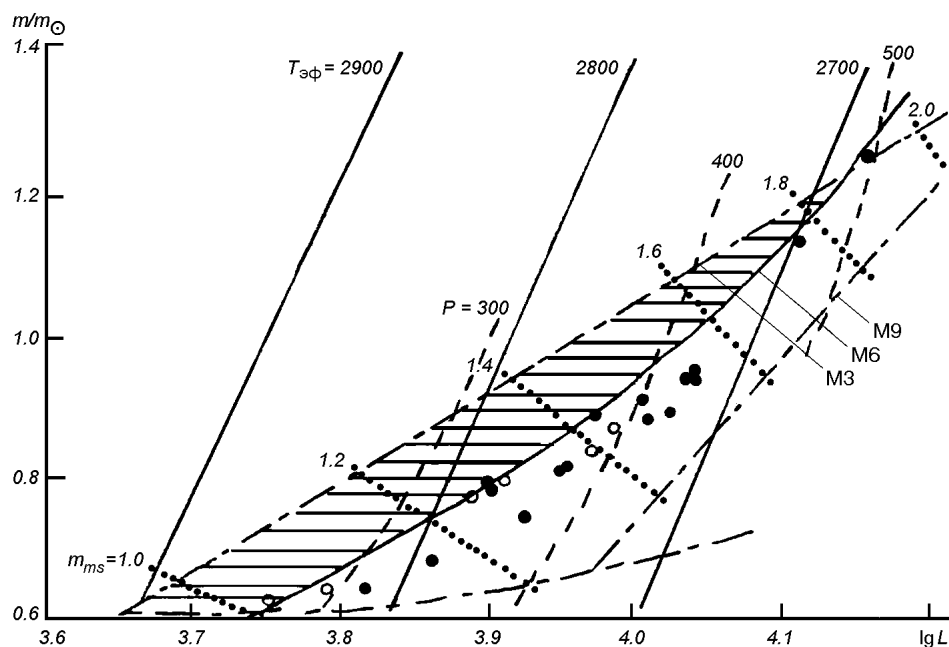


Рис. 9. Положение ОН-мирид (наблюдения [88]) около максимума блеска на эволюционных треках [43] (пунктирные линии). Кружки — тип I мирид, которые излучают в  $\nu = 1612$  МГц; точки — тип I мирид, которые были обнаружены только в главных линиях. Заштрихованный район соответствует положению не-ОН-мирид. Штриховые линии являются кривыми постоянного периода; штрих-пунктирная линия ограничивает «миридный клин». ( $T_{\text{эф}}$  — эффективная температура,  $m$  — масса,  $L$  — светимость,  $m_{\text{ms}}$  отмечает массу на главной последовательности

Используя данные об ИК-светимости, потоках в радиолниях ОН,  $\text{H}_2\text{O}$ , SiO и фотометрические параметры, можно разделить мириды на две группы: звезды, которые направленно развиваются к белому карлику, и те, которые проходят через стадию планетарной туманности.

В работе [98] показано, как это можно сделать, используя мириды с ОН излучением. Установлено, что период изменения блеска вместе со значением спектрального типа в максимуме блеска связан с внутренними свойствами мирид. Построена диагностическая диаграмма (рис. 9). Выражение (1) определяет линии постоянных периодов.

Заштрихованная область соответствует положению мирид, у которых не была найдена ОН-эмиссия. Это означает, что очень малое количество мирид с короткими периодами являются излучателями мазерных линий ОН; ОН-мириды начинают появляться около периодов 250 сут и количественное отношение [ОН/не ОН-мириды] резко увеличивается с увеличением периода. При наибольших периодах все мириды являются, вероятно, ОН-источниками. Из рис. 9 видно также, что времена жизни не-ОН- и ОН-мирид изменяются с начальной массой.

Некоторые звезды (RS Lib, RU Tau) не могут быть помещены на диаграмму: они лежат вне клина мирид. В модели принимается первый обертона пульсации, что может быть неправильным для этих звезд. Заметим, что звезда R Leo лежит *внутри* или *вне* клина в зависимости от рассматриваемого цикла [98].

Однако на основе новых более точных измерений угловых фотосферных диаметров R Leo в ИК-области ( $\lambda\lambda = 833$  и  $903$  нм) [117] показано, что оценка радиуса этой звезды ( $495R_{\odot}$ ) лежит далеко за пределами теоретиче-

ских расчетов для фундаментальной моды пульсации. И звезда, скорее всего, пульсирует в первом или более высоком обертоном.

Отметим работу 1999 г. [105], где сообщается о первом прямом обнаружении изменений размера фотосферы R Leo в  $K$ -полосе на фазе 0.24—0.28, являющихся результатом пульсации звезды. Сравнение с имеющимися моделями приводит к тому, что значение радиуса попадает между фундаментальными пульсаторами и первым обертоном. Таким образом, найдено расхождение с теоретическими предсказаниями, согласно которым диаметр фотосферы мириды должен уменьшаться после фазы 0.2. Авторы все же считают R Leo фундаментальным пульсатором.

Исследования на основе точных многоволновых определений угловых диаметров 10 ДПП [60] дают оценку фотосферного радиуса более  $350R_{\odot}$ . В работе приведены также средние оценки  $T_{\text{эф}}$  в предположении обеих мод пульсаций (фундаментальной и первого обертона). Данные свидетельствуют, что в выборке звезд с периодами от 284 до  $430^{\text{д}}$  нет пульсаторов в фундаментальной моде. Для того чтобы совместить пульсацию в фундаментальной моде с этими оценками, требуется ревизия либо соотношения «период — светимость», либо принятых начальных масс мирид.

Сравнение же на плоской диаграмме «период — светимость» положения мазерных источников и ДПП в Магеллановых облаках и в Галактическом балдже предполагает, что фактически все более красные мазеры на АВГ являются пульсаторами в фундаментальной моде. Периоды некоторых более голубых и менее эффективных АВГ-мазеров обусловлены первым обертоном пульсации; эти объекты подобны классическим миридам.

Еще ряд параметров звезд типа Миры Кита коррелирует с периодом изменения блеска. Один из параметров — отношение  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ , изменение которого коррелирует с периодом [65]. Перетекание массы в двойной системе RR Tel от мириды происходит в фазе с ее пульсациями [68].

Необходима четкая классификация внутри класса мирид. Так как, например, поведение AW Tau в ОН соответствует не ее периоду, определенному в 690 сут, а более короткому (375 сут) [42]. Достаточно также вспомнить о резком уменьшении периода звезд R Aql и R Hya [49] или о неожиданной «стабилизации» величин максимумов и минимумов у звезды Z Tau [101].

Все перечисленные проблемы касаются и полуправильных переменных. Решение их возможно аналогичными методами.

## 8. ПОЛУПРАВИЛЬНЫЕ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ И РОДСТВЕННЫЕ ИМ ОБЪЕКТЫ

Полуправильными принято называть звезды, на первый взгляд имеющие какую-то периодичность, но обладающие такими неправильностями, что эту периодичность не удастся классифицировать. Происходит это потому, что в колебаниях блеска этих звезд обычно есть несколько частот, а амплитуда блеска сильно изменяется.

Полуправильные переменные отличаются от мирид зачастую только характером изменения блеска. Такие фундаментальные параметры, как спектральный класс, класс светимости, эмиссионное (в том числе мазерное) излучение, у них практически одинаковы. Блеск же изменяется с гораздо меньшей амплитудой и значительно большей нерегулярностью. Периодограммный анализ ряда полуправильных переменных показал, что для этих звезд, как и для мирид, можно получить сглаженные средние кривые изменения блеска, но, как правило, одновременно действуют несколько колебаний [93, 135].

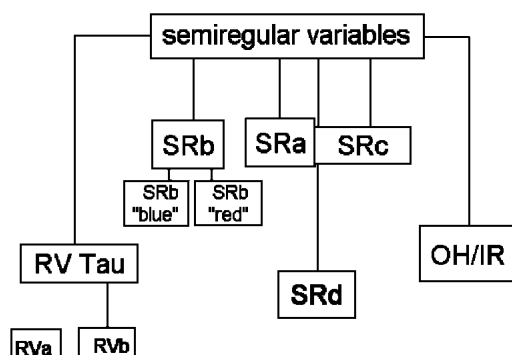


Рис. 10. Схематическая классификация полуправильных переменных с учетом последних исследований [80]

В то же время анализ визуального блеска и одновременного определения спектрального подкласса показал линейную корреляцию этих двух величин как у мирид, так и у полуправильных переменных спектральных типов Me. Тангенс угла наклона этой зависимости находится в пределах от 0.30 до 2.11. Более того, на диаграмме  $(V - R) - (R - I)$  мириды и полуправильные принадлежат одной и той же последовательности [45].

Существующая классификация делит полуправильные переменные звезды на следующие типы: RV Tau (RVa, RVb), SRabc, SRd (рис. 10). Однако для некоторых звезд характерно наличие признаков сразу нескольких подтипов, а некоторые, наоборот, нельзя отнести ни к одному подтипу (например UU Her, AF Cyg).

Согласно работе Кершбаума и Хрона [71], в которой были изучены основные свойства SRa- и SRb-переменных, а именно — болометрические величины, периоды, амплитуды в визуальной и ИК-областях, химические свойства, пульсационные свойства (диаграммы период — цвет, амплитуда — цвет, цвет — цвет) и пространственно-кинематическое распределение, следует, что SRa-звезды являются промежуточными объектами между миридами и SRb во всех аспектах исследования. SRb могут быть разделены на две группы соответственно наличию или отсутствию эмиссии от околозвездной пыли. Это разделение также соответствует разделению по периодам, амплитудам и температуре: звезды без околозвездной пыли имеют меньшие периоды и амплитуды, и они горячее («голубые» SRb-звезды [71]). «Красные» SRb имеют темп потери массы, светимости и начальные массы на ГП, характерные для таких же мирид, но их эффективные температуры незначительно выше. Их периоды содержат первый обертона пульсации. Интересно привести здесь характеристики, по которым было произведено разделение звезд в указанные группы (табл. 2).

Углеродные звезды и звезды с технецием найдены только среди «красных» SRb. Практически все циркониевые полуправильные переменные тоже находятся в группе «красных».

Разделение полуправильных переменных на «красные» и «голубые» группы является удачным, так как дальнейшие исследования продолжают

Таблица 2. Характеристики SRb-групп [72]

Группа	P, сут	$\Delta V$	V — [12 МКМ]	[12 МКМ] — [25 МКМ]
Мириды	> 180	> 2 <sup>m</sup>	> 9 <sup>m</sup>	> 0.26 <sup>m</sup>
«красные» SRab	60 — 200	> 1	> 8	> 0.26
«голубые» SRab	< 150	< 2	< 8	< 0.26

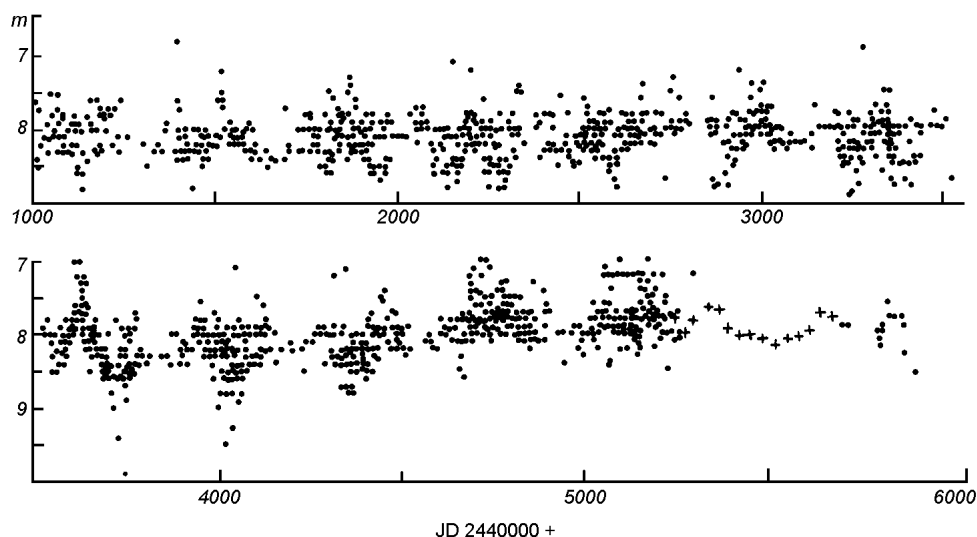


Рис. 11. Фрагмент кривой блеска полуправильной переменной RX Boo (SRb) по данным разных наблюдений. Крестиками показаны наблюдения, усредненные за несколько ночей [<http://cdsarc.u-strasbg.fr/af0ev>]

подтверждать общие свойства этих звезд и различия между группами. Например, это касается потери массы, определенной по измерениям СО-эмиссии, и скорости расширения оболочки, определенной по излучению в линиях SiO [74, 75].

Очень интересные результаты получены Кершбаумом и Хроном [73] при аппроксимации ИК-спектров чернотельным излучением. Показано, что только в случае «голубых» кислородных SR-звезд возможна интерпретация одним «черным телом», в то время как для остальных групп SR-звезд необходимо два. Углеродные объекты значительно отличаются от кислородных по своим сглаженным параметрам, а циркониевые звезды занимают промежуточное положение.

Есть объекты, которые уже по фотометрическому поведению относятся одновременно и к миридам, и к полуправильным. Например, Y Per (углеродная мирида) на большом интервале времени показывает сложные квазипериодические изменения блеска, типичные для SRb-объектов, а сверхгигант S Per (звезда типа SRc) на протяжении последних 5 циклов показывает регулярные миридоподобные пульсации с периодом около 816 сут [96]. Это дало возможность, используя соотношения для излучения черного тела и зависимость «период — светимость» для сверхгигантов из [44], оценить радиус звезды в  $1400R_{\odot}$  [79].

Наряду с такими объектами на асимптотической ветви есть и «классические» полуправильные переменные (PZ Cas, RT Vir, RX Boo и др.) [80]. Кривая блеска для RX Boo приведена на рис. 11.

Однако и у этой звезды есть свои особенности. Фист [53] отмечает нетипичное положение RX Boo на двцветных диаграммах. Для этой звезды был определен угловой диаметр и выведена эффективная температура. Звезда оказалась немного горячее, чем мириды, но ее цвета  $J - H$  и  $H - K$  краснее, чем для типичных SR. Это может быть результатом значительного покраснения в оболочке.

Возможно, что в значительной мере фотометрическое поведение некоторых переменных, обладающих признаками одновременно мирид и полу-

правильных, обусловлено двойственностью этих объектов. В пользу этого предположения говорит исследование Вуда и др. [137] красных гигантов в БМО. Было выделено пять последовательностей «период — светимость». Результаты сравнены с модельными расчетами для АВГ-звезд. Поскольку наблюдается очень хорошее согласие теории и наблюдений, то предполагается, что одна, выделенная из пяти последовательностей, содержит звезды, входящие в состав контактных и полуразделенных двойных систем, каждый из компонентов которой имеет массу, равную массе мириды. Вторичные периоды, определенные у этих звезд, объясняются затмениями пылевым облаком аккрецированного вещества из потери массы посредством звездного ветра или истечения из полости Роша. Эти звезды по расчетам составляют примерно 25 % всех АВГ-звезд. Если этот факт подтвердится наблюдением лучевых скоростей, то станет возможным объяснение природы биполярных планетарных туманностей, но потребуются серьезный пересмотр теории эволюции двойных звезд.

Встречаются инфракрасные ОН/IR-звезды как с регулярной, так и с полуправильной периодичностью. Хотя, надо отметить, что эти объекты обладают большими периодами, что, вероятно, связано не только с их большими массами (по сравнению со звездами типа Миры), но и с очень мощной пылевой оболочкой, окружающей ОН/IR-звезды, в результате чего излучения самой звезды (ее фотосферы) практически не видно.

SRc-звездами называют сверхгиганты, показывающие почти неправильные волнообразные изменения блеска с малой амплитудой, прерываемые интервалами практического постоянства блеска. Большинство звезд из этой группы раньше причислялось к неправильным переменным. Характерными представителями является  $\alpha$  Ori,  $\alpha$  Her,  $\mu$  Ser. С одной стороны, они сходны с подтипом AI Sco (RV Tau), так как обнаруживают небольшие колебания блеска с амплитудой 0.2—0.5<sup>m</sup> и с периодом 50—200<sup>d</sup>, которые накладываются на хорошо выраженные изменения блеска с периодом 700—2500<sup>d</sup> и с амплитудой 1—2<sup>m</sup>. Но все SRc-звезды принадлежат к спектральному классу M, и не будь долгопериодических колебаний блеска, звезды этого типа были бы весьма сходны с переменными типа AF Cyg.

Есть еще одно мнение (оно распространено на все SR-звезды). Процесс изменения блеска считается абсолютно случайным и сравнивается с каплями дождя. То есть, когда капли стучат по крыше, иногда можно отметить, что они стали стучать все одновременно, а потом — снова вразнобой. И такое явление повторяется случайным образом. Автор этого предположения [132] основывается на исследовании кривых блеска  $\alpha$  Ori и  $\mu$  Ser.

Мы уже упомянули о звезде AF Cyg. Этот объект, вообще говоря, относят к типу SRb. Это — гиганты спектральных классов K, M, S и S. Кривая блеска циклична, но время от времени цикл нарушается. Изменения блеска в это время неправильны. Затем цикличность восстанавливается. Звезды этого типа обладают мультипериодичностью. Значения периодов и амплитуд сильно изменяются. Звезды типа AF Cyg выделяются тем, что один период сменяет другой, и какое-то время оба периода могут действовать одновременно. Часто наблюдается чередование глубоких и вторичных минимумов; средний период около 160<sup>d</sup>. На основании последних исследований самой AF Cyg следует, что у звезды дважды скачкообразно произошло изменение периода: 89<sup>d</sup>, 164<sup>d</sup>, 93<sup>d</sup>. Время действия каждого периода примерно одинаково, а полная продолжительность всего цикла «переключений» составляет около 1915 сут, то есть 5.3 года [1].

В течение последних лет полуправильные (и даже медленные неправильные) переменные поздних спектральных классов активно исследуются во всех диапазонах длин волн — от визуального до радиодиапазона. Часто

их исследования проводятся в неразрывной связи со звездами типа Миры, для которых уже многи характеристики хорошо изучены. Таким образом, проводится сравнение свойств полуправильных переменных с такими же свойствами мирид. В связи с этим нельзя обойти вниманием работу Хинкла и др. [64], в которой исследовались спектры высокого разрешения в области колебательно-вращательной линии CO  $\Delta v = 3$  для четырех мирид (U Ori, R Hya, R Aur, IK Tau) и пяти SR-звезд (W Cyg, SV Peg, RU Cyg, SV Cas, W Hya). Найдены различия и подобия в поведении лучевых скоростей и температурах возбуждения — мириды показывают сходные изменения и подобные амплитуды лучевых скоростей независимо от их периода, а полуправильные отличаются от них более низкими амплитудами. Найдена также корреляция между амплитудой лучевой скорости и визуальной амплитудой для обоих типов звезд.

Таким образом, красные полуправильные переменные гиганты, которые также принадлежат АВГ, как и мириды, пока еще представляют собой смешанный класс объектов. Но уже обозначились пути их детальной классификации, которые успешно разрабатываются по всем направлениям.

#### 9. ПРОСТРАНСТВЕННО-КИНЕМАТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ. СООТНОШЕНИЕ «ПЕРИОД — СВЕТИМОСТЬ». МЕТАЛЛИЧНОСТЬ

Мы теперь знаем, что звезды определенного возраста (или начальной массы) будут становиться миридами с конкретными периодами и что может быть небольшая эволюция этого периода во времени. Выбирая мириды с определенными значениями периодов, мы можем выделить определенное население. Так, например, мириды с периодами около 200 сут имеют большую дисперсию скоростей и встречаются на больших расстояниях от Галактической плоскости. Мириды с более продолжительными периодами принадлежат к кинематически более холодному населению и, по-видимому, происходят от более массивных предшественников. Но даже маломассивная звезда, проходя стадию мириды, будет в несколько тысяч раз ярче, чем ее предшественник на главной последовательности. Поэтому ее можно наблюдать на значительном расстоянии, чем та, которая находится в других стадиях эволюции [126]. Поэтому знание расстояний до мирид позволило бы пролить свет на некоторые вопросы морфологии и истории Галактики, а также дало бы материал для сравнительного изучения других галактик.

Понятно, что зависимость «период — светимость», определяющая расстояния до мирид, будет разной для звезд разных типов населений (и как следствие — различных масс, температур, металличностей). Из множества исследований мирид в шаровых скоплениях, а также в БМО и ММО (а в последнее время проведено много исследований и звезд Галактического поля) следует несколько путей решения этой проблемы.

Поскольку период — основная наблюдаемая характеристика, естественно именно его в первую очередь использовать в качестве критерия отбора звезд. Однако период зависит от температуры, массы, металличности и моды пульсации. На то, что этим факторам необходимо уделять внимание, указывают многие исследователи. Например, Уайтлок в работе [124] исследовала зависимость «период — светимость — температура» для красных и желтых переменных звезд шаровых скоплений 47 Tuc,  $\omega$  Cen, M 53, M 4, M 69, M 22, M 71 и некоторых других. Результаты позволяют предположить, что более горячие и более бедные металлами переменные пульсируют в фундаментальной моде, в то время как более холодные и

богатые металлами переменные пульсируют в первом оберitone. В рамках этого предположения выведена зависимость между фундаментальным периодом и болометрической величиной для переменных скоплений с наблюдаемыми периодами между 1 и 300 сут:

$$M_{\text{bol}} = -1.33 \lg P_0 - 0.56.$$

На эту зависимость хорошо укладываются цефеиды населения II, звезды типа RV Тау, мириды и полуправильные переменные скоплений. Аналогичная работа была проделана для мирид из БМО [54]. Показано, что PL-соотношения для О-мирид и С-мирид очень похожи в *K*-полосе.

Наблюдения постоянно доставляют нам новые данные. Через десять лет после выхода работы [124], Фист [53] отмечает, что полученная в работе [124] зависимость соотношений *J* – *K* от металличности или эффективной температуры от логарифма периода либо не согласуется с теорией, либо требует различных пульсационных мод для полуправильных переменных в скоплениях богатых металлами и бедными металлами. В то же время комбинированные данные ИК-фотометрии и прямых измерений диаметров (см. разд. 5) свидетельствуют в пользу того, что мириды и полуправильные переменные обоих видов шаровых скоплений пульсируют в первом оберitone. Однако он допускает, что некоторые мириды, особенно с длинными периодами, пульсируют в фундаментальной моде. В конце концов, многочисленные более поздние исследования приводят к тому, что становится ясным: среди ДПП есть как оберитонные пульсаторы, как и пульсаторы в фундаментальной моде. И это дает возможность провести серьезную ревизию в определении соотношений «период — светимость», а следовательно, и расстояний до ДПП-звезд. В работе [119] получено соотношение «период — радиус» для мирид с массами 1.0 и 1.5 солнечных масс. Для фундаментальных пульсаторов было использовано решение уравнения

$$\lg P = 1.949 \lg R - 0.9 \lg M - 2.07,$$

где *M* — масса в солнечных единицах, *P* — период в сутках. Для оберитонных пульсаторов использовалось уравнение

$$\lg P = 1.5 \lg R - 0.5 \lg M + \lg Q,$$

где *Q* = 0.04. В итоге мириды разделены на три группы.  $\chi$  Cyg и R Cas лежат в области фундаментальных пульсаторов, R Aql, R Leo, *o* Ceti и T Ser лежат в области оберитонных пульсаций, а U Ori и R Hya могут быть пульсаторами еще более высоких мод. Получены соотношения «период — светимость» в *K*-полосе  $M_K$  и  $M_{\text{bol}}$ :

$$M_K = -3.47 \lg P + 0.94;$$

$$M_{\text{bol}} = -3.00 \lg P + 2.81.$$

Наклоны взяты как для кислородных мирид в БМО, а нуль-пункты определены с принятым модулем расстояния до БМО 18.54. Неуверенность их определения  $\pm 0.18$ .

Для углеродных мирид в Галактике также имеется соотношение «период — светимость» для  $M_K$  и  $M_{\text{bol}}$  [59].

В работе [100] в результате применения оригинального метода [31] к данным, полученным спутником HIPPARCOS (параллаксы и собственные движения) и данным AAVSO (средние визуальные величины в максимуме блеска), 882 ДПП-звезды разделены в следующие группы: население яркого диска (BD); население диска (D); население старого диска (OD); население толстого диска (TD и ED).



Для данного спектрального типа изначально наиболее массивные звезды становятся медленными неправильными переменными (L), а мириды соответствуют изначально менее массивным звездам. Полуправильные встречаются в промежуточном месте. Относительное число углеродных звезд сильно увеличивается с увеличением начальной массы примерно от 0.1 и менее до  $0.7 M_{\odot}$  или более. Показано, что почти все циркониевые переменные расположены в верхней правой части ветви гигантов очень близко к АВГ. Авторы считают, что среди S-звезд может быть значительная часть обогащенных цирконием объектов в результате перетекания массы от более развитого компаньона в двойной системе.

Астрометрические и кинематические данные HIPPARCOS и ИК-величины были использованы в работе [31] для разделения кислородных мирид в группы. Всего было выделено три группы с явными различиями в характеристиках. Было определено по два соотношения «период — светимость» для двух самых многочисленных групп (в полосе K и в области  $\lambda = 1.04$  мкм), сдвиг между которыми интерпретирован как следствие эффекта зависимости металличности от светимости. Сами группы характеризуются параметрами населения толстого диска — гало и старого диска. Сдвиг нуля-пункта между ними — около  $0.5^m$  в K-полосе и  $0.8^m$  в области  $\lambda = 1.04$  мкм. Наклон линий регрессии одинаков для обеих групп звезд и совпадает с наклоном для мирид из БМО.

С другой стороны, в работе [30] соотношение «период — светимость» определяется на основе зависимости «период — температура» (PT) и теоретического эволюционного трека на АВГ. При этом принимается гипотеза, что разброс на зависимости PT обусловлен распределением по массам:

$$M_{\text{bol}} = 3.15 - 3.12 \lg P,$$

где  $\lg P$  находится в пределах от 2.0 до 2.6. Затем определяются предел масс и абсолютные болометрические величины. Эти данные позволяют авторам сделать вывод, что мириды с периодами больше 200 сут должны быть звездами толстого диска, а с периодами меньше  $200^d$  — звездами гало.

Уайтлок и Фист [128] приводят таблицу кинематических свойств восьми групп ДПП: средний период в группе, дисперсия скоростей, собственное движение и расстояние от галактической плоскости. Последняя величина  $|z|$  (в килопарсеках) вычислена в предположении, что все звезды следуют зависимости  $M_K = -3.47 \lg P + (0.84 \pm 0.14)$ . Кроме этого, в работе приведена таблица, содержащая значения периодов, параллаксов, угловых и линейных диаметров звезд, их тип переменности и спектральный класс (всего 45 объектов).

Таким образом, можно подвести некоторый итог. Во-первых, мириды различных групп периодов принадлежат разным звездным населением. Во-вторых, окрестные мириды с периодами около  $200^d$  ( $150$ — $250^d$ ) являются членами толстого диска или внутреннего гало (они занимают скорее промежуточное положение). В-третьих, долгопериодические звезды кинематически холоднее и имеют меньшую шкалу высот. Они больше похожи на звезды старого диска. В-четвертых, звезды с умеренными пылевыми оболочками, которые могут быть эволюционно более продвинутыми, видимо, принадлежат тому же населению, что и объекты с тонкими оболочками и таким же самым периодом. В-пятых, анализ кинематических свойств различных групп ДПП не предполагает наличие разрозненных структур, таких как толстый и старый диски, а наоборот, указывает на непрерывный переход между ними и, возможно, за их пределами [126].

## 10. ФЕНОМЕНЫ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД

Согласно отдельным сообщениям блеск мирид в оптическом диапазоне иногда резко изменяется за десятые и сотые доли периода колебаний, причем амплитуда колебаний может достигать  $0.4\text{--}1.5^m$ . Эти вспышки обнаружены около максимума блеска и длятся нескольких сут (а может быть и часов). Такие вспышки зарегистрированы у звезд R Aql, R Tri, RT Cyg [8].

Наличие быстрой переменности звезд типа Миры Кита до сих пор является предметом споров. В работе [112] собраны сообщения о 14 отдельных случаях короткопериодичной переменности звезд типа Миры, из них восемь событий признаны автором истинными.

Кроме этих исторических фактов, имеются также указания на короткопериодическую переменность блеска мирид, обнаруженную при наблюдениях с космическим спутником HIPPARCOS. Всего обнаружен 51 случай переменности за время порядка от 2 ч до 6 сут у 39 кислородных мирид. При этом амплитуда переменности составила от  $0.23$  до  $1.11^m$ . В это же время у циркониевых и углеродных мирид не обнаружено никаких признаков такой переменности. Хотя не найдено никаких необычных характеристик, с которыми можно было бы связать кратковременную переменность, авторы работы [50] предполагают, что за этот феномен могут быть ответственны полосы молекулы VO, которые усиливаются в спектрах звезд поздних подклассов M, особенно позже M6. В этой работе также приведен обзор всех сообщений о короткопериодической переменности мирид.

О наблюдениях короткопериодической переменности с амплитудой более  $0.5^m$  и характерным временем от 1 до 30 сут у 18 звезд в окрестностях M16—M17 сообщается также в работе [92]. На этот раз в число долгопериодических объектов попали и холодные полуправильные переменные звезды. Быстрая переменность была классифицирована тремя типами: 1) быстрое поярчание или ослабление блеска в течение 20 сут; 2) внезапное увеличение или уменьшение блеска за 3—4 сут; 3) фликеринг.

Переменность в течение одной ночи в пяти цветах (*UBVRI*) отмечена у мирид T Her и S CrB. Амплитуда переменности составляла более чем  $0.5^m$  в полосах *U*, *B* и *V*; переменность в полосах *R* и *I* почти полностью отсутствовала [51]. Последний факт говорит в пользу того, что за быструю переменность, скорее всего, ответственно молекулярное поглощение.

Одной из первых интерпретаций быстрой переменности мирид была гипотеза Горбацкого [5] о возникновении флуктуаций блеска красных гигантов в результате выхода крупных конвективных элементов во внешние слои звезды. Размер таких элементов должен быть порядка  $10^{12}\text{--}10^{13}$  см, что составляет заметную долю радиуса звезды. Возрастание блеска за счет этого может быть на несколько десятых звездных величин. Однако количественной интерпретации пока нет, хотя пятна были найдены, например, у мириды U Her [106]. По статистике флуктуаций можно определить вероятность появления «гигантских» магнитных арок, по длительности усиления эмиссии — характерные размеры ячеек, а по ее амплитуде — величину магнитного поля арок.

В принципе возможно по флуктуациям блеска в оптике восстанавливать амплитудный спектр вспышечной активности, а также обнаруживать сильные магнитные поля во время флуктуаций в континууме [3].

До настоящего времени не имеется достаточных сведений о наличии у долгопериодических переменных звезд сильных магнитных полей. Однако у звезды U Ориона есть магнитное поле  $1\text{--}10$  мТл у поверхности [5]. Кроме этой звезды, свидетельства о наличии магнитных полей такой же величины

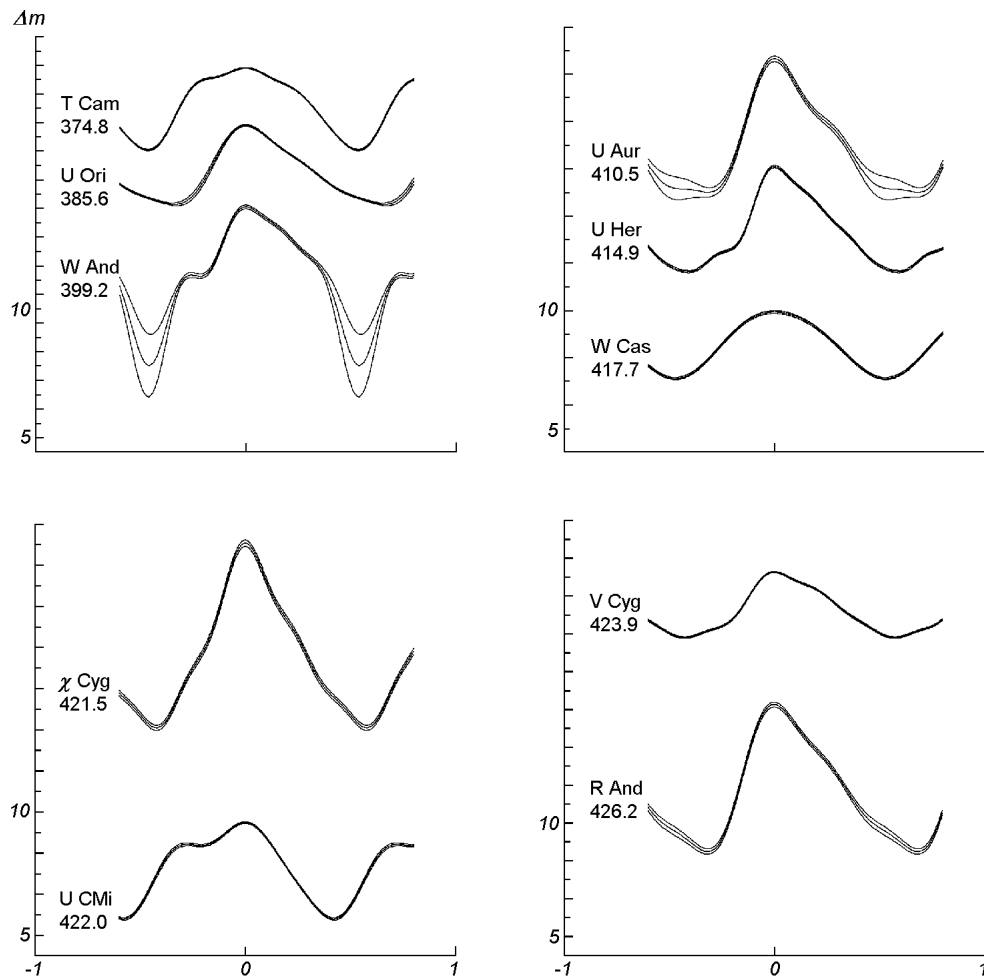


Рис. 12. Средние кривые звезд типа Миры, полученные аппроксимацией данных Американской ассоциации наблюдателей переменных звезд

есть еще у мирид R Leo, R Cas, W Hya и сверхгигантов VY CMa, VX Sgr [40].

Следующим феноменом звезд типа Миры Кита можно считать наличие горбов на ветвях кривых блеска. Горбы обычно возникают на восходящей ветви кривой блеска мириды в любом ее месте и иногда переходят в двойные максимумы. На рис. 12 показаны средние кривые некоторых мирид. Три линии представляют собой сглаживающую кривую (средняя линия) и отклонения  $3\sigma$  [78]. Методика получения средней кривой описана в работе [76].

В работе [81] построена численная модель распространения ударной волны в атмосфере мириды, главным результатом которой является время движения волны в атмосфере звезды до потери ею способности нагревать газ до температуры, достаточной для ионизации. Это время в среднем составляет от 20 до 35 сут. Наблюдения показывают, что относительная продолжительность «горба» на восходящей ветви кривой блеска, выраженная в долях периода, отличается постоянством у разных звезд, и близка к 0.1.

Учитывая, что периоды мирид, имеющих «горбы», составляют около 300<sup>d</sup>, имеем хорошее согласие с моделью.

## 11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время решаются такие основные проблемы, касающиеся ДПП: построение динамических моделей атмосфер, определение моды пульсации, изучение механизма потери массы и эволюция звезд вдоль АВГ.

На данном этапе определенно можно сказать лишь то, что долгопериодические звезды (мириды и полуправильные) уверенно разделяются на группы, внутри которых звезды подчиняются одним и тем же зависимостям и имеют схожие свойства. Между группами наблюдаются явные различия свойств, как наблюдательных (показатели цвета, периоды, амплитуды изменения блеска, эффективная температура, спектральные подклассы и др.), так и теоретических (пульсационная мода, темп потери массы и др.).

Многие исследователи все чаще указывают на то, что мода пульсации, предсказанная линеаризованной пульсационной теорией, должна значительно отличаться от реальности. На самом же деле долгопериодические переменные пульсируют как в фундаментальной моде, так и в первом оберitone. Последнее особенно касается полуправильных переменных, но и значительная часть мирид является обертовыми пульсаторами. Одновременно с этим некоторая часть звезд претерпевает гелиевые вспышки в слое или на нижней границе водородной оболочки и гелиевого ядра, что отражается на светимости и продолжительности периода. Необходимо также учитывать эффекты, которые создают пылевые оболочки, часто имеющие пекулярную структуру [38]. Если мириды переключаются на фундаментальную моду на поздней стадии своей эволюции, то затем они могут идентифицироваться как ОН/ИК-источники, лежащие внизу соотношения «период — светимость» [53].

В настоящее время АВГ-стадия разделяется на раннюю (EAGB) и «thermally pulsing regime of the He-burning shell» (TPAGB) — термически-импульсный режим горения гелия в слое. На стадии TPAGB звезда становится ярче в  $M_{bol}$  [48]. Некоторые теоретические расчеты показывают, что, например, циркониевые звезды по диапазону светимостей и температур соответствуют ранней стадии АВГ, когда горение гелия происходит стационарно [28]. В то же время некоторые наблюдательные особенности говорят скорее в пользу нахождения этих звезд в более продвинутой стадии эволюции на АВГ [11].

Одной из самых сложных теоретических проблем является также конвективный перенос энергии в ДПП-звездах, который делает анализ свойств оболочек очень неопределенным.

1. Андронов И. Л., Чернышева И. В. О переменности продолжительности цикла AF Лебеда // Астрон. циркуляр.—1989.—№ 1538.—С. 18—19.
2. Бурдюжа В. В., Варшалович Д. А., Рузмайкина Т. В. Мощные галактические мазеры. — М., 1975.—16 с.—(Препринт / АН СССР; Ин-т космич. исследований, № 246).
3. Бычков К. В., Панчук В. Е. К вопросу об эмиссионных линиях водорода в долгопериодических переменных // Астрон. журн.—1977.—54, вып. 2.—С. 340—353.
4. Варданян Р. А. Зависимость цвета I—K от периодов изменения блеска мазерных источников // Астрофизика.—1986.—25, № 1.—С. 83—87.
5. Горбацкий В. Г. Нестационарные движения газа во внешних слоях звезд гигантов поздних спектральных классов // Науч. информ. Астрон. совет АН СССР.—1984.—Вып. 56.—С. 9—16.
6. Горбацкий В. Г., Минин И. Н. Нестационарные звезды. — М.: Физматгиз, 1963.—С. 283—312.

7. *de Ягер К.* Звезды наибольшей светимости / Под ред. Э. Р. Мустеля, В. С. Стрельниченко. — М.: Мир, 1984.—С. 137—139.
8. *Киселева Т. К.* Вспышки около максимума блеска у звезд типа Миры Кита // Астрон. циркуляр.—1968.—№ 438.—С. 1—2.
9. *Киселева Т. К.* Некоторые закономерности в изменении цветов долгопериодических переменных звезд // Астрон. циркуляр.—1975.—№ 856.—С. 1—2.
10. *Кокс Дж.* Теория звездных пульсаций. — М.: Мир, 1983.—328 с.
11. *Кудашкина Л. С.* Фотометрическая классификация звезд типа Миры Кита // Вісник Одес. державного ун-ту.—1999.—4, № 4.—С. 55—58.
12. *Кудашкина Л. С.* Дополнительная фотометрическая классификация звезд типа Миры Кита на основе соотношений между фурье-коэффициентами их средних кривых блеска // Переменные звезды — ключ к пониманию строения и эволюции Галактики: Сб. тр. междунар. конф., Москва, 25—29 октября 1999 г. / Под ред. Н.Н. Самуся, А. В. Мироннова. — Нижний Архыз, 2000.—С. 37—40.
13. *Кудашкина Л. С., Андронов И. Л.* О возможной зависимости между фотометрическими параметрами AGB-звезд и их эволюционным статусом // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 1.—С. 41—44.
14. *Кудашкина Л. С., Рудницкий Г. М.* Долгопериодические переменные звезды // Земля и Вселенная.—1988.—№ 2.—С. 17—24.
15. *Кукаркин Б. В. (Ред.)* Пульсирующие звезды. — М.: Наука, 1970.—С. 305—349.
16. *Кукаркин Б. В., Паренаго П. П.* Физические переменные звезды // Перемен. звезды.—1937.—1.—С. 97—157.
17. *Ленг К.* Астрофизические формулы. — М.: Мир, 1978.—Том 2.—384 с.
18. *Марочник Л. С., Сучков А. А.* Галактика. — М.: Наука, 1984.—С. 26—33.
19. *Марсакова В. И., Андронов И. Л.* W Лирь: переменность циклов пульсаций звезды типа Миры // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 6.—С. 49—62.
20. *Масевич А. Г., Тутуков А. В.* Эволюция звезд: теория и наблюдения. — М.: Наука, 1988—280 с.
21. *Орлов М. Я., Шаврина А. В.* О содержании технеция в атмосферах холодных звезд // Науч. информ. Астрон. совет АН СССР.—1984.—Вып. 56.—С. 97—98.
22. *Рудницкий Г. М.* Молекулы в астрофизике // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия.—1983.—20.—С. 1—140.
23. *Рудницкий Г. М., Кудашкина Л. С.* Исследование переменных типа Миры Кита с мазерной эмиссией H<sub>2</sub>O // Перемен. звезды.—1988.—22, № 6.—С. 928—929.
24. *Стрелкова Э. П.* Показатели цвета 13 долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита // Перемен. звезды.—1956.—11, № 2.—С. 65—110.
25. *Стрельницкий В. С., Федорова А. В., Федорова О. В., Шмелд И. К.* Давление излучения на молекулы как механизм потери массы красными гигантами. 1. Качественный анализ // Науч. информ. Астрон. совет АН СССР.—1984.—Вып. 57.—С. 30—38.
26. *Физика космоса: Маленькая энциклопедия* / Под ред. Р. Сюняева. — М.: Сов. энциклопедия, 1986.—480 с.
27. *Францман Ю. Л.* Может ли вырожденное углеродно-кислородное ядро одиночной звезды достичь предела Чандрасекара? // Астрон. журн.—1988.—65, № 4.—С. 747—752.
28. *Францман Ю. Л.* Эволюционная стадия звезд класса S в Магеллановых Облаках // Науч. информ. Астрон. совет АН СССР.—1988.—Вып. 65.—С. 72—78.
29. *Шаховской Н. М.* О поляризации собственного излучения красных гигантов и сверхгигантов // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1969.—39.—С. 11—33.
30. *Alvarez R., Mennessier M. O.* Determination of Miras temperatures from TiO and VO bands. Estimates of distances // Astron. and Astrophys.—1997.—317, N 3.—P. 761—768.
31. *Alvarez R., Mennessier M. O., Barthes D., et al.* Oxygen-rich Mira variables: near-infrared luminosity calibrations. Populations and period-luminosity relations // Astron. and Astrophys.—1997.—327, N 2.—P. 656—661.
32. *Alvarez R., Plez B.* Near-infrared narrow-band photometry of M-giant and Mira stars: models meet observations // Astron. and Astrophys.—1998.—330, N 4.—P. 1109—1120.
33. *Andronov I. L.* (Multi-)frequency variations of stars. Some methods and results // Odessa Astron. Publ.—1994.—7.—P. 49—53.
34. *Andronov I. L., Kudashkina L. S.* Semi-regular variable RX Bootis: Double-period optical variation of a cosmic maser? // Astron. Nachr.—1988.—309, N 5.—P. 323—325.
35. *Andronov I. L., Marsakova V. I.* Phase curve changes and humps in a Mira-type star U Her // Astrophys. and Space Sci.—1998.—257, N 1.—P. 49—61.
36. *Barlow M. J., Nguen-Q-Rieu, Truong-Bach, et al.* The rich far-infrared water vapour spectrum of W Hya // Astron. and Astrophys.—1996.—315, N 2.—P. L241—L244.
37. *Barnes T. G.* An observational study of Mira variables. I. The near-infrared photometry // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1973.—25, N 221.—P. 369—392.
38. *Barthes D.* Pulsation modes of Mira stars and questioning of linear modelling: indications from

- HIPPARCOS and the LMC // *Astron. and Astrophys.*—1998.—333, N 2.—P. 647—657.
39. *Barthes D., Mennessier M. O., Vidal J. I., Mattei J. A.* Are low-order resonances observed in Mira pulsation? // *Astron. and Astrophys.*—1998.—334, N 1.—P. L1—L4.
40. *Barvainis R., McIntosh G., Predmor C. R.* Evidence for strong magnetic fields in the inner envelopes of late-type stars // *Nature.*—1987.—329, N 6440.—P. 613—615.
41. *Bertschinger E., Chevalier R. A.* A periodic shock model for Mira variable atmospheres // *Astrophys. J.*—1985.—299, N 1.—P. 167—190.
42. *Bowers P. F., Sinha R. P.* High-sensitivity search for OH emission from Mira variables // *Astron. J.*—1978.—83, N 8.—P. 955—959.
43. *Cahn J. H., Wyatt S. P.* The correlation of mass outflow velocity and luminosity for Mira variables // *Astrophys. J.*—1978.—221, N 1.—P. 163—174.
44. *Catchpole R. M., Feast M. W.* The luminosities of red supergiant variables in the Small Magellanic Cloud // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1981.—197, N 2.—P. 385—391.
45. *Celis L. S.* Spectral and luminosity variation of long-period red variable stars // *Astron. J.*—1986.—91, N 2.—P. 405—415.
46. *Chapman J. M., Rudnitskij G. M.* Shock waves and radio continuum in Miras // *Proc. IAU Symp. 191; Poster Session "Asymptotic Giant Branch Stars", Montpellier, France, Aug. 28 — Sept. 1.* — Montpellier, 1998.—P4-01.—12 p.
47. *Chinarova L. L., Andronov I. L.* Catalogue of main characteristics of pulsations of 173 semi-regular stars // *Odessa Astron. Publ.*—2001.—13.—P. 116—176.
48. *Chioni C., Bertelli G., Bressan A.* New developments in understanding the HR diagram // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1992.—30.—P. 235—285.
49. *Davis M. S.* The decreasing periods of R Aql and R Hya // *J. Amer. Assoc. Var. Star. Observ.*—1982.—11, N 1.—P. 27.
50. *de Laverny P., Mennessier M. O., Mignard F., Mattei J. A.* Detection of rapid photometric variations in Mira-type variables // *Astron. and Astrophys.*—1998.—330, N 1.—P. 169—174.
51. *Dickinson D. F.* Cosmic masers // *Sci. Amer.*—1978.—238, N 6.—P. 68—79.
52. *Efimov Yu. S., Kudashkina L. S.* Photopolarimetry of some Mira-type stars // *Odessa Astron. Publ.*—2001.—14.—P. 134—139.
53. *Feast M. W.* The pulsation, temperatures and metallicities of Mira and semiregular variables in different stellar systems // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—278, N 1.—P. 11—21.
54. *Feast M. W., Glass I. S., Whitelock P. A., Catchpole R. M.* A period-luminosity-color relation for Mira variables // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1989.—241, N 2.—P. 375—392.
55. *Flower P. J.* Bolometric correction for late-type giants and supergiants // *Astron. and Astrophys.*—1975.—41, N 3/4.—P. 391—394.
56. *Frost C. F., Cannon R. C., Lattanzio J. C., et al.* The brightest carbon stars // *Astrophys. Lett.*—1998.—332.—P. 17.
57. *Gillet D., Bouchet P., Maurice E.* Pulsating Stars, Spectroscopy and Shock Waves // *The Messenger. El Mensajero / Ed. P. Veron.* —1983.—N 34-Dec.—P. 38—41.
58. *González-Alfonso E., Cernicharo J., Alcolea J., Orlandi M. A.* Water vapour in circumstellar envelopes // *Astron. and Astrophys.*—1998.—334, N 3.—P. 1016—1027.
59. *Groenewegen M. A. T., Whitelock P. A.* A revised period-luminosity relation for carbon Miras // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—281, N 6.—P. 1347—1351.
60. *Haniff C. A., Scholz M., Tuthill P. G.* New diameter measurements for 10 Mira variables: Implications for effective temperatures, atmospheric structure and pulsation modes // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—276, N 3.—P. 640—650.
61. *Harvey P. M., Bechis K. P., Wilson W. J., Ball J. A.* Time variations in the OH microwave and infrared emission from late-type stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1974.—27, N 248.—P. 331—357.
62. *Herman J., Habing H. J.* OH/IR stars // *Phys. Repts.*—1985.—124, N 4.—P. 255—314.
63. *Herpin F., Baudry A., Alcolea J., Cernicharo J.* On the origin of the high velocity SiO maser emission from late-type stars // *Astron. and Astrophys.*—1998.—334, N 3.—P. 1037—1046.
64. *Hinkle K. H., Lebzelter T., Scharlach W. W. G.* Infrared velocities of long period variables: CO  $\Delta v = 3$  in four Miras and five SR variables // *Astron. J.*—1997.—114, N 6.—P. 2686—2699.
65. *Hinkle K. H., Scharlach W. W. G., Hall D. N. B.* Time series infrared spectroscopy of Mira variables, II. CO  $\Delta v = 3$  in eight Mira variables and one SRa variable // *Astrophys. J.*—1984.—56, N 1.—P. 1—17.
66. *Hufner S.* Dynamical modelling of AGB star atmospheres // *Proc. IAU Symp. 191: "Asymptotic Giant Branch Stars", Montpellier, France, 27 Aug.—1 Sept. / Eds T. Le Bertre, A. Lebre, C. Waelkens.* — Montpellier, 1999.—P. 159—168.—(ASP Conf. Ser).
67. *Hufner S., Jorgensen U. G., Loidl R., Aringer B.* Dynamic model atmospheres of AGB stars. I. Atmospheric structure and dynamics // *Astron. and Astrophys.*—1998.—340.—P. 497—507.
68. *Jaschek M., Keenan P. C.* Cool stars with excesses of heavy elements. — Dordrecht: Reidel., 1985.—398 p.
69. *Keenan P. C., McNeil R. C.* The Perkins catalog of revised MK types for the cooler stars //

- Astrophys. J. Suppl. Ser.—1989.—71.—P. 245.
70. *Keping Zhou, Yunxiang Hao, Peisheng Chen, et al.* JHK photometry for some stellar maser sources // *Astrophys. and Space Sci.*—1984.—107, N 2.—P. 373—380.
  71. *Kerschbaum F., Hron J.* Semiregular variables of types SRa and SRb. Basic properties in the visual and the IRAS-range // *Astron. and Astrophys.*—1992.—263.—P. 97—112.
  72. *Kerschbaum F., Hron J.* Semiregular variables of types SRa and SRb. New JHKLM-photometry for 200 stars // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1994.—106.—P. 397—411.
  73. *Kerschbaum F., Hron J.* Semiregular variables of types SRa and SRb. Energy distributions and stellar parameters // *Astron. and Astrophys.*—1996.—308.—P. 489—496.
  74. *Kerschbaum F., Olofsson H., Hron J.* Semiregular variables of types SRa and SRb. Circumstellar CO emission of an oxygen-rich sample // *Astron. and Astrophys.*—1996.—311.—P. 273—281.
  75. *Kerschbaum F., Olofsson H., Larsen F., Bergman P.* Mass loss O-rich semi-regular and irregular variables // *Proc. IAU Symp.* 191, Poster Session: “Asymptotic Giant Branch Stars”. — Montpellier, 1998.—P4-09.—9 p.
  76. *Kudashkina L. S., Andronov I. L.* Fourier Coefficients for the Light Curves of 62 Mira-Type Stars // *Odessa Astron. Publ.*—1996.—9.—P. 108—111.
  77. *Kudashkina L. S., Andronov I. L.* Linear dependences between the characteristics of the mean light curves of the Mira-type stars // *Variable stars: New frontiers. Abstracts.* — Sion, Switzerland, 1997.—P. 19.
  78. *Kudashkina L. S., Andronov I. L.* The Atlas of the Mean Light Curves of Mira-type stars // *IAU Symp.* N 191: Planetary Nebulae.—1998.—P. 77.
  79. *Kudashkina L. S., Andronov I. L.* Semiregular Variables: The Character of Variability and Possible Subdivision of the SRc class // *ASP Conf. Ser.: The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research / Eds L. Szabados, D. W. Kurtz.*—2000.—203.—P. 119.
  80. *Kudashkina L. S., Antonjuk K. A., Brukhanov I. S., et al.* Multiperiodicities in the Semiregular Variables // *Proc. 29<sup>th</sup> Conf. Var. Star. Res.* — Brno, Czech Rep., 1998.—P. 126—129.
  81. *Kudashkina L. S., Rudnitskij G. M.* Influence of shock waves on the light curves of long-period variables // *Odessa Astron. Publ.*—1994.—7.—P. 66—68.
  82. *Labeyrie A., Koehler L., Bonneau D., Blazit A., Foy R.* Strong TiO-related variations in the diameters of Mira and R Leonis // *Astrophys. J. Lett.*—1977.—218.—P. L75—L78.
  83. *Le Bertre T.* Optical and infrared observations of two type-II OH/IR sources // *Astron. and Astrophys.*—1987.—180, N 1-2.—P. 160—166.
  84. *Le Bertre T.* Optical and infrared observations of 23 carbon-rich stars. Modelling of the circumstellar dust shells // *Astron. and Astrophys.*—1997.—324.—P. 1059—1070.
  85. *Le Bertre T. and Winters J. M.* On the relations between infrared colors and mass rates for Mira stars // *Astron. and Astrophys.*—1998.—334.—P. 173—180.
  86. *Lee T. A.* Photometry of high-luminosity M-type stars // *Astrophys. J.*—1970.—162.—P. 217.
  87. *Lloyd Evans T.* Red variables in the central bulge of the Galaxy. I. The period distribution of Mira variables // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1976.—174.—P. 169.
  88. *Lockwood G. W.* Near-Infrared Photometry of Mira Variables // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1972.—24.—P. 375—420.
  89. *Lockwood G. W.* Near-infrared photometry of unidentified IRC stars. III — The Mira variables of spectral type M10 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1985.—58, N 1.—P. 167—177.
  90. *Lopez Arroyo.* Aspectos observacionales de las estrellas variables «Mira» // *Bol. astron. Observ. Madrid.*—1984.—11, N 3.—P. 5—16.
  91. *Ludendorff H.* Untersuchungen über veränderlichen Sterne VIII. // *Astron. Nachr.*—1926.—228.—S. 369.
  92. *Maffei P., Tosti G.* Rapid variation in long-period variables // *Astron. J.*—1995.—109, N 6.—P. 2652—2654.
  93. *Mantegazza L.* BS Lyrae: a double mode Mira-star with a dominant first overtone mode // *Astron. and Astrophys.*—1996.—315, N 3.—P. 481—484.
  94. *Marigo P., Girardi L., Bressan A.* The third dredge-up and the carbon star luminosity functions in the Magellanic Clouds // *Astron. and Astrophys.*—1999.—344, N 1.—P. 123—142.
  95. *Mattei J. A., Foster G., Hurwitz L. A., et al.* Classification of red variables // *Proc. ESA Symp.: «Hipparcos — Venice'97», Venice, Italy, 13—16 May, 1997 / Ed. B. Battick.* — 1997.—P. 269—274.—(ESA SP-402).
  96. *Marsakova V. I., Andronov I. L.* Cycle-to-cycle changes of Mira-type variable X Oph // *Proc. 29<sup>th</sup> Conf. Var. Star. Res. / Eds J. Dusek, M. Zejda.* — Brno, Czech Rep. — 1998.—P. 130—137.
  97. *Marsakova V. I., Andronov I. L.* Catalogue of main characteristics of individual pulsational cycles of 35 Mira-type stars // *Odessa Astron. Publ.*—1998.—11.—P. 79—124.
  98. *Mennessier M. O.* Near-infrared photometry and OH observations of Mira variables. Implications for stellar evolution // *Astron. and Astrophys.*—1981.—93, N 1/2.—P. 325—333.
  99. *Mennessier M. O., Luri X., Figueras F., et al.* Barium stars, galactic populations and evolution // *Astron. and Astrophys.*—1997.—326, N 3.—P. 722—730.

100. *Mennessier M. O., Mattei J. A., Luri X.* New aspects of long-period variable stars from HIPPARCOS: first results // Proc. ESA Symp.: «Hipparcos — Venice'97», Venice, Italy, 13—16 May, 1997 / Ed. B. Battrock. — 1997.—P. 275—278.—(ESA SP-402).
101. *Nagel L. M.* The changing period of Z Tauri // J. Assoc. Astron. Var. Star. Observ.—1986.—15, N 1.—P. 48—53.
102. *Nussbaumer H., Schild H. M., Vogel M.* Relative C, N, O abundances in red giants, planetary nebulae, novae and symbiotic stars // Astron. and Astrophys.—1988.—198, N 1-2.—P. 179—186.
103. *Olivier E. F., Whitelock P., Marang F.* Dust-enshrouded asymptotic giant branch stars in the solar neighbourhood // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2001.—326, N 2.—P. 490—514.
104. *Paczynski B.* Evolution of single stars. VI. Model nuclei of planetary nebulae // Acta astron.—1971.—21.—P. 417.
105. *Perrin G., Coudü du Foresto V., Ridgway S. T., et al.* Interferometric observations of R Leonis in the K band // Astron. and Astrophys.—1999.—345, N 1.—P. 221—232.
106. *Qiao C. J., Leung K. C.* Abstract // Bull. Amer. Astron. Soc.—1986.—18, N 1.—P. 38.
107. *Reimers D.* // Mem. Soc. roy. sci. Liege.—1975.—8.—P. 369—382.
108. *Renzini A.* Stellar Nucleosynthesis // Proc. 3rd Workshop Adv. Sch. Astron. Ettore Majorana Cent. Sci. Cult. — Dordrecht e. a., 1984.—P. 99.
109. *Renzini A., Voli M.* Advanced evolutionary stages of intermediate-mass stars. I — Evolution of surface compositions // Astron. and Astrophys.—1981.—94, N 1.—P. 175.
110. *Ridgway S. T., Benson J. A., Dyck H. M., et al.* The infrared angular diameter of omicron Ceti near maximum light // Astron. J.—1992.—104, N 6.—P. 2224—2228.
111. *Rudnitskij G. M.* The nature of circumstellar maser in longperiod variable stars // Proc. Internat. Colloq. «From Miras to Planetary Nebulae: Which Path for Stellar Evolution?» / Eds M. O. Mennessier, A. Omont. — Gif sur Yvette: Editions Frontières, 1990.—P. 268.
112. *Schaefer B. E.* Flares on Mira stars? // Astrophys. J.—1991.—366, N 2.—P. L39—L42.
113. *Schwartzschild K., Hörm R.* Hydrogen Mixing by Helium-Shell Flashes // Astrophys. J.—1967.—150.—P. 961.
114. *Schweitzer E.* Aquarii, une variable unique: Mira, symbiotique, algolide et nova recurrente // Bull. de l'AFOEV.—1986.—N 35.
115. *Terrill Ch. L.* Changes in the near-infrared spectra on fifty-one red variable stars // Astron. J.—1969.—74, N 3.—P. 413—432.
116. *Turner B. E., Heiles C. E.* Nonthermal OH Emission in Interstellar Dust Clouds // Astrophys. J.—1971.—170.—P. 453—462.
117. *Tuthill P. G., Haniff C. A., Baldwin J. E., Feast M. W.* No fundamental mode pulsation in R Leonis? // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1994.—266, N 4.—P. 745—751.
118. *Van der Veen W. E. C. J., Rutgers M.* A comparison between CO-, OH-, and IR- mass-loss rates of evolved stars // Astron. and Astrophys.—1989.—226, N 1.—P. 183—202.
119. *van Leeuwen F., Feast M. W., Whitelock P. A., Yudin B.* First results from HIPPARCOS trigonometrical parallaxes of Mira-type variables // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1997.—287, 5.—P. 955—960.
120. *van Paradijs J.* Model Atmospheres and Effective Temperatures of K- and M-type Giants // Astron. and Astrophys.—1976.—49, N 1.—P. 53—56.
121. *Vardya M. S.* Shape of the visual light curve and detection of a 1.35 cm H<sub>2</sub>O line in single M Miras // Astron. and Astrophys.—1987.—182, N 1.—P. 75—79.
122. *Vardya M. S., de Jong T., Willems F. J.* IRAS low-spectrograph observations of silicate and molecular SiO emission in Mira variables // Astrophys. J.—304, N 1.—1986.—P. L29—L32.
123. *Vassiliadis E., Wood P. R.* Evolution of low- and intermediate- mass stars to the end of the asymptotic giant branch with mass loss // Astrophys. J.—1993.—413, N 2, Pt. 1.—P. 641—657.
124. *Whitelock P. A.* The pulsation mode and period-luminosity relationship of cool variables in globular clusters // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1986.—219, N 3.—P. 525—536.
125. *Whitelock P. A.* Symbiotic Miras // Publ. Astron. Soc. Pacif.—1987.—99, N 617.—P. 573—591.
126. *Whitelock P. A.* Pulsating Cool Stars and Galactic Structure // ASP Conf. Ser.: Astrophysical Applications of Stellar Pulsation / Eds R. S. Stobi, P. A. Whitelock.—1995.—83.—P. 165—175.
127. *Whitelock P. A.* Asymptotic Giant Branch Variables // Odessa Astron. Publ.—2001.—14.—P. 180—184.
128. *Whitelock P. A. and Feast M. W.* Hipparcos parallaxes for Mira-like variable // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—319, N 4.—P. 759—770.
129. *Whitelock P., Marang F., Feast M.* Infrared colors for Mira-like long-period variables found in the Hipparcos Catalogue // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—319, N 4.—P. 728—758.
130. *Whitelock P., Menzies J., Feast M., et al.* Mass-losing stars in the South Galactic Cap // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1995.—276, N 1.—P. 219—254.
131. *Whitelock P., Menzies J., Feast M., et al.* High-mass-loss AGB stars in the South Galactic Cap // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1994.—267, N 3.—P. 711—742.



132. *Whitney C. A.* Semiregular variables: are they chaotic or ringing? // *J. Amer. Assoc. Var. Star. Observ.*—1984.—13, N 1.—P. 31—37.
133. *Willems F. J., de Jong T.* Carbon stars with oxygen-rich circumstellar dust shells: observational evidence for the onset of the carbon star phase // *Astrophys. J.*—1986.—309, N 2.—P. L39—L42.
134. *Wood P. R.* Mira variables: pulsation, mass loss and evolution // *ASP Conf. Ser.: Confrontation between stellar pulsation and evolution* / Eds C. Cacciari, G. Clementini.—1990.—11.—P. 355—364.
135. *Wood P. R.* Mira variables: Theory versus observation // *ASP Conf. Ser.: Astrophysical Applications of Stellar Pulsation* / Eds R. S. Stobie, P. A. Whitelock.—1995.—83.—P. 127—138.
136. *Wood P. R.* Evolution, pulsation and mass loss in AGB stars // *Mem. Soc. astron. ital.*—1996.—67, N 3.—P. 691—697.
137. *Wood P. R., Alcock C., Allsman R. A., et al.* MACHO observations of LMC red giants: Mira and semi-regular pulsators, and contact and semi-detached binaries // *Proc. IAU Symp. 191: "Asymptotic Giant Branch Stars", Montpellier, France, 27 Aug.—1 Sept.* / Eds T. Le Bertre, A. Lebre, C. Waelkens. — Montpellier, 1999.—P. 151—158.—(ASP Conf. Ser).
138. *Wood P. R., Zarro D. M.* Helium shell flashing in low-mass stars and period changes in Mira variables // *Astrophys. J.*—1981.—247, N 1.—P. 247—256.

Поступила в редакцию 07.10.02