

УДК: 524.336

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА ЗВЕЗД ТИПА МИРЫ КИТА

Н.Д.МЕЛИКЯН

Поступила 3 июля 1996

Принята к печати 14 августа 1996

Приводятся результаты поляриметрических наблюдений, полученные за последние 30 лет в Бюраканской обсерватории для долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита. Анализ результатов этих наблюдений показывает, что существует реальная зависимость между степенью поляризации света и яркостью этих звезд. Максимальная степень поляризации света у них наблюдается в середине восходящей ветви кривой блеска. Степень поляризации света коррелирует с периодом изменения блеска. Средние значения степени поляризации света у звезд типа Миры Кита растут с увеличением их периода до $P=380$ суток.

1. *Введение.* Поляриметрические наблюдения долгопериодических переменных звезд очень важны в изучении физической природы их пульсаций. Начиная с шестидесятых годов в Бюраканской обсерватории проводятся поляриметрические наблюдения мирид. Накопилось большое количество поляриметрических измерений звезд типа Миры Кита [1-5]. В этих работах приводятся результаты 261 поляриметрического измерения 85 долгопериодических переменных звезд.

На основе поляриметрических наблюдений мирид Варданян [6] пришел к выводу, что степень поляризации света связана с изменением блеска звезды и что наибольшие значения степени поляризации света встречаются вблизи минимума. Более детальное рассмотрение этого вопроса, на основе анализа поляриметрических наблюдений 24 мирид, позволили сделать предположение, что поляризация света у них с большей вероятностью встречается в период возгорания блеска [4,5]. Почти всегда поляриметрические наблюдения долгопериодических переменных звезд указывают на переменный характер степени поляризации света.

Известно, что долгопериодические переменные звезды обладают протяженными оболочками. Принято считать, что поляризация света этих звезд является результатом рассеяния, следовательно, изменение степени поляризации у них в течение времени свидетельствует об изменениях параметров оболочки. С этой точки зрения очень важно определение зависимости изменения степени поляризации света от фазы изменения блеска звезд типа Миры Кита. Оболочки этих звезд богаты молекулярными образованиями. Для них особенно характерно наличие молекул TiO. Исследования поглощения и цветовых характеристик этих звезд позволили предполагать о наличии крупных частиц в их оболочках [7].

Интересно рассмотреть также зависимость степени поляризации света долгопериодических переменных звезд от периода их пульсаций. Уже первое такое рассмотрение привело Варданяна [6] к заключению, что наблюдение высокой степени поляризации света ожидается у звезд с периодами $P > 350^d$ и $P < 200^d$. Рассмотрение этого вопроса на основе наших первых поляриметрических наблюдений мирид не привело к подобным результатам [4]. Результаты, полученные Варданяном [6], основаны вообще на анализе поляриметрических наблюдений пульсирующих переменных звезд. Следовательно, он не может быть применен конкретно для звезд типа Миры Кита. В настоящее время рассмотрение вопроса зависимости степени поляризации света от периода мирид на основе накопившихся данных поляриметрических наблюдений [1-5], на наш взгляд, может оказаться более результативным.

В настоящей работе, на основе анализа однородных данных поляриметрических наблюдений, выполненных в Бюраканской обсерватории за последние 30 лет, рассматривается вопрос зависимости степени поляризации света мирид от фазы изменения блеска и от периода.

2. *Результаты поляриметрических наблюдений.* В течение приблизительно 30 лет в Бюраканской обсерватории накопилось большое количество поляриметрических наблюдений долгопериодических переменных звезд. К сожалению, подавляющее большинство наблюдений выполнено вблизи максимума блеска, так как большая часть этих наблюдений проводилась с целью обнаружения поляризации света у звезд красных гигантов и сверхгигантов. Тем не менее, из накопившихся поляриметрических наблюдений можно выбрать определенное количество поляриметрических измерений, с помощью которых можно проследить за ходом изменения степени поляризации света в период изменения блеска звезды.

Из 85 долгопериодических переменных звезд у 20 в разное время зарегистрирована поляризация света. Для 37 мирид сделаны, по крайней мере, 2 поляриметрических измерения в течение одного цикла изменения блеска. Для остальных звезд поляриметрические наблюдения не позволили обнаружить поляризацию света, превышающую ошибки измерений.

В табл. 1 приводится список долгопериодических переменных звезд, у которых в период наблюдений хотя бы один раз поляризация света была зарегистрирована [1-5]. В табл. 1, в соответствующих столбцах, приводятся: название звезды по ОКПЗ [8], максимальное ($P_{\max\%}$) и минимальное ($P_{\min\%}$) значения степени поляризации света, число измерений, когда зарегистрирована поляризация и полное число поляриметрических измерений.

Как видно из данных табл. 1, из 79 поляриметрических измерений в 61 случае зарегистрирована поляризация света. Видно также, что в течение одного цикла изменения блеска звезды степень поляризации света изменяется, и в некоторых случаях может быть недоступной для регистрации.

Таблица 1

 СПИСОК МИРИД, У КОТОРЫХ
 ЗАРЕГИСТРИРОВАНА ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Название звезды (ОКПЗ)	$P_{\max}\%$	$P_{\min}\%$	Число измерений	Полное число измерений
R Aql	2.2%	<0.5%	3	5
TU Aql	2.1	1.8	2	2
T Aqr	1.2	<0.5	2	4
R Aur	0.9	<0.5	1	2
R Cas	0.9	<0.5	2	5
T Cep	2.2	<0.5	6	7
S Cep	2.3	<0.5	7	8
U Cyg	0.9	<0.5	3	4
V Cyg	4.3	<0.3	3	4
T Dra	1.3	0.7	2	2
R Gem	3.7	<0.5	5	6
U Her	1.7	<0.5	1	4
R Leo	2.5	1.4	2	2
R LMi	5.1	1.0	2	2
R Lep	2.0	1.5	2	2
U Ori	3.6	<0.5	6	8
Z Oph	4.0	1.7	6	6
Tu Peg	2.1	1.4	2	2
RZ Peg	1.2	0.7	2	2
T Sgr	1.9	1.8	2	2

3. *Зависимость поляризации света от блеска мирид.*
 Имющиеся данные поляриметрических измерений долгопериодических переменных звезд позволяют проследить за ходом изменения степени поляризации света в зависимости от цикла изменения блеска. Для иллюстрации на рис. 1а-1б приводится зависимость степени поляризации от блеска для 8 звезд типа Миры Кита. Для построения этой зависимости использованы известные результаты поляриметрических наблюдений мирид [1-5]. Как видно из данных табл. 1, для этих звезд имеются по крайней мере по 4 поляриметрических измерения в течение одного цикла изменения блеска. На рисунках приведена схематическая кривая

изменения блеска (пунктирная линия). Для этих звезд, используя элементы изменения блеска приводимых в ОКПЗ [8], были определены фазы изменения блеска, когда выполнены эти поляриметрические измерения. Независимо от формы кривой блеска, время возгорания и время затухания разделены на пять временных частей. С помощью элементов изменения блеска определена фаза изменения блеска соответствующего поляриметрического измерения. Как видно из рис. 1, максимальная степень поляризации света для отдельных звезд зарегистрирована или в период

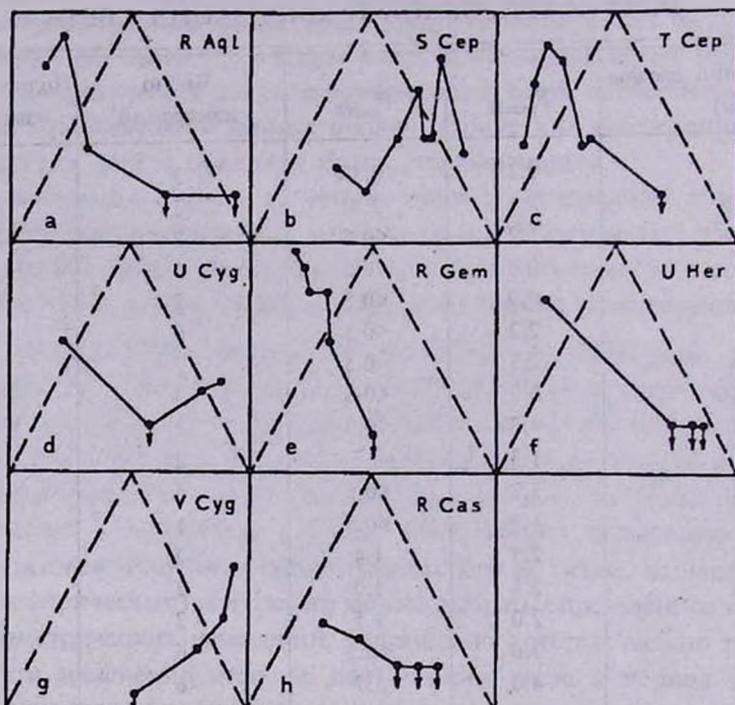


Рис. 1. *a - h*. Зависимость степени поляризации света от блеска для 8 звезд типа Миры Кита. По оси ординат даны значения относительной яркости звезды (пунктирная линия) и степени поляризации (точки), а по оси абсциссе - время. Стрелки означают, что значения изменения степени поляризации находятся в пределах ошибок измерений.

возгорания или в конце затухания блеска, задолго после максимума. Во всех случаях через некоторое время после максимума блеска степень поляризации света принимает минимальное значение. Это не противоречит ранее полученным результатам о максимальном значении степени поляризации света вблизи минимума блеска звезды [6], и о максимальном ее значении в период возгорания [4,5]. Видно, что ход изменения степени поляризации света для отдельных звезд очень похож. Видно также, что для отдельной звезды имеющиеся наблюдательные данные не достаточны для прослеживания значений степени поляризации света в течение полного цикла изменения блеска звезды.

При исследовании корреляции степени поляризации от изменения блеска для 24 мирид [4,5], кривые изменения блеска были разделены на две части: период возгорания блеска до максимума, и период затухания блеска до минимума. В результате получилось, что 75% измерений, выполненных в период возгорания, позволяют зарегистрировать поляризацию света, а в период затухания блеска - всего 5%. Этот результат стал основой для предположения, что поляризацию света с большей вероятностью можно зарегистрировать в период возгорания [4,5]. Имеющиеся наблюдательные данные позволяют более детально рассмотреть этот вопрос.

Используя известные данные поляриметрических измерений, можно получить корреляцию между средними значениями степени поляризации света от среднего блеска звезды. Для получения такой зависимости использовались результаты поляриметрических наблюдений 37 мирид, для которых были получены 126 поляриметрических измерений. Эти данные позволяют получить усредненную зависимость степени поляризации света от блеска. Для всех 126 поляриметрических измерений определены фазы изменения блеска. Определив в каждом участке одного цикла среднее значение степени поляризации света, можно проследить за средним ходом изменения степени поляризации света в среднем цикле. Разделение кривой блеска на отдельные временные участки и определение фазы изменения блеска с помощью элементов изменения блеска, приводимых в ОКПЗ [8], сделаны так, как в случае отдельных звезд: для каждой из 37 долгопериодических переменных звезд время возгорания и время затухания разбиты на пять частей. Для каждого измерения звезды вычислен участок кривой, когда выполнено поляриметрическое измерение. В итоге получилась одна синтетическая кривая блеска, в отдельных участках которой имеется сравнительно большое количество поляриметрических измерений. В результате, в течение одного цикла средней кривой блеска звезды получаются 10 временных участков: 5 - до максимума, и 5 - после. Полученные данные представляют изменения хода средних значений степени поляризации света в зависимости от средней кривой блеска долгопериодической переменной звезды. Следует отметить, что число поляриметрических измерений по отдельным временным участкам распределено неравномерно: если вблизи максимума блеска в одном участке число измерений достигает до 20, то в участке, охватывающем начальную фазу возгорания блеска, число измерений равняется 5.

На рис. 2 приведена средняя кривая изменения степени поляризации света и схематическая кривая изменения блеска для синтетической долгопериодической переменной звезды.

Как видно из рис. 2 кривая изменения блеска звезды и кривая изменения степени поляризации света имеют фазовое смещение на

величину ~ 0.25 . Максимальное значение степени поляризации ожидается в середине возгорания блеска, и, постепенно уменьшаясь, это значение достигает минимума незадолго до минимума блеска звезды. После чего блеск звезды продолжает падать, а степень поляризации света начинает возрастать. Таким образом, и для отдельной звезды, для которой имеется достаточное количество поляриметрических измерений, и для средней долгопериодической переменной звезды, зависимость степени поляризации от изменения блеска реально существует.

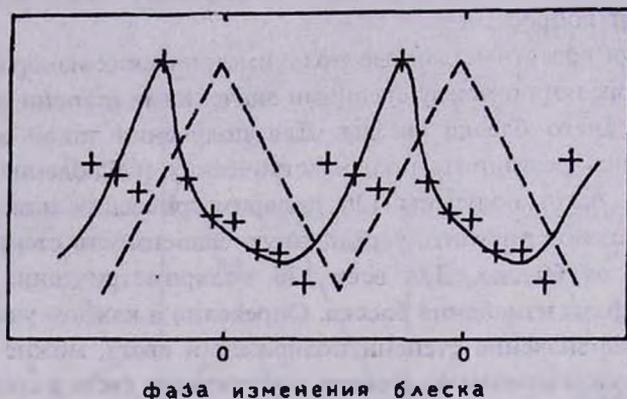


Рис. 2. Средняя кривая изменения степени поляризации света и схематическая кривая изменения блеска для синтетической долгопериодической переменной звезды. Крестиками показаны средние значения степени поляризации для отдельных фаз изменения блеска, а сплошная линия показывает ее изменения. Пунктирной линией дана кривая изменения блеска.

Полученную зависимость степени поляризации света от блеска звезды можно считать статистически правильной. Результаты поляриметрических наблюдений показывают, что для отдельных звезд значения степени поляризации даже в одной и той же фазе изменения блеска несколько отличаются друг от друга. По всей вероятности, степень поляризации изменяется также от цикла к циклу, но в среднем кривая изменения степени поляризации всегда имеет фазовое смещение по отношению к кривой изменения блеска долгопериодических переменных звезд.

4. *Зависимость степени поляризации от периода.* В табл. 1 приводится список долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита, у которых в течение последних 30 лет поляриметрические наблюдения позволили зарегистрировать собственную поляризацию света. Для определения зависимости между собственной поляризацией и периодом этих звезд, используем средние значения степени поляризации света для каждой звезды.

На рис. 3 приведена эта зависимость. По оси ординат отложены средние значения степени поляризации света ($P\%$), а по оси абсцисс - период изменения блеска (P) (периоды звезд из табл. 1 находятся в пределах от 200 до 500 суток).

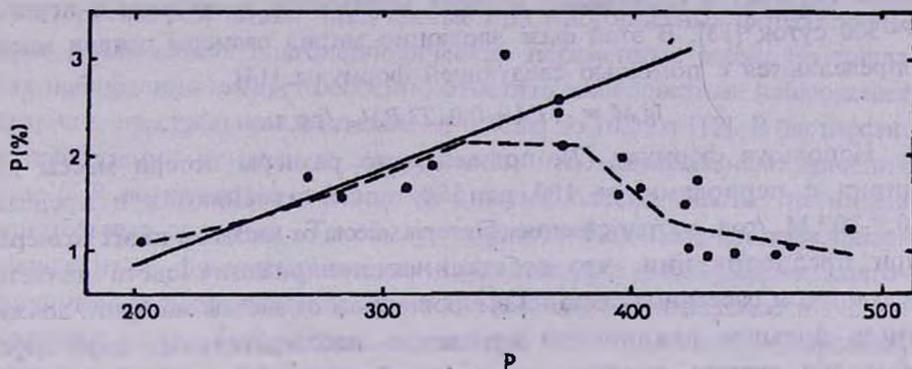


Рис. 3. Зависимость степени поляризации света от периода. Пунктирная линия показывает средний ход изменения степени поляризации, а сплошная линия проведена с помощью метода наименьших квадратов для 9 звезд с периодами < 380 суток.

На рис. 3 видно, что значение степени поляризации света увеличивается с увеличением периода до $P=380$ суток, после чего начинает уменьшаться. В этом промежутке зависимость степени поляризации от периода грубо можно представить с помощью следующей формулы

$$P\% = [0.01P - 1.1] + 0.2. \quad (1)$$

На основе предположения, что в возникновении поляризации света большую роль играет рассеяние света в оболочке звезды, показано, что изменение степени поляризации, как у тесных двойных [9], так и у одиночных звезд [10], связано с потерей их массы. В результате было получено, что с увеличением изменения степени поляризации, пропорционально растут и потери массы от звезды. Оценки размеров потери масс от вышеуказанных звезд [9,10] с удовлетворительной точностью совпадают с другими независимыми оценками.

Имеющиеся наблюдательные данные свидетельствуют, что потеря вещества имеет место и у долгопериодических переменных звезд. Следовательно, и изменение степени поляризации света у них в период изменения блеска (рис. 1, 2), и изменение среднего значения степени поляризации в зависимости от периода (см. формулу (1)), по всей вероятности, связано с потерей вещества у мирид.

В настоящее время в эволюции звезд на ассимптотической ветви гигантов (AGB) приняты две основные особенности: 1) термальные пульсации, и 2) потеря массы. Прямым доказательством существования термальных пульсаций принято считать наблюдаемые изменения периодов

некоторых звезд типа Миры Кита [11]. Интенсивность термальных пульсаций увеличивается в сторону красных гигантов [12]. При допущении реальности существования термальных пульсаций у мирид, размеры потери массы у них экспоненциально растут с увеличением периода до начала фазы сверхветра (supergwind), которая начинается в среднем с периода $P=500$ суток [13]. В этой фазе эволюции мирид размеры потери массы определяются с помощью следующей формулы [14]

$$\lg \dot{M} = -11.4 + 0.0123 P M_{\odot} / \text{год.} \quad (2)$$

Используя формулу (2), получим, что размеры потери массы для мирид с периодами от 100 до 500 суток, изменяются в пределах 10^{-10} - $10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$, соответственно. Потеря массы от звезды в таких размерах, при предположении, что собственная поляризация света является результатом рассеяния света на выброшенном от звезды материи, должна иметь большое влияние на изменение наблюдательных параметров оболочки звезды, в частности, на наблюдаемые значения степени поляризации. Сопоставление формул (1) и (2) показывает, что в среднем, значение скорости истечения вещества от звезды и степень поляризации света коррелируют: с увеличением степени поляризации света растут и размеры потери массы от звезды. Такой результат свидетельствует или о едином механизме порождения поляризации света и истечения вещества от звезды, или о том, что изменение одной из этих величин обусловлено изменением второй. В любом случае такая зависимость очевидна. Полученная зависимость только качественно может характеризовать связь между величинами \dot{M} и $P\%$ для звезд с периодами до 380 суток.

Таким образом, степень поляризации света у долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита коррелирует с периодом их изменения блеска, и зависит от потери массы от них.

5. Зависимость степени поляризации света мирид от других наблюдательных параметров. Зависимость степени поляризации света от блеска звезды, полученную выше (рис. 2), можно считать только статистически правильной. Поляриметрические наблюдения показывают, что для каждой звезды значения степеней поляризации отличаются друг от друга даже от цикла к циклу.

Яркие водородные линии достигают наибольшей интенсивности через 20-30 суток после максимума. Наряду с изменением интенсивности эмиссионных линий, изменяется и их смещение от нормального положения. Больше всего линии водорода смещены в сторону коротких длин волн в период их максимальной интенсивности. Зависимость сдвига ярких линий водорода от фазы изменения блеска для долгопериодической переменной звезды R Девы подробно анализируется в книге Горбачко и Минина [15]. Анализ изменения лучевых скоростей от фазы изменения

блеска у этой звезды проводится на основе спектральных наблюдений, выполненных еще Мерриллом и Джосем [16]. Такая зависимость в среднем существует для всех изученных долгопериодических переменных звезд [15].

Интересны результаты, полученные при многоцветных фотоэлектрических наблюдениях долгопериодических переменных звезд. Из числа таких наблюдений следует особенно отметить многоцветные наблюдения 67 мирид в спектральном диапазоне от $0.36\mu\text{m}$ до $10.2\mu\text{m}$ [17]. В частности, эти наблюдения привели к заключению, что минимальные значения цвета $U-B$ встречаются вблизи минимума блеска, часто принимая отрицательные значения. Такой же результат был получен при фотографических и фотоэлектрических многоцветных наблюдениях долгопериодической переменной звезды γ Ori [18, 19]. Минимальное значение показателя цвета $U-B$ вблизи минимума блеска является хорошим аргументом в пользу гипотезы, выдвинутой еще Шайном [20], о наличии избыточного коротковолнового излучения у этих звезд. Таким образом, интенсивности эмиссионных линий водорода, значения лучевых скоростей и показателя цвета $U-B$, коррелируют со значениями степени поляризации.

Для возникновения поляризации света у мирид предполагаются следующие механизмы: 1) чистое рассеяние света на околозвездной оболочке, 2) эффект эллипсоидальной формы оболочки. Гипотеза поляризации света мирид, вследствие рассеяния света в их атмосферах, была предложена еще в шестидесятые годы [21-23].

Вопрос о возникновении поляризации света долгопериодических переменных звезд, вследствие эллипсоидальной формы их оболочек не рассматривался. Фотографические наблюдения звезды γ Ori позволили зарегистрировать вокруг нее туманность эллипсоидальной формы [18,19]. Образование такой формы свидетельствует или о наличии преимущественных направлений выброса вещества и расширения оболочки, или же о наличии второго компаньона. Расчеты Нагирнера [24] для реальных атмосфер показали, что степень поляризации света звезды на краю диска увеличивается, переходя к поздним спектральным классам, и что при больших сжатиях оболочки ее эллипсоидальность в возникновении поляризации света может играть большую роль.

Зависимость степени поляризации от периода мирид имеет очень важное значение, особенно, если принимать во внимание, как было показано выше, что степень поляризации света тесно связана с потерей массы от звезды. Эмпирическая зависимость (см. формулу (2)) [14] имеет разбросы по периоду ~ 100 суток. Отметим, что эмпирическая зависимость, представленная с помощью формулы (2), является приближенной.

Зависимость степени поляризации света от скорости и размеров потери массы позволяет предположить, что, по-видимому, изменение степени

поляризации света в течение одного цикла изменения блеска связано с изменениями размеров потери массы. При правильности такого предположения можно заключить, что максимальные размеры выброса вещества у долгопериодических переменных звезд происходят в середине возгорания блеска, а минимальные - недолго до минимума (рис. 2).

6. *Заключение.* Таким образом, анализ поляриметрических наблюдений долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита, выполненных за последние 30 лет в Бюраканской обсерватории, приводит к следующим результатам.

а) Из 85 исследованных мирид только у 20 зарегистрирована поляризация света.

б) Для долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита степень поляризации света интегрального излучения изменяется в течение одного цикла изменения блеска. Причем, изменяется по определенному закону (см. рис. 2)

в) Результаты поляриметрических наблюдений показывают, что степень поляризации света мирид в среднем зависит от периода их изменения блеска (рис. 3) (для звезд с периодами до $P = 380-400$ суток степень поляризации света с увеличением периода увеличивается, а после - начинает уменьшаться). Сравнение этого результата с результатом зависимости периода изменения блеска от скорости потери массы [14] показало, что для звезд с периодами $P < 380$ суток, с увеличением степени поляризации света, скорости потери массы от звезды растут.

Автор благодарит Р.А.Варданяна и Г.А.Арутюняна за обсуждение результатов настоящей работы и ценные советы.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория, Армения

THE LIGHT POLARIZATION OF MIRA CETI TYPE STARS

N.D.MELIKIAN

The results of polarimetric observations obtained in Byurakan observatory for last 30 years for Mira Ceti type long - period variables are presented. The analysis of these observations showed a real correlation between the degree of light polarization and the brightness of these stars. The highest degree of light polarization is observing in the middle of increasing branch of light curve. The

degree of light polarization was correlated with the period of light variation. The mean degree of light polarization for Mira Ceti type stars is increasing with the increasing of their periods up to $P = 380$ days.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Р.А.Варданян, М.А.Ерицян*, Сообщ. Бюраканской обс., **61**, 87, 1989.
2. *М.А.Ерицян, С.Е.Нерсисян*, Астрофизика, **20**, 355, 1984.
3. *Р.А.Варданян*, Докт. дис., Ереван, 1985.
4. *Н.Д.Меликян, М.А.Ерицян, А.А.Карапетян*, Астрофизика, **38**, 359, 1995.
5. *Н.Д.Меликян, М.А.Ерицян*, Астрофизика, **39**, 385, 1996.
6. *Р.А.Варданян*, Астрофизика, **6**, 77, 1970.
7. *Р.А.Варданян*, Астрофизика, **36**, 535, 1993.
8. *П.Н.Холопов и др.*, ОКПЗ, Наука, М., 1985.
9. *Н.М.Шаховской*, Астрон. ж., **41**, №6, 1042, 1964.
10. *Э.А.Витриченко, Н.С.Ефимов*, Изв. Крым. астрофиз. обс., **34**, 114, 1965.
11. *P.R.Wood, D.M.Zarro*, Astrophys. J., **247**, 247, 1981.
12. *I.Jr.Iben*, Astrophys. J., **196**, 525, 1975.
13. *E.Vassiliadis, P.R.Wood*, Astrophys. J., **413**, 641, 1993.
14. *P.R.Wood*, in "From Miras to Planetary Nebulae", Which Path for Stellar Evolution? cds. M.O.Menntssier, A.Omont (Yvette Cedex: Editions Frontieres), **67**, 1990.
15. *В.Г.Горбачкий, И.Н.Минин*, Нестационарные звезды, М., 1963.
16. *R.Merrill, A.Joy*, Astrophys. J., **69**, 379, 1929.
17. *E.Mendoza*, Bol. Obs. Tonantzintla, **4**, 28, 114, 1967.
18. *Н.Д.Меликян, Р.Ш.Нацвалишвили, М.Делла Валле*, Астрофизика, **28**, 329, 1988.
19. *Н.Д.Меликян, С.Д.Якубов*, Астрофизика, **38**, 5, 1995.
20. *Г.А.Шайн*, Изв. АН СССР, сер. физ., **9**, 161, 1945.
21. *R.Zappala*, Astrophys. J., **148**, 741, 1967.
22. *K.Serkowski et al.*, Astron. J., **73**, 677, 1968.
23. *В.А.Домбровский*, Астрон. цирку., **№498**, 1969.
24. *Д.И.Нагирнер*, Труды Астрон. обс. ЛГУ, **19**, 79, 1962.