АСТРОФИЗИКА

ТОМ 42 НОЯБРЬ, 1999 ВЫПУСК 4

УДК: 524.33

КЛАССИФИКАЦИЯ КРИВЫХ БЛЕСКА МИРИД

Н.Д.МЕЛИКЯН

Поступила 18 мая 1999
Принята к печати 30 июня 1999

На основе анализа кривых блеска 223 долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита, зарегистрированных с помощью космического телескопа HIPPARCOS, показано, что все кривые блеска этих звезд по внешней форме можно разделить на две группы: звезды, показывающие простые кривые блеска синусоидальной формы, и звезды со сложными кривыми блеска, с горбовидными образованиями на восходящей ветви кривой. Некоторые наблюдательные параметры исследуемых звезд проявляют тенденцию группирования к группам звезд со сложными и простыми кривыми блеска. Звезды со сложными кривыми блеска обладают большими периодами, по абсолютной болометрической звездной величине они ярче и вероятность обнаружения у них поляризации света больше.

1. *Введение*. Долгопериодические переменные звезды являются одними из самых многочисленных среди переменных звезд в Галактике. Еще в начале века в Гарвардский каталог долгопериодических переменных звезд было включено 1760 объектов, 1040 из которых обладали периодами, превышающими 100 суток [1]. В настоящее время из приблизительно 28000 известных переменных звезд, приведенных в Общем Каталоге Переменных Звезд (ОКПЗ), около 5800 являются долгопериодическими переменными [2]. Такое обилие указывает на то, что эти звезды являются очень важным звеном в эволюционной цепи красных гигантов и сверхгигантов.

Согласно ОКПЗ [2], долгопериодические переменные звезды обладают следующими характеристиками; одновременное наличие эмиссионных линий водорода и полос поглощения TiO, поздний спектральный класс типа Me, Ce, и Se и периоды изменения блеска от 80 до 1000 суток с амплитудами в V лучах от $2^m.5$ до $11^m.0$. Они являются источниками инфракрасного и радио излучений. Изменения в этих лучах происходят с близкими к оптическим периодами, но намного меньшими амплитудами. Наблюдаемая непрерывная потеря масс от этих звезд (10^{-8} - 10^{-5} $M_\odot$/год) свидетельствует об их большом вкладе в образование газопылевого компонента межзвездной среды. Обладая большими светимостями, они наблюдаются на очень больших расстояниях, благодаря чему их исследование помогает не только в изучении структуры нашей Галактики, но и соседних галактик. Они являются также хорошими индикаторами в определении расстояний до последних.

Кривые блеска мирид, вместе с периодом, спектром и амплитудой, являются одними из основных наблюдаемых характеристик. Они весьма разнообразны: от чисто синусоидальной формы до очень сложной структуры, часто с "горбом" на восходящей или нисходящей ветвях кривой блеска, а иногда со вторичным максимумом. Форма кривой блеска характеризуется также величиной *f*, которая является отношением времени возгорания и полного периода. Эта величина у мирид изменяется в пределах от 0.3 до 0.55. Изучение кривых блеска мирид в последние годы позволило обнаружить и другие детали, так называемые быстрые изменения блеска, встречающиеся в основном вблизи их минимума [3-7]. Такие изменения зарегистрированы у многих мирид с продолжительностью от нескольких часов до одного месяца и с амплитудами до $1^m.11$. Они появляются случайно и не являются характерной частью кривой блеска.

Изучением кривых блеска мирид занимаются давно. Долгое время при этом рассматривались в основном усредненные по многим циклам визуальные и фотографические кривые блеска. Такие исследования не дали существенных результатов, так как некоторые параметры у некоторых мирид иногда изменяются даже от цикла к циклу. Еще в 1955г. было показано, что существует связь между периодом и формой кривой блеска мирид [8]. Обнаружено, что существует корреляция между периодом и инфракрасным избытком, существующим благодаря наличию околозвездной пылевой оболочки [9,10].

Детальное рассмотрение кривых блеска мирид показало, что их форма является совокупным результатом многих наблюдательных параметров. В настоящей работе на основе довольно богатого и однородного наблюдательного материала, полученного Гиппаркосом, сделана попытка классифицировать кривые блеска долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита по их внешней форме. Рассматриваемые мириды по форме кривых блеска были разделены на две характерные группы. Рассматривалось поведение некоторых наблюдаемых параметров по отношению к отдельным группам. Показана, что рассматриваемые наблюдательные параметры в среднем зависят от формы кривой блеска.

2. *Наблюдательный материал.* При выполнении настоящей работы были использованы кривые изменения блеска мирид и другие наблюдательные данные, приведенные в основном в Главном Каталоге HIPPARCOS [11]. Фотометрическая система наблюдений HIPPARCOS охватывает довольно широкую полосу (3400-8900A), а максимальная чувствительность приемника находится на длине волны 4500A [12]. Для 118000 программных звезд, включенных в Каталог, были получены 13000000 фотометрических измерений в разные эпохи: для каждой звезды в среднем получено 110 измерений, на основе чего и построены кривые блеска.

Точность определения звездных величин достаточно высокая - $0^m.012$ для звезд с $V < 9^m.0$, а для звезд предельной яркости точность достигает величины $0^m.06$[12]. Отметим, что такая точность позволяет достаточно уверенно выявить характерные детали на кривой изменения блеска, так, например, были обнаружены быстрые изменения в минимуме блеска с амплитудами порядка $0^m.2$ [7].

В каталоге [11] приводятся кривые изменения блеска для большого числа долгопериодических переменных звезд. Исследование этих кривых позволяет обнаружить слабые детали, намного превышающие ошибки измерений. Многие из них являются быстрыми изменениями блеска, которые существенно не меняют общую форму кривых и встречаются в основном вблизи минимума этих звезд. Иногда встречаются слабые колебания блеска на отдельных участках кривых, которые так же, как и быстрые изменения не меняют общую форму кривой блеска и не имеют периодического характера [3-7]: появление вышеупомянутых деталей всегда имеет случайный характер.

Для выполнения настоящей работы все наблюдаемые детали, появление которых на кривых блеска исследованных долгопериодических переменных звезд имело только случайный характер, не были учетны при классификации кривых блеска. При классификации были выбраны только реальные изменения блеска периодичекого характера.

3. *Классификация кривых блеска.* В каталоге HIPPARCOS [11] для большого числа переменных звезд приводятся зарегистрированные кривые блеска. Среди них также представлено большое количество кривых неправильных, полуправильных и периодических переменных. Для классификации кривых блеска мы выбрали только звезды, показавшие периодические изменения, и для усиления однородности нашей выборки исследованию подверглись кривые блеска звезд только с указанием типа переменности- *M*. Таких в каталоге HIPPARCOS оказалось 223.

С первого взгляда все кривые кажутся одинаковыми. Детальный анализ кривых, с учетом и слабых изменений блеска, превышающих величину 3σ [12], приводит к выводу, что не существует двух совершенно одинаковых кривых. Но, как было сказано выше, отдельные детали, не имеющие периодического характера, не были учтены, но даже их учет не искажает общей формы кривой блеска. Рассмотрение всех 223 кривых блеска показало, что по внешней форме их можно четко разделить на две группы:

1. Кривые блеска, имеющие гладкий подъем и такой же спад яркости, другими словами, кривые блеска "простой", синусоидальной формы.

2. Кривые блеска, показавшие "горбообразное" повышение яркости на восходящей ветви кривой блеска - кривые сложной формы.

В первой группе оказалась 141 звезда, а во второй 82 звезды. Для

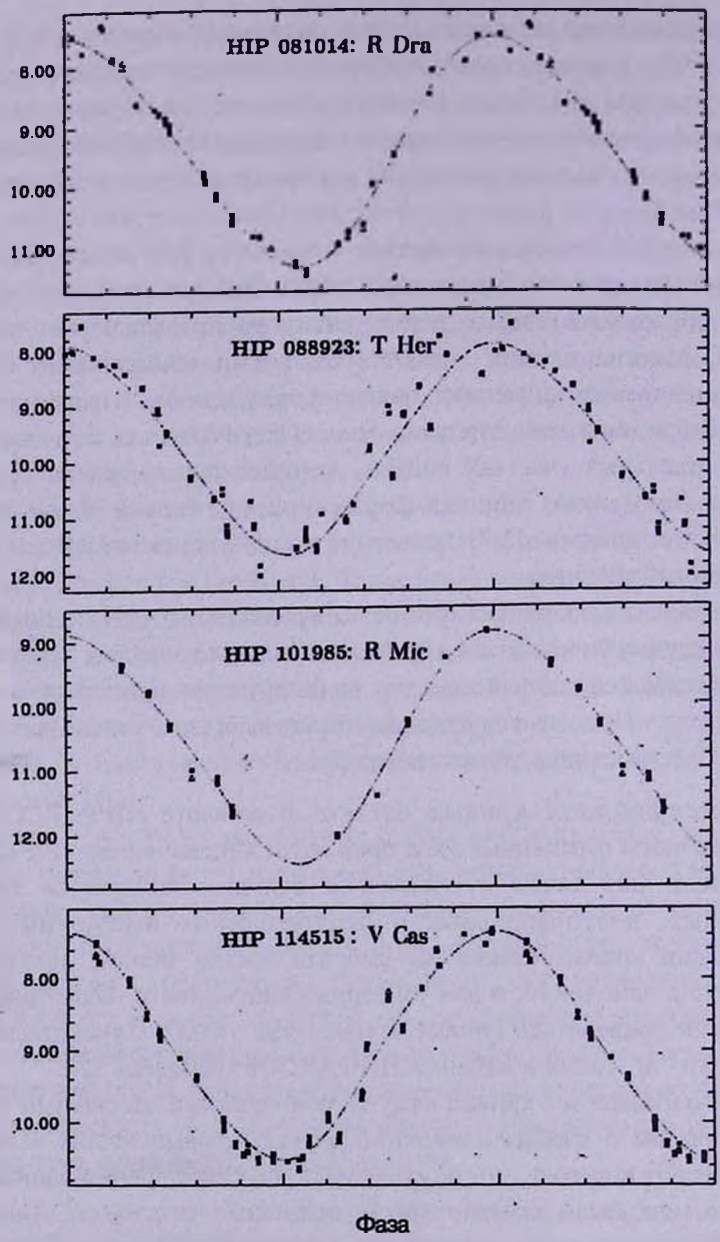

Рис.1. Простые кривые блеска мирид.

иллюстрации на рис.1 приводятся кривые блеска звезд R Dra, T Her, R Mic и V Cas, имеющие простую форму, а на рис.2 сложные кривые блеска звезд R Aur, RU Her, T Cep и R Cas. Отметим, что все представленные кривые блеска на рис. 1 и 2 заимствованы из каталога HIPPARCOS [11]. Отметим, что такое разделение мирид по внешней форме

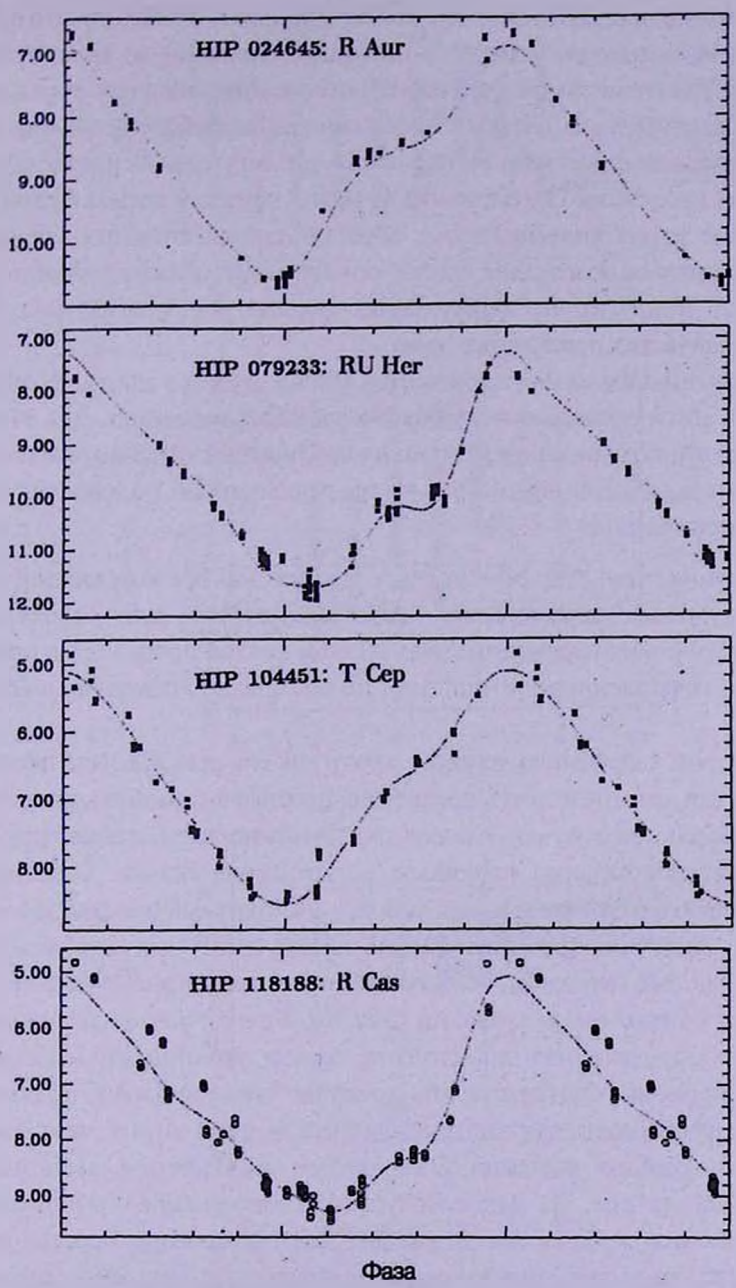

Рис.2. Сложные кривые блеска мирид.

кривой блеска, с учетом наличия или отсутствия вторичного максимума (горба) на восходящей ветви кривой, делается впервые.

На рисунках хорошо видно, что в случае простых кривых мы имеем дело с кривыми блеска почти синусоидальной формы, а сложные кривые напоминают суперпозицию двух разных по интенсивности и продолжительности

кривых. Можно предположить, что вблизи минимума блеска, точнее в самом начале подъема яркости у звезд со сложными кривыми во внешних слоях атмосферы имеют место физические процессы, приводящие к образованию "горба". Следовательно, звезды с простыми кривыми блеска должны отличаться от звезд со сложными кривыми именно отсутствием предполагаемых физических процессов. Такое отличие не может привести только к различным по внешней форме кривым блеска. Наличие дополнительных физических процессов в период возгорания блеска, по-видимому, должно привести также к отличию и других наблюдательных параметров у этих двух групп долгопериодических переменных звезд.

Для большинства из 223 исследуемых мирид имеются данные о спектрах, периодах и абсолютных болометрических звездных величинах. Для 34 мирид имеются результаты поляриметрических наблюдений. Рассмотрим вопрос о проявлении указанных параметров у двух разных групп по внешней форме кривой блеска мирид.

4. *Отношение период-спектр.* До сих пор все корреляции между наблюдательными параметрами были рассмотрены для совокупности долгопериодических переменных звезд. Такой подход почти всегда приводит к хорошим качественным результатам, но обязательно содержит и большие разбросы.

Рассмотрим корреляцию период - спектр как для всех 223 звезд вместе, так и отдельно для двух групп звезд, показавших простые и сложные кривые блеска. При этом рассмотрим эту корреляцию только для тех звезд, для которых точно определены спектральные подклассы в максимуме блеска. Отметим, что приблизительно для 10% звезд нашей выборки спектральный подкласс неизвестен.

На рис. 3a-3c приводится отношение период-спектр для всех звезд нашей выборки (рис.3a), для звезд, показавших простые кривые блеска (рис.3b), и для звезд со сложными кривыми (рис.3c). Как хорошо видно на рис.3a, существует определенная зависимость между указанными величинами: большие периоды соответствуют поздним спектральным подклассам. Указанная зависимость для долгопериодических переменных звезд известна давно и подробно изучена. Она точное повторение зависимости, приведенной на рис. 3a для совокупности звезд нашей выборки. При расмотрении этой же зависимости уже для звезд, показавших простые кривые блеска (рис.3b), видно, что такая зависимость (см. рис.3a) остается, но разбросы уменьшаются. На рис.3c, как было сказано выше, зависимость период-спектр приводится только для звезд со сложными кривыми блеска. Как хорошо видно на рисунке, всего 3 звезды имеют спектральный подкласс ранее M3. И если не обращать внимания на эти три звезды, и даже с их учетом, корреляция, которая хорошо прослеживается на рис. 3a и 3b, на рис.3c уже исчезает. Можно сказать, что корреляция период-спектр для

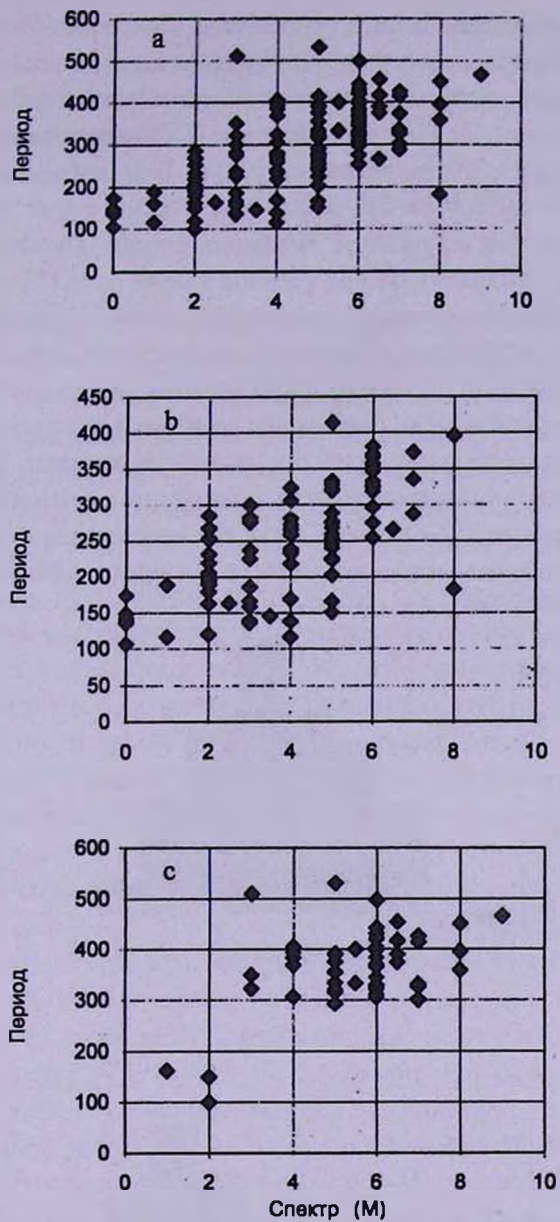

Рис.3. Отношение период-спектр.

мирид со сложными кривыми блеска или не существует или очень слабая.

Таким образом, получается, что на диаграмме период-спектр звезды, показывающие простые и сложные кривые блеска, разделяются на две группы. Звезды со сложными кривыми, в среднем, обладают большими периодами и более поздним спектральным подклассом.

5. *Распределение периодов*. Выше было показано, что долгопериодические переменные звезды, показавшие сложные кривые блеска, в среднем

обладают большими периодами и относятся к более поздним спектральным подклассам. Рассмотрим распределение периодов мирид нашей выборки.

Распределение периодов долгопериодических переменных звезд неоднократно было подробно исследовано. Периоды мирид, приведенных в ОКПЗ, находятся в интервале от 80 до 1000 суток, с максимумом распределения в интервале 250-350 суток. Рассмотрение распределений периодов для любой случайной выборки мирид должно привести к распределению, подобному распределению мирид в ОКПЗ.

Несмотря на то, что периоды исследуемых нами 223 мирид находятся в интервале от 100 до 550 суток, максимум распределения, как и в случае звезд в ОКПЗ, находится в интервале 250-350 суток. Рассмотрение отдельно распределений периодов звезд, показавшие сложные и простые кривые блеска, показывает разные результаты, отличные от вышеупомянутых. Так, например, максимум распределения периодов звезд, показавших сложные кривые блеска, находится в интервале 350-400 суток, тогда как распределение периодов звезд с простыми кривыми имеет максимум в интервале 250-300 суток. Эти

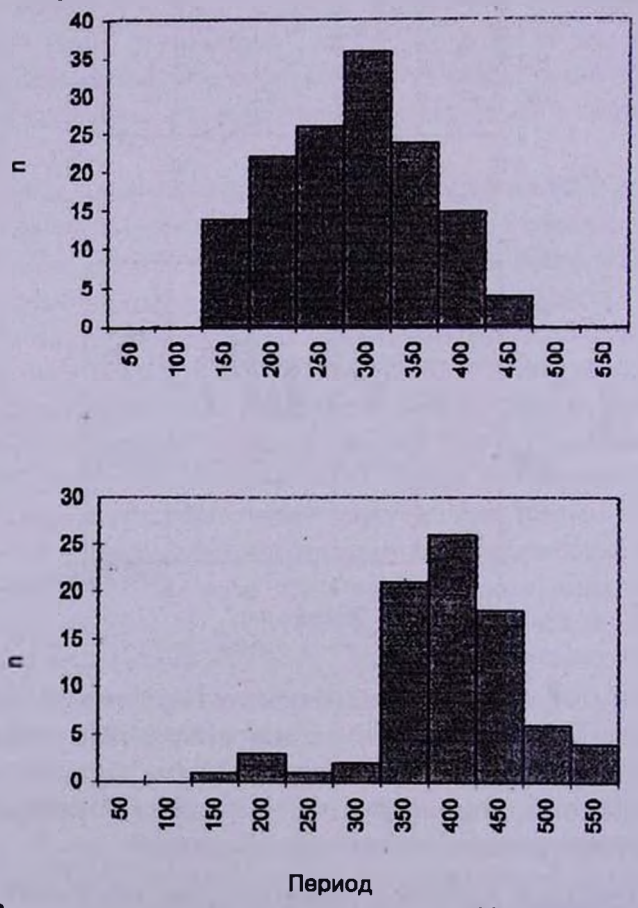

Рис.4. Распределение периодов мирид с простыми (a) и сложными (b) кривыми блеска.

распределения соответственно для 82 и 141 звезды показаны на рис. 4a и 4b. Как хорошо видно на рис.4, максимумы распределения периодов звезд двух отдельных групп сильно смещены друг от друга. Можно рассмотреть также среднюю величину периодов для отдельных групп, усредненную по всем звездам в группе. В этом случае для звезд, показавших сложные кривые, получается

$$P_{ср}=369 \text{ суток}, \; n=82,$$

а для звезд с простыми кривыми

$$P_{ср}=248 \text{ суток}, \; n=141.$$

Таким образом, и по максимумам распределения периодов, и по их средним значениям две группы звезд сильно отличаются. Как и в случае рассмотрения отношения период-спектр, получается, что мириды со сложными кривыми блеска обладают большими периодами. Можно заключить, что долгопериодические переменные звезды, обладающие большими периодами, с большей вероятностью показывают сложные кривые блеска, а меньшие периоды соответствуют простым кривым.

6. *Абсолютные болометрические звездные величины.* Как уже было сказано выше, долгопериодические переменные звезды типа Миры Кита обладают большими светимостями, благодаря чему они наблюдаются даже в соседних галактиках и являются хорошими индикаторами при определении расстояний до них. В нашей Галактике они наблюдаются на очень больших расстояниях, в том числе и в центре Галактики, и определенным образом способствуют изучению ее структуры. Их абсолютные болометрические звездные величины находятся в довольно узком интервале. Рассмотрим поведение абсолютных болометрических звездных величин для этих двух групп звезд.

В работе Алвареса и Меннессие [13] приводятся абсолютные болометрические звездные величины для 165 долгопериодических переменных звезд. 72 звезды из нашей выборки попадают в число звезд с измеренными болометрическими звездными величинами, при том 24 звезды, показавшие сложные кривые, и 48 звезд с простыми кривыми. Абсолютные болометрические звездные величины этих 72 звезд, так же, как и для всех 165 мирид в указанной работе [13], находятся в интервале $M_{bol}=-3^m.1$ - $-4^m.3$. На рис.5 приводятся распределения абсолютных болометрических звездных величин для всех 72 звезд (рис.5a), для 48 звезд с простыми кривыми блеска (рис.5b) и для 24 звезд, показавших сложные кривые (рис.5c). Как видно на рис.5, максимумы распределений для звезд с простыми и сложными кривыми блеска значительно смещены друг от друга. Хорошо видно, что звезды со сложными кривыми блеска по абсолютной болометрической звездной величине в среднем ярче звезд с простыми кривыми блеска. Средняя абсолютная болометрическая звездная величина мирид с простыми кривыми блеска равна

$$M_{bol} = -3^m.57, \qquad n = 48,$$

а для звезд со сложными кривыми

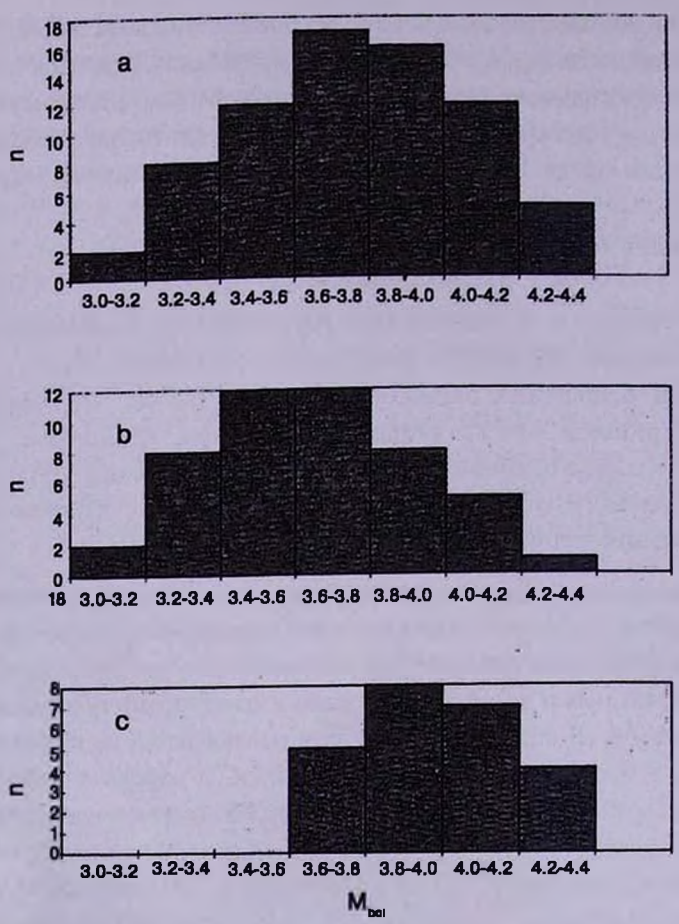

Рис.5. Распределение абсолютных болометрических звездных величин мирид.

$$M_{\text{bol}} = -3^m.92, \qquad n = 24\,.$$

Отметим, что среднеквадратичные отклонения от средних значений болометрических звездных величин для разделенных на две группы мирид небольшие и не сильно отличаются друг от друга:

$$\sigma_{(n=24)} = \pm 0^m.20; \qquad \sigma_{(n=48)} = \pm 0^m.24.$$

С первого взгляда кажется, что такая разница в средних величинах ($0^m.35$) незначительна. Но нужно иметь в виду, что весь интервал, охватываемый абсолютными болометрическими звездными величинами, всех 72 звезд всего лишь $1^m.2$. Следовательно, в данном случае разница указанных величин на $0^m.35$ довольно большая.

Таким образом получается, что средние абсолютные болометрические звездные величины мирид, показавших сложные кривые блеска, превосходят эту величину для звезд с простыми кривыми блеска. Другими словами, можно сказать, что абсолютные болометрические звездные величины долгопериодических переменных звезд в нашей выборке также показывают

тенденцию группирования к отдельным группам мирид, разделенных по внешней форме кривых блеска. Конечно, как видно на рис.4, из 48 звезд, показавших простые кривые блеска, 5 обладают абсолютными величинами, превосходящими $-4^m.0$. Это звезды RT Cyg, W Lyr, U Ori, R Peg и S Vir. По-видимому, эти звезды по каким-то наблюдательным параметрам отличаются от других звезд своей группы. Отметим, например, что звезда RT Cyg показывает сильные изменения степени поляризации света в течение 2-3 суток, помимо цикличных изменений поляризации света, коррелирующих с периодическими изменениями блеска звезды [14,15].

7. *Поляриметрические наблюдения.* За последние несколько лет в Бюраканской астрофизической обсерватории проводятся поляриметрические наблюдения 34 мирид средней яркости. Из 34 программных звезд у 15 зарегистрирована поляризация света [14]. Показано, что во всех случаях зарегистрированная поляризация света имеет звездный характер. 29 звезд из программных 34 попадают в группу звезд, кривые блеска которых рассматриваются в настоящей работе, и, естественно, кривые этих звезд также были классифицированы. В результате 14 из них обладают сложными, а 15 - простыми кривыми блеска.

Из 14 мирид со сложными кривыми блеска, поляризация света зарегистрирована у 7, а из 15 звезд с простыми кривыми блеска - только у 3. Отметим, что у всех звезд степень поляризации света изменяется с фазой изменения яркости звезды, и все эти звезды наблюдаются довольно длительное время.

Таким образом, получается, что поляризация света у мирид со сложными кривыми блеска наблюдается у 50%, а у мирид с простыми кривыми - у 20%. Следовательно, можно предположить, что по способности показать поляризацию света мириды, по всей вероятности, также разделяются на две группы: вероятность регистрации поляризации света у мирид со сложными кривыми блеска, по крайней мере, вдвое больше, чем у мирид с простыми кривыми.

Отметим, что одной из трех звезд с простыми кривыми блеска, показавшей поляризацию света, является звезда RT Cyg. Уже второй раз она проявляет себя как исключение. Она обладает высокой абсолютной болометрической звездной величиной [13] и высокой степенью поляризации света [14], имея сравнительно короткий период изменения яркости ($189^d.7$) и простую кривую блеска. В дальнейшем на такие исключения следует обратить особое внимание.

8. *Обсуждение результатов.* В настоящей работе была сделана попытка классификации мирид по форме их кривых блеска. Было рассмотрено поведение некоторых наблюдательных параметров отдельных групп долгопериодических звезд. Попытка указанной классификации привела к следующим результатам.

а. Мириды по форме кривых изменения блеска четко разделяются на две группы: звезды с *простыми* и со *сложными* кривыми. Первая группа звезд обладает кривыми блеска почти синусоидальной формы. Для этой группы звезд характерны кривые с гладким подъемом и с таким же спадом блеска. Большинство мирид обладает *простыми* кривыми блеска. Для кривых блеска звезд второй группы характерно наличие "горба" на восходящей ветви кривой блеска. Эти образования имеют разные амплитуды.

б. На диаграмме период-спектр указанные две группы звезд ведут себя по-разному. Если для звезд с простыми кривыми четко прослеживается зависимость между периодом и спектром, то для второй группы звезд эта зависимость почти не замечается.

в. Рассмотрение распределения периодов этих звезд четко выявляет две отдельные по периодам группы. Притом, звездам, показавшим сложные кривые блеска, в среднем соответствуют большие амплитуды. Значения средних периодов для двух указанных групп звезд отличны друг от друга на величину 120 суток.

г. Отличие звезд с разными кривыми блеска проявляется также в распределениях абсолютных болометрических звездных величин: звезды со сложными кривыми блеска в среднем ярче звезд с простыми кривыми блеска.

д. Показано, что поляризация света с большей вероятностью наблюдается у звезд со сложными кривыми блеска.

Таким образом, звезды, показавшие сложные кривые блеска, отличаются от звезд другой группы не только по форме кривой, но и по другим параметрам. По-видимому, все перечисленные отличия обусловлены дополнительными физическими процессами, имеющими место на разных фазах подъема яркости у группы звезд со сложными кривыми блеска. Можно перечислить и другие наблюдательные основы для такого предположения. У многих мирид цвета $U-B$ в минимуме блеска принимают отрицательные значения [16]. Вблизи минимума у некоторых мирид наблюдаются быстрые изменения яркости с продолжительностью от нескольких часов до одного месяца [3-7]. Поляризация света у мирид показывает изменения периодического характера с максимумом на восходящей ветви кривой блеска [15].

Ни один из перечисленных выше результатов наблюдения не объясняется в рамках механизма пульсации. Одним из вероятных механизмов можно считать существование тесного голубого компонента. К сожалению, наблюдательные данные о двойственности мирид очень скудные. Тем не менее, есть свидетельство о наличии тесного голубого компонента, как, например, в случае долгопериодической переменной звезды R Aqr[17-20].

Бюраканская астрофизическая обсерватория
им. В.А.Амбарцумяна, Армения

CLASSIFICATION OF THE LIGHT CURVES OF MIRAS

N.D.MELIKIAN

On the basis of the analysis of light curves of 223 Mira Ceti type long period variable stars registered by Hipparcos, it is shown, that all these stars by external shape of their light curves can be devided into two groups: stars, showing simple light curves of the sine wave form, and stars with complex light curves, with hump-shaped formations on the increasing branch of the curve. It is shown, that some observational parameters of the studied stars display the tendency of grouping to the groups of stars with complex and simple light curves. The stars with complex light curves have large periods, by absolute bolometric magnitudes they are brighter and for them the probability of detection of the light polarization is higher.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harvard Ann., **79**, part 111, 161, 1928.
2. *П.Н.Холопов* и др., Общий Каталог Переменных Звезд, Наука, М., 1985.
3. *Н.Д.Меликян*, *С.Д.Якубов*, Астрофизика, **38**, 5, 1995.
4. *P.Maffei*, *G.Tosti*, Astron.J., **109**, 2652, 1995.
5. *C.Magnan*, *M.–O.Mennessier*, *N.D.Melikian*, *M.H.Eritsian*, *A.A.Karapetian*, IBVS, N4390, 1996.
6. *C.Magnan*, *M.–O.Mennessier*, *P.De.Laverny*, *N.D.Melikian*, *M.N.Eritsian*, *A.A.Karapetian*, IBVS, N4524, 1997.
7. *P. De Laverny*, *N.Geoffray*, *L.Jorda*, *M.Kopp*, Astron, Astrophys, **122**, 415, 1997.
8. *L.Cambell*, AAVSO, 1955.
9. *K.DeGioia–Eastwood*, *J.H.Hackwell*, *G.L.Grasdalen*, *R.D.Gehrz*, Astrophys. J., **245**, L75, 1981.
10. *M.Jura*, Astrophys. J., **303**, 327, 1986.
11. ESA, The Hipparcos Catalogue, Light Curves, v.12, ESA SP–1200, 1997.
12. ESA, The Hipparcos Catalogue, v.1, ESA SP–1200, 1997.
13. *R.Alvarez*, *M.–O.Mennessier*, Astron, Astrophys., **317**, 761, 1997.
14. *C.Magnan*, *N.D.Melikian*, *A.A.Karapetian*, Astrofizika, **42**, 341, 1999.
15. *Н.Д.Меликян*, Астрофизика, **39**, 541, 1996.
16. *E.Mendoza*, Bol. Observ Tonantzintla, **4**, 28, 114, 1967.
17. *R.J.Sopka*, *G.Herbig*, *M.Kafatos*, *A.G.Michalitsianos*, Astrophys. J., **258**, L35, 1982.
18. *J.M.Hollis*, *M.Kafatos*, *A.G.Michalitsianos*, *H.A.McAlister*, Astrophys. J.,

289, 765, 1985.

19. *M.R.Dechpande, U.C.Joshi, A.K.Kulshrestha, A.K.Sen*, Pub. Astron, Soc. Pacif., 99, 62, 1987.
20. *H.E.Schwarz, C.Aspin*, in: "Circumstellar Matter", IAU Symp. No.122, p.471, eds, J.Appenzeller, C.Jordan, 1986.