

УДК 524.334 +524.336

Вековые изменения фотометрических параметров переменных звезд типа Миры Кита и полуправильных

В.И. Марсакова

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса, 65000
vmarsakova@mail.ru

Поступила в редакцию 31 января 2014 г.

Аннотация. Рассмотрены фотометрические свойства долгопериодических переменных звезд и проблемы их традиционной классификации. Приведен общий обзор вековых изменений таких параметров кривых блеска, как период, амплитуда, средний блеск, которые были исследованы в наших работах. Выделены несколько типов звезд типа Миры Кита по характеру вековых изменений периода, показана связь вековых изменений амплитуды некоторых переменных с влиянием мультипериодичности. Показано, что характер этих изменений и их числовые характеристики могут служить для классификации этих переменных звезд.

SECULAR VARIATIONS OF PHOTOMETRIC PARAMETERS OF MIRA-TYPE AND SEMI-REGULAR VARIABLE STARS, *by V.I. Marsakova.* The photometric properties of long-period variable stars and problems related to their traditional classification are studied. The review of secular variations of light curve parameters such as period, amplitude, mean brightness are given based on our researches. Several types of period variations for Mira-type variables were separated. Relation of secular amplitude variations to multiperiodicity was shown for certain variables. It is shown that classification of long-periodic variables can be based on the character and numeric parameters of these variations.

Ключевые слова: долгопериодические переменные звезды, мириды, полуправильные переменные, изменения периодов

1 Введение

Термин долгопериодические переменные (long-period variables) в настоящее время используется для обозначения четырех подклассов пульсирующих звезд с длинными периодами (характерными временами) переменности: тип RV Тельца, тип Миры Кита (мириды), полуправильные и неправильные переменные. Существенным отличием кривых блеска долгопериодических пульсирующих звезд от классических пульсирующих звезд (например, типа δ Сер или RR Lyr), кроме длины периода, является сильная изменчивость кривой блеска от цикла к циклу.

Достаточно полный обзор эволюционной стадии, классификации и особенностей долгопериодических переменных звезд дан в (Кудашкина, 2003).

Среди долгопериодических переменных особую роль играют мириды. Основной характеристикой мирид является большая амплитуда изменений блеска, что очень способствует их обнаружению.

Мириды являются красными гигантами спектральных классов M, S, C и на диаграмме Герцшпрунга–Рессела образуют хорошо выделенную группу в правом конце ветви гигантов. В спектрах большинства звезд видны эмиссионные линии водорода, а иногда и некоторых других элементов. В группе полуправильных переменных, очень похожих на мириды, но имеющих короткие периоды и меньшие амплитуды, эмиссия встречается реже.

Выделение собственно мирид как типа в какой-то степени произвольно. Считается (Самусь, 2005; Самусь и др., 2012), что амплитуда изменения блеска типичной мириды должна быть не меньше 2^m ; некоторые авторы (Вильсон, 1986) считают наименьшей амплитудой 2.5^m . Однако, как видно в том числе и по нашим исследованиям (Марсакова, Андронов, 2006), некоторые переменные, такие как X Oph, T Ari, W Hya, BG Cyg, имеют средние амплитуды переменности менее 2^m , но ведут себя полностью аналогично другим миридам. Наименьшим периодом мирид можно считать около 90 суток. Переход от мирид к полуправильным звездам и далее к неправильным переменным настолько плавный, что это затрудняет однозначную классификацию. Согласно классификации (Самусь, 2005; Гоффмейстер и др., 1990; Кудашкина, 2012) выделяют 4 основных типа полуправильных переменных: SRA (почти не отличаются от мирид, кроме меньшей амплитуды, периодичность хорошо выражена), SRB (у которых время от времени цикл нарушается и блеск может быть постоянным или меняться хаотически), SRC (сверхгиганты спектральных классов G8–M6, показывающие почти неправильные волнообразные изменения блеска, прерываемые интервалами практического постоянства блеска). Однако переменность некоторых звезд, таких как S Per (Кудашкина, 2012), в определенные моменты времени сильно напоминает переменность мирид, однако потом цикличность нарушается и/или амплитуда уменьшается практически до нуля. И наконец SRD (желтые гиганты и сверхгиганты спектральных классов F–K, представляющие собой неоднородную группу с отсутствием или очень слабыми полосами окиси титана, большими скоростями и светимостями).

Следует отметить, что многочисленные попытки классификаций относятся, прежде всего, к средним кривым блеска, которые существенно зависят от выбранного интервала времени, за который рассматривается кривая блеска. Поэтому они, как правило, позволяют классифицировать данную звезду в данный (весьма небольшой) интервал времени, либо, если используется слишком большой интервал для усреднения, получить очень неточную классификацию. Однако изменчивость кривой блеска может служить не только помехой для классификации, но и ее дополнительным критерием, если удастся выявить закономерности изменения кривых блеска со временем.

Для этой цели нами и группой авторов проводился разносторонний анализ изменений параметров кривых блеска (по наблюдениям членов ассоциаций наблюдателей переменных звезд AFOEV, VSOLJ, AAVSO) с помощью определения параметров индивидуальных пульсационных циклов методами скользящих парабол (Андронов, 1997), скользящих синусов (Андронов, 1999; Андронов и Чинарова, 2013), асимптотических парабол (Марсакова, Андронов, 1996), а также с помощью вейвлет-анализа (Андронов, 1998). Подробное описание методик можно найти в (Андронов, Марсакова, 2006; Чинарова, 2010; Андронов, 2003, 2005). Каталоги характеристик индивидуальных циклов переменности групп мирид и полуправильных опубликовали Марсакова и Андронов (1998б, 2000б), Чинарова и Андронов (2000). Обсудим здесь некоторые полученные результаты.

2 Прогрессивные изменения периодов

Вековое уменьшение периода у звезды R Aql известно давно. В работе (Марсакова, 2000б) проведен анализ $O - C$ для R Aql за период времени порядка 140 лет (рис. 1), на протяжении которых период неуклонно уменьшался, однако скорость его уменьшения изменялась, показывая пилообразную кривую, характерную для $O - C$ некоторых других мирид. К настоящему моменту прогрессивные изменения периода (то есть постоянное уменьшение или увеличение на протяжении более чем сотни лет) были обнаружены у четырех мирид: R Aql, R Hya, W Dra и T UMi, хотя у последней это явление проявилось относительно недавно, но внезапность и скорость изменения периода позволяют предположительно отнести ее к той же группе. Подробный анализ кривых $O - C$ и характеристик

индивидуальных циклов проведен в работах (Марсакова, 2000а, 2000б). Было показано, что относительное уменьшение амплитуды (в основном из-за поярчения минимума) у этих звезд больше, чем относительное уменьшение периода, так что кривая блеска становится более плавной.

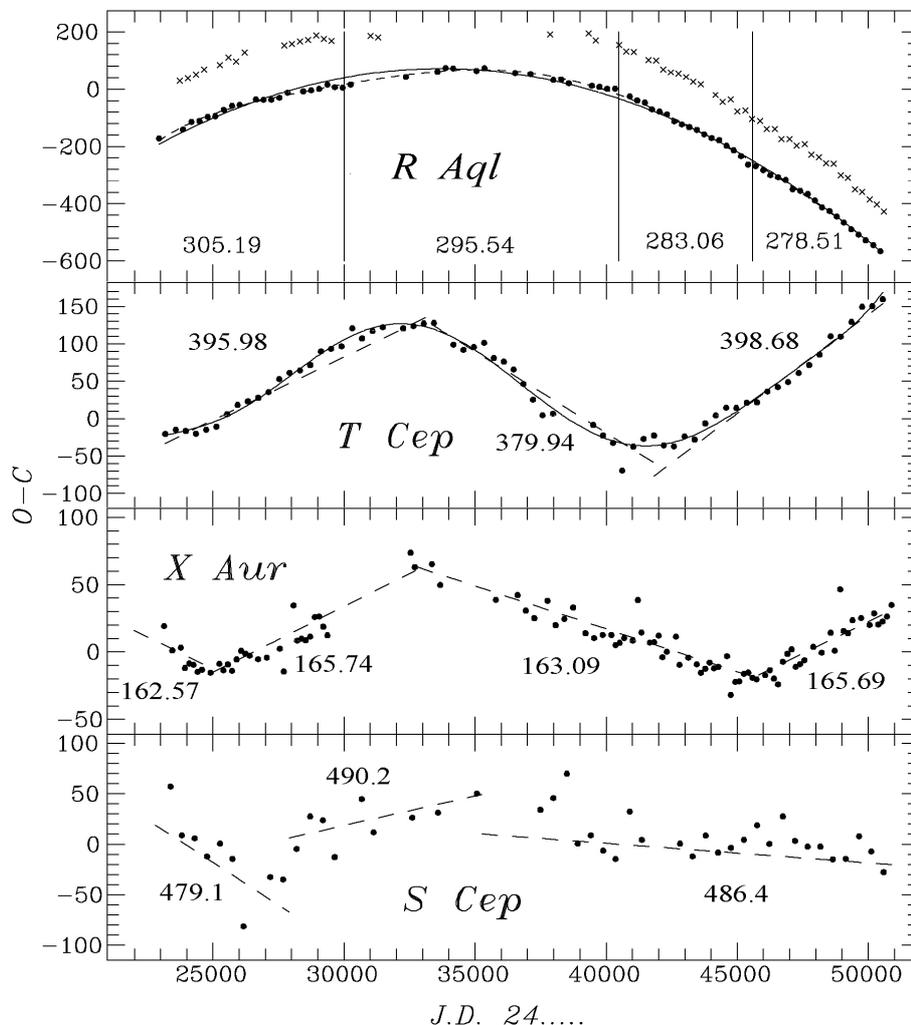


Рис. 1. Характерные кривые $O-C$, сверху вниз: прогрессивные изменения периода (кривая аппроксимирована параболой – сплошная линия и полиномом 4-й степени – пунктирная), плавные циклические изменения (кривая аппроксимирована полиномом 4-й степени – сплошная линия), пилообразная $O-C$, небольшие и нерегулярные изменения периода. Пунктирные отрезки соответствуют постоянному значению периода в данном интервале времени, вычисленному при помощи аппроксимации фазовой кривой блеска тригонометрическим полиномом. Соответствующие им значения периода приведены рядом

В работе (Кудашкина, Марсакова, 2013) проведены оценки уменьшения радиуса отраженного в уменьшении периода пульсаций в предположении гравитационного сжатия звезды (на одной из стадий эволюции в пределах асимптотической ветви гигантов) для звезд R Aql, R Hya и T UMi.

Вуд и Зарро (1981) предложили модель гелиевой вспышки в оболочке (Helium-shell flashing) для объяснения прогрессивных изменений периода у мирид. Гелиевая вспышка, то есть горение гелия в форме термоядерного взрыва, приводит к резкому увеличению энерговыделения, в резуль-

тате чего прекращается горение водорода в основании водородной оболочки. Также это приводит к существенным изменениям светимости и радиуса звезды, что в свою очередь приводит к изменениям периода (на разных этапах развития гелиевой вспышки эти величины изменяются и в сторону увеличения, и в сторону уменьшения).

3 Волнообразные и пилообразные изменения периодов

Зийлстра и Беддинг (2002) выбрали для мирид с изменениями периодов в обе стороны по очереди название "меандровых" мирид. Однако по нашим исследованиям в таких изменениях периодов можно выделить по крайней мере три типа (рис. 1):

- плавные циклические (иногда почти синусоидальные) изменения с циклами около 17000–22000 дней показывают T Cer, U UMi, Z Sco, S UMi, W Lyr (Марсакова, 2013; Марсакова и Андронов, 1997а), эти изменения сопровождаются изменениями амплитуды и формы кривой блеска. У T Cer (см. также Марсакова, Андронов, 2000а) горб на восходящей ветви трансформируется в двойной максимум и обратно;
- пилообразные *O-C*, которые говорят о небольших "переключениях периода" с большего на меньшее значение и наоборот (см., например, Марсакова, Андронов, 1998а);
- небольшие и нерегулярные изменения периода у большинства мирид (Марсакова, Андронов, 1997б; Андронов, Марсакова, 1998, 1999).

В двух последних случаях изменения амплитуды и формы кривой блеска, как правило, имеют более сложный характер, чем кривая *O-C*.

4 Изменения среднего блеска

Изменения среднего блеска с нерегулярной циклическостью характерны для углеродных мирид и полуправильных. Причем средние амплитуды углеродных мирид существенно ниже, чем у мирид спектральных классов M и S (Марсакова, Андронов, 2006), что может быть отчасти следствием того, что кривые блеска очень сильно меняются от цикла к циклу, замывая амплитуду на кривой, построенной по многим циклам. Это сильно стирает переход между углеродными миридами и полуправильными звездами. Циклическость изменений среднего блеска углеродных мирид была проанализирована в работах (Марсакова, 1999; Марсакова, Андронов, 1999), и получены характерные времена порядка 1000–10000 суток. Кроме того, иногда наблюдаются постепенные или резкие уменьшения среднего блеска. Возможно, это связано с существованием пылевых оболочек вокруг углеродных звезд. У звезд с циклическими изменениями периодов (Марсакова, 2013) также обнаружены изменения среднего блеска на временах 1000–10000 суток, наряду с циклическостью, соответствующей изменениям периода.

5 Уменьшения и увеличения амплитуды

В работе (Марсакова, Андронов, 2006) получены также коэффициенты вековых изменений амплитуды. Вековое увеличение амплитуды было обнаружено у 5 звезд, среди которых 4 мириды: S UMi, R Dra, W Peg, U CMi, а также SS Vir (ранее классифицированная как полуправильная, но относящаяся по нашей классификации к углеродным миридам с их типично малыми средними амплитудами). Вековое уменьшение обнаружено у двух звезд, RU Cyg и V Boo, классифицированных в ОКПЗ как SRA и обсуждаемых нами в следующем параграфе в связи с мультипериодичностью. Таким образом, можно предположить, что для некоторых мирид характерно вековое увеличение амплитуды, в то время как проявление мультипериодичности (возможно, как эволюционное изменение, см. обсуждение для Y Peg в следующем параграфе) может приводить к ее вековому уменьшению.

6 Особая мультипериодичность

Как отмечает Кудашкина (2003), большинство полуправильных переменных мультипериодичны. Они показывают, в основном, два периода, отношение между которыми лежит в пределах $1.7 \leq P_1/P_2 \leq 1.95$. Хотя есть примеры и еще менее близких периодов (Андронов, Чинарова, 2012). Нами (Марсакова, Андронов, 2013) была отмечена группа переменных, среди которых есть и мириды, и полуправильные спектральных классов M и S с очень схожими периодами 230–260 суток. У большинства из них, особенно у полуправильных, наблюдается второй период 140–155 суток. Особенно примечательна S Aql, у которой наблюдается инверсия этих периодов, причем ее периодограмма и кривая блеска носит наиболее существенный отпечаток этой мультипериодичности (Марсакова, Андронов, 2012). Соотношения двух периодов для этой группы звезд лежат в пределах $1.61 \leq P_1/P_2 \leq 1.77$. Для некоторых ее представителей (Y Per, V Boo, S Tri, RU And (Чинарова, 2010)) были зафиксированы резкие уменьшения амплитуды, иногда почти до нуля. У S Aql они повторяются циклично и, очевидно, связаны с взаимодействием двух периодов. У Y Per второй период на периодограмме выражен очень слабо, но и нерегулярности начались сравнительно недавно (с JD 2447500), так что она, возможно, только входит в эту фазу переменности.

7 Обсуждение

Еще раз отметим невозможность четкого разделения на мириды и полуправильные звезды, особенно учитывая наличие обособленных групп по другим параметрам, таким как, например, спектральный класс.

Самусь (2005) отмечает, что "... переменные типа Миры Кита вполне можно назвать полуправильными. Граница между ними и теми звездами, которые традиционно относят к типу полуправильных пульсирующих звезд, совершенно формально проведена по признаку амплитуды. В ОКПЗ эта граница соответствует амплитуде в 2.5^m в лучах V. Мириды – это звезды, у которых амплитуда больше предельной во всех или хотя бы в большинстве циклов".

Однако в связи с этим возникают дополнительные вопросы, например, сколько всего циклов переменности должно быть исследовано, чтобы можно было говорить о том, что амплитуда превышает данную величину в большинстве из них? Отметим, что благодаря активным наблюдениям любителей астрономии, мы имеем по многим ярким известным переменным 100-летний интервал наблюдательных данных, но по некоторым переменным, которые стали активно наблюдаться лишь недавно (по причине их недавнего открытия или достаточно слабого блеска), этот интервал составляет всего около 40–50 лет. Учитывая полученные нами данные о звездах с сильными изменениями периода и амплитуды (T Ser и др.), переменных из группы мультипериодичности (в которых взаимодействие двух периодов может приводить к временному уменьшению амплитуды) и особенно о переменных спектрального класса C (которые очень тяжело поддаются классификации по амплитуде), это приводит к сильной неопределенности такой классификации и ее зависимости от исследуемого интервала наблюдений.

Такой подход как "воспроизводимость максимумов на протяжении пяти–десяти циклов с ошибкой не свыше двух–трех десятых цикла", предлагаемый в традиционной классификации ОКПЗ для разделения звезд типов SRA и SRB (Самусь, 2005), также, видимо, сильно зависит от выбранного интервала и может давать неверные результаты.

Как характерный пример можно рассмотреть переменные с мультипериодичностью (RU And, S Aql, S Tri, V Boo и другие), классифицированные в ОКПЗ как SRA или мириды, у которых в некоторые моменты времени амплитуда уменьшается почти до нулевого значения и фаза максимума может "уплыть" за несколько циклов почти на 1 цикл (и даже более для S Aql). Согласно традиционной классификации, такое поведение скорее характерно для типа SRB (хотя и проявляется эпизодически). Но поскольку схожесть периодов и характерного поведения заставляет нас предположить их принадлежность к близкой эволюционной стадии, вряд ли перевод всех или некоторых звезд (указанных нами в (Марсакова, Андронов, 2013)) из одного типа ОКПЗ в другой приблизит нас к пониманию природы этого поведения.

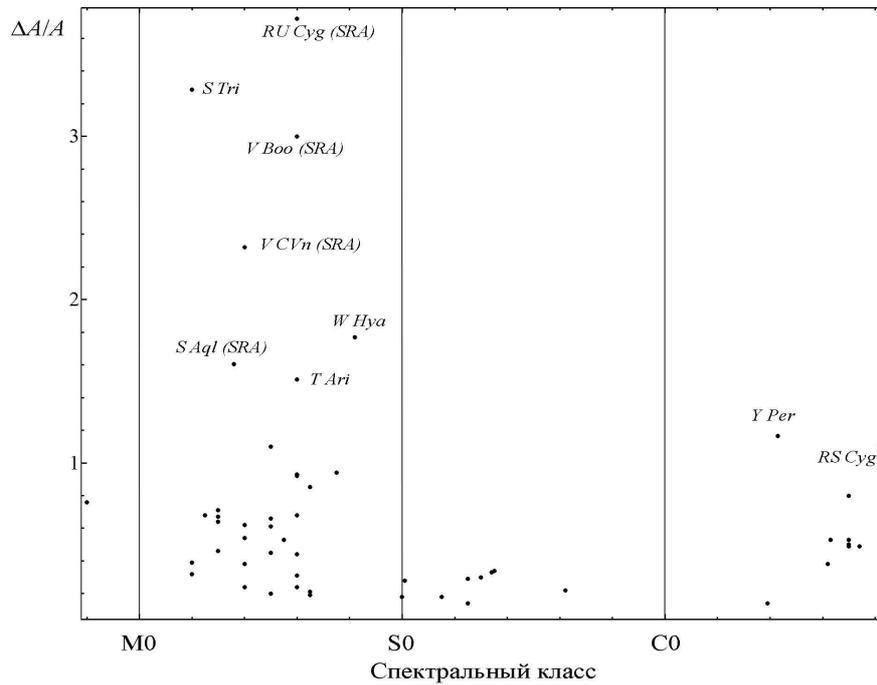


Рис. 2. Диаграмма “спектральный класс – относительный разброс амплитуд”. Группы по спектральным классам отделены друг от друга вертикальными линиями. Вправо возрастает подкласс. Переменная X Сам (самая левая) – единственная мирида, имеющая спектральный класс K8. Переменные типа SRA указаны особо. Остальные – типа Миры Кита

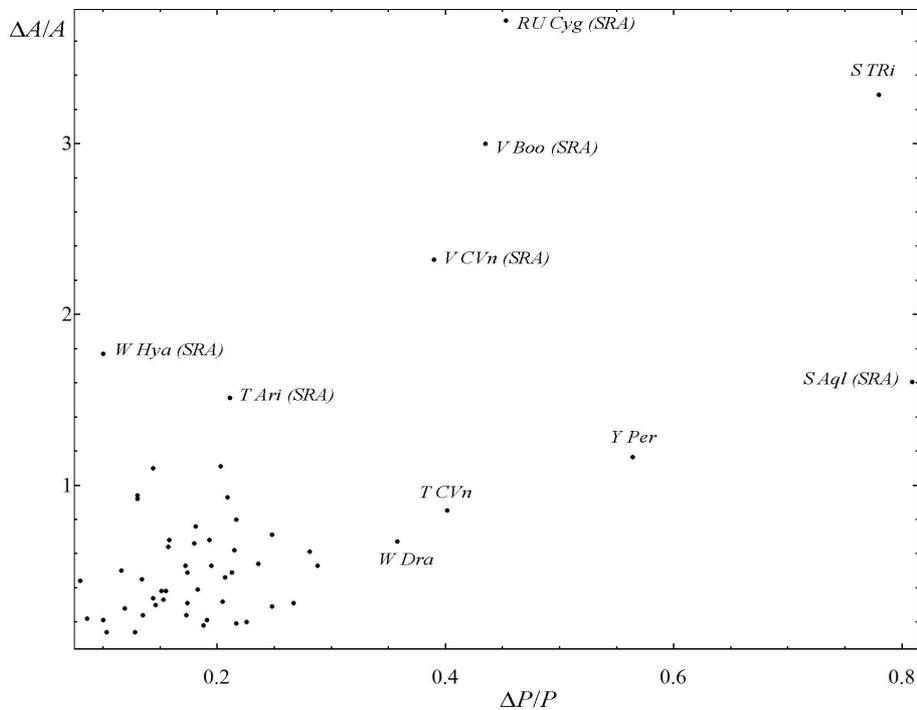


Рис. 3. Диаграмма “относительный разброс периодов – относительный разброс амплитуд”. Переменные типа SRA указаны особо. Остальные – типа Миры Кита

Другим характерным примером могут служить звезды с прогрессивными изменениями периода. Например, у $T\ UMi$ изменение $O-C$ на промежутке J.D. 2446000–2451000 достигает величины периода примерно за 10 циклов (Кудашкина, Марсакова, 2013). Однако предполагаемая принадлежность этих звезд к стадии сжатия (расширения у $W\ Dra$) на этапе гелиевой вспышки (Вуд и Зарро, 1981) не дает поводов для исключения этих переменных из класса звезд типа Миры Кита.

Возникает вопрос: не проще ли отказаться от этого “совершенно формального” подразделения на мириды и полуправильные типов SRA и, возможно, SRB (SRC имеют существенное отличие в том, что они являются сверхгигантами, а не гигантами как все вышеперечисленные) и классифицировать эти звезды по другим параметрам, к числу которых могут относиться, например, ход долговременных изменений $O-C$, амплитуды и среднего блеска, а также характеристики мультипериодичности.

Маттей и др. (1997) предложили метод классификации по диаграмме “амплитуда – изменение амплитуды”, где под изменением амплитуды понимается ее среднеквадратичное отклонение от среднего значения за несколько десятков циклов. При этом звезды, слишком отличающиеся от общей массы мирид, классифицированы ими как полуправильные.

Нами (Марсакова, Андронов, 2006) также были предложены способы классификации по диаграммам “спектральный класс – относительный разброс амплитуд”, “относительный разброс периодов – относительный разброс амплитуд”, а также некоторым другим, также базирующимся на определении параметров индивидуальных циклов в течение продолжительного интервала времени. На рис. 2–3 показаны примеры таких диаграмм. На первой из них мы видим, что мириды спектральных классов M и S образуют достаточно тесные группы ниже значений $\frac{\delta A}{\langle \Delta m \rangle} \approx 1$. Переменные, сильно отделенные от группы M-мирид (имеющие в ОКПЗ тип M или SRA, не коррелирующий с положением на диаграмме), стали объектами нашего повышенного внимания. На второй диаграмме заметно, что наиболее отличающиеся от основной массы переменные – это в основном группа с мультипериодичностью 250–150 ($Y\ Per$, $S\ Aql$, $S\ Tri$, $RU\ Cyg$, $V\ Boo$). Малоамплитудные переменные спектрального класса M, с различными типами классификации по ОКПЗ, но не входящие в данную группу мультипериодичности ($W\ Hya$, $T\ Ari$, $T\ Cvn$, а также $W\ Dra$ с прогрессивными изменениями периода и амплитуды), отличаются от основной массы мирид значительно меньше.

Однако следует отметить, классификация по таким диаграммам также зависима от исследуемого интервала наблюдений, поэтому она может быть использована как предварительная. А для более точной необходимо использовать комплексный подход по нескольким критериям, рассмотренным выше, к которым относятся и вековые изменения параметров кривых блеска.

Как показывает данный обзор, классификация на основе вековых изменений различных параметров переменности может быть как дополнением, так и альтернативой традиционной классификации долгопериодических переменных звезд.

Литература

- Андронов (Andronov I.L.) // *Astron. Astrophys. Suppl.* 1997. V. 125 P. 207.
 Андронов (Andronov I.L.) // *Kinem. Phys. Celest. Bodies.* 1998. V. 14. P. 374.
 Андронов (Andronov I.L.) // *ASP Conf. Ser.* 2003. V. 229. P. 391.
 Андронов (Andronov I.L.) // *ASP Conf. Ser.* 2005. V. 335. P. 37.
 Андронов (Andronov I.L.) // in: *Self-Similar Systems.* Dubna. Russia. 29 July – August 1998./ Eds Priezzhev V.B. and Spiridonov V.P. *Joint Inst. Nucl. Res.* 1999. P. 57. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999sss.conf...57A>.
 Андронов, Марсакова (Andronov I.L., Marsakova V.I.) // *Astrophys. Space Sci.* 1998. V. 257. P. 49.
 Андронов, Марсакова (Andronov I.L., Marsakova V.I.) // *Astron. Astrophys. Trans.* 1999. V. 17. P. 187.
 Андронов И.Л., Марсакова В.И. (Andronov I.L., Marsakova V.I.) // *Astrophysics.* 2006. V. 49. P. 370.
 Андронов, Чинарова (Andronov I.L., Chinarova L.L.) // *Odessa Astron. Publ.* 2012. V. 25. P. 148.
 Андронов, Чинарова (Andronov I.L., Chinarova L.L.) // *Częstochowski Kalendarz Astronomiczny* 2014. Częstochowa. 2013. P. 171. (2013arXiv1308.1129A).

- Вильсон (Willson L.A.) // Jour. Amer. Assoc. Var. Star. Observ. 1986. V. 15. N. 2. P. 228.
- Вуд, Зарро (Wood P.R., Zarro D.M.) // Astrophys. J. 1981. V. 247. P. 247.
- Гоффмейстер К., Рихтер Г., Вецель В. // Переменные звезды. М.: Наука. 1990.
- Зийлстра, Беддинг (Zijlstra A.A., Bedding T.R.) // Jour. Amer. Assoc. Var. Star. Observ. 2002. V. 31. P. 2.
- Кудашкина (Kudashkina L.S.) // Kinem. Phys. Celest. Bodies. 2003. V. 19. P. 193.
- Кудашкина (Kudashkina L.S.) // Odessa Astron. Publ. V. 25. N. 1. 2012. P. 18.
- Кудашкина, Марсакова (Kudashkina L.S., Marsakova V.I.) // *Częstochoowski Kalendarz Astronomiczny* 2014. *Częstochowa*. 2013. P. 243.
- Маттей и др. (Mattei J.A., Foster G., Hurwitz L.A., Malatesta K.H., Wilson L.A., Mennessier M.O.) // Proc. ESA Symp. "Hipparcos-Venice'97". Venice (Italy). 1997. P. 269.
- Марсакова (Marsakova V.I.) // Jour. Amer. Assoc. Var. Star. Observ. 1999. V. 27. P. 141.
- Марсакова (Marsakova V.I.) // Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. 2000a. V. 203. P. 130.
- Марсакова В.И. // Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова. 2000б.
- Марсакова (Marsakova V.I.) // Odessa Astron. Publ. 2013. V. 26. N. 1. P. 78.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Odessa Astron. Publ. 1996. V. 9. P. 127.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Kinem. Phys. Celest. Bodies. 1997a. V. 13. N. 6. P. 49.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Odessa Astron. Publ. 1997b. V. 10. P. 109.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Proceedings of the 29th Conference on Variable star Research. 1998a. P. 130.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Odessa Astron. Publ. 1998b. V. 11. P. 79.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Odessa Astron. Publ. 1999. V. 12. P. 205.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser. 2000a. V. 203. P. 131.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Odessa Astron. Publ. 2000b. V. 13. P. 83.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Astrophysics. 2006. V. 49. P. 506.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // Odessa Astron. Publ. 2012. V. 25. N. 1. P. 60.
- Марсакова, Андронов (Marsakova V.I., Andronov I.L.) // *Częstochoowski Kalendarz Astronomiczny* 2014. *Częstochowa*. 2013. P. 273. (2013arXiv1310.2412M).
- Самусь Н.Н. // Переменные звезды. М.: ГАИШ МГУ. 2000–2005. <http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Samus/index.html>.
- Самусь Н.Н. и др. // Общий каталог переменных звезд. 2012. <http://www.sai.msu.ru/gcvs/gcvs/>.
- Чинарова (Chinarova L.L.) // Odessa Astron. Publ. 2010. V. 23. P. 25.
- Чинарова, Андронов (Chinarova L.L., Andronov I.L.) // Odessa Astron. Publ. 2000. V. 13. P. 116.