

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ
ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ЗВЕЗД.
II. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
КЛАССИФИКАЦИИ ЗВЕЗД

В.И.МАРСАКОВА¹, И.Л.АНДРОНОВ^{1,2}

Поступила 15 апреля 2006

Принята к печати 20 сентября 2006

В данной работе приведены результаты обработки наблюдений выборки из 53 долгопериодических пульсирующих звезд (44 из них относятся к типу Миры Кита и 9 - к полуправильным переменным). Для этих звезд получен каталог характеристик индивидуальных циклов кривых блеска. Проведен корреляционный анализ характеристик индивидуальных циклов пульсаций для каждой звезды. Получен ряд диаграмм, которые связывают переменность характеристик индивидуальных циклов со средними параметрами переменности звезд и спектральным классом. На основании этих диаграмм предложены новые критерии классификации долгопериодических переменных звезд.

1. *Особенности кривых блеска. Классификация.* Основным отличием кривых блеска мирид и других долгопериодических пульсирующих звезд от классических пульсирующих звезд (например, типа δ Сер или RR Лут), кроме длительности периода, является сильная изменчивость кривой блеска от цикла к циклу.

Переход от мирид к полуправильным звездам и далее к неправильным переменным настолько плавный, что это затрудняет однозначную классификацию.

Полуправильные и неправильные переменные обычно являются красными гигантами и сверхгигантами. По современной классификации [1] различают четыре группы полуправильных: SRa, b, c, d (SR-semiregular), две группы неправильных - Lb, c и две группы звезд типа RV Тельца.

Долгопериодические переменные в основном принадлежат к спектральным классам K, M, S, C. Существуют и промежуточные типы MS, SC. Среди мирид только одна звезда X Cam имеет в максимуме спектральный класс K8.

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 $M \rightarrow MS \rightarrow S \rightarrow SC \rightarrow C$, по-видимому, характеризует возрастание отношения содержаний углерода и кислорода. В [2] и [3] представлены результаты

содержания CNO для M-, MS-, S-, SC- и C-звезд, средние отношения C/O составляют 0.41 (M), 0.49 (MS), 0.57 (S), 0.95 (SC) и 1.15 (C).

Основной характеристикой мирид является большая амплитуда непрерывных изменений блеска, что очень способствует их обнаружению. Считается, что амплитуда изменения блеска типичной мириды в визуальном диапазоне должна быть не меньше 2^m ; некоторые авторы считают наименьшей амплитудой $2^{m.5}$ (см. например, [4]). Значение $2^{m.5}$ принято также и в ОКПЗ [5]. В спектрах большинства мирид 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.

Необходимо отметить, что у некоторых мирид также наблюдаются амплитуды около 2^m , если построить среднюю кривую за продолжительный период времени. Маттей и др. [6] предложили метод классификации по диаграмме амплитуда - изменение амплитуды, где под изменением амплитуды понимается ее среднеквадратичное отклонение от среднего значения на несколько десятков циклов. Эта классификация гораздо менее произвольна, чем традиционная, где многое определяется выбранным для исследования интервалом времени.

Классификация мирид по форме кривой блеска была предложена Людендорфом [7]. Как отмечается в [1], классификация Людендорфа - чисто феноменологическая, и для понимания физических процессов, протекающих в миридах, не имеет никакого практического значения, представляя лишь исторический интерес. Однако в работах Вардия [8,9] проведено применение этой классификации к большому количеству мирид, а также найдена зависимость вероятности обнаружения линии излучения молекулы H_2O от типа кривой блеска.

Меннесье и др. [10,11] сделана попытка классификации мирид и полуправильных переменных с помощью кластерного анализа. Им удалось распределить выборку из 355 звезд по 6 кластерам, используя такие характеристики *средних* кривых блеска, как период, амплитуда, асимметрия и т.п., а также их среднеквадратичные отклонения. Это распределение четко отражает отличие звезд спектральных классов M и C, однако, в остальном, переход между кластерами является достаточно плавным.

Кудашкина и Андронов [12] разделили долгопериодические пульсирующие переменные на несколько групп по значениям среднего периода. Они также указывают, что для этих групп такие характеристики, как асимметрия, спектральный класс, наличие мазерного излучения несколько различны, и на основании этого можно расположить их в эволюционной последовательности. Также Кудашкина и Андронов [13] провели корреляционный анализ пар характеристик Фурье-аппрокси-

машии средних фазовых кривых блеска мирид и пришли к выводу, что на некоторых из этих зависимостей звезды группируются в определенные кластеры.

Следует отметить, что все перечисленные попытки классификаций относятся, прежде всего, к средним кривым блеска, которые существенно зависят от выбранного интервала времени, в течение которого рассматривается кривая блеска. Поэтому они, как правило, позволяют классифицировать *данную звезду в данный интервал времени*. Если мы обратимся к реальной, конкретной звезде и пронаблюдаем ее достаточно долго, то увидим, что у нее изменяется не только период, но и форма кривой блеска. Таким образом, у одной и той же звезды от цикла к циклу можно найти признаки почти всех выше перечисленных подклассов. Наблюдаются также вековые изменения вида кривой блеска, как например, у звезд с прогрессивными изменениями периодов [14], циклические изменения кривой блеска, почти у всех мирид время от времени наблюдаются горбы или ступеньки на восходящей ветви, но далеко не во всех циклах - такие глобальные преобразования видны только при наблюдениях порядка десятков лет. Однако изменяемость кривой блеска может служить не только помехой для классификации, но и ее дополнительным критерием, если удастся выявить закономерности изменения кривых блеска со временем.

Также было бы интересно проследить корреляцию молекулярных линий в спектре одной звезды (а также других наблюдаемых характеристик) с изменением кривой блеска в течение продолжительного интервала времени. Однако такие исследования требуют очень продолжительных спектральных наблюдений, что возможно только в рамках глобальных проектов.

2. Изменения кривых блеска мирид со временем. Многими авторами проводились различные исследования изменений кривых блеска мирид от цикла к циклу.

Нудженко [15] исследовала изменения периодов мирид по *O-C* диаграммам. Она указывает на то, что у звезд с большими периодами амплитуда изменений периода больше, а также, что звезды с более короткими периодами дольше сохраняют постоянные значения периодов.

Изменения высоты максимума для некоторых звезд исследованы в [16]. Хэрингтон [17] рассчитал коэффициенты корреляции между разностью звездных величин в последовательных максимумах и продолжительностью периода между этими максимумами. Эта корреляция наблюдается довольно часто, однако, не у всех исследуемых звезд. Автор работы [18] попытался найти зависимость между параметрами средней кривой блеска (период, амплитуда, асимметрия) и величиной этого коэффициента корреляции.

Маттей и Фостер [19] провели полиномиальный анализ изменений

таких параметров, как амплитуда, период, звездные величины в максимуме и минимуме, а также времена возрастания и убывания блеска со временем для 51 долгопериодической переменной звезды спектральных классов S и C.

Айлз и Соо [20-23] провели корреляционный анализ достаточно большого количества (20) параметров индивидуальных циклов у более двух десятков мирид. Они отмечают, что изменения от цикла к циклу не являются полностью случайными, однако найденные корреляции существенно изменяются от звезды к звезде.

Из попыток теоретического объяснения изменений от цикла к циклу следует отметить следующие.

Кудашкина и Рудницкий [24] связывают возникновение горбов на восходящей ветви с прохождением ударной волны в атмосфере мириды. В этой работе 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. Полученное время (от 20 до 35 суток) хорошо согласуется со средней продолжительностью "горба" на восходящей ветви кривой блеска.

В [25,26] проведено моделирование кривых блеска углеродных звезд и были получены циклические изменения среднего блеска с характерными временами порядка 500-2000 дней, вызванные сложным взаимодействием между формированием частиц, переносом энергии и давлением излучения на частицы. Винтерс и др. [27], сравнивая наблюдаемые кривые блеска с вычисленными, предполагает, что подобные изменения могут быть вызваны "внешним-механизмом".

Существует несколько звезд, у которых изменения периода носят характер векового уменьшения (в случае W Drg - увеличения) периода. Далее мы будем называть их "звезды с прогрессивными изменениями периодов". Вуд и Зарро [28] предложили гелиевую вспышку как возможную причину этих изменений и нашли хорошее согласие этой теории с наблюдаемыми изменениями периода (и, соответственно, светимости) у трех мирид R Aql, R Hya, W Drg. Позднее было обнаружено [29,30] резкое уменьшение периода у T UMi, и авторы также отнесли ее к этой стадии эволюции.

Однако теория пока не в состоянии объяснить все сложные изменения кривых блеска, наблюдающиеся у мирид и других долгопериодических звезд. Возможно, сказывается недостаточная наблюдательная классификация этих изменений, что, в свою очередь, требует рассмотрения переменности звезд на протяжении больших временных интервалов.

В данной работе проведено обобщение многих из перечисленных исследований. Она включает в себя как подробный анализ кривых изменения характеристик индивидуальных циклов с целью их класси-

фикации, так и корреляционный анализ от 25 до 40 (в соответствии с характером нерегулярностей) параметров индивидуальных циклов звезд, а также "вторичный корреляционный анализ" полученных коэффициентов корреляции с параметрами средних кривых блеска между собой и с некоторыми другими параметрами, такими как спектральный класс, степень изменения периода и др.

Мы исследовали выборку из 53 звезд, в основном мирид. Но для уточнения параметров классификации нами были включены также 9 полуправильных звезд в основном из числа тех, для которых предлагалась переклассификация по другим работам [6,10,11].

Нами были использованы наблюдения из баз данных Ассоциации Французских Наблюдателей Переменных Звезд AFOEV [31] и Японской Лиги Наблюдателей Переменных звезд VSOLJ [32]. Они охватывают переменность в интервале до 80 лет, начиная с 1921г. Конечная дата различная для разных звезд, так как базы данных пополнялись с течением времени. Такой длинный ряд наблюдений был использован для того, чтобы исследовать вековые изменения периода и большое количество индивидуальных циклов переменности у долгопериодических пульсирующих звезд.

Подробное описание методики обработки наблюдений приведено в статье данного цикла "I. Методы анализа наблюдений" [33].

3. Результаты корреляционного анализа параметров индивидуальных циклов. Для этого анализа использовались 52 звезды. В эту выборку не вошла RX UMa, у которой не сохраняется средний период, и которая была однозначно отнесена к полуправильным переменным звездам.

Корреляции между параметрами индивидуальных циклов различны для разных звезд. В табл.1 приведен список корреляций, для которых средний модуль коэффициента корреляции по 52 звездам превышает 20% (это значение выбрано условно). Также в этой таблице указано количество звезд, для которых эта корреляция является значимой (т.е. $\rho/\sigma_\rho > 3$), причем отдельно указано количество звезд, для которых она положительна (N_+) и для которых она отрицательна (N_-). Также указаны минимальные и максимальные коэффициенты корреляции среди звезд, для которых корреляция значима.

Из этих корреляций наиболее важными являются корреляция амплитуды с периодом ($\rho_2, \rho_4, \rho_8, \rho_{11}$), а также звездных величин в максимуме и минимуме (ρ_9, ρ_6) с периодом. В корреляциях ρ_2 и ρ_{11} 4 звезды имеют коэффициенты корреляции, которые противоположны по знаку корреляциям у остальных звезд. У многих из них это вызвано систематическими изменениями амплитуды: у U CMi ($\rho_2 < 0$) наблюдаются цикли-

ческие изменения амплитуды; у R Dга ($\rho_{11} < 0$) - увеличение амплитуды (это будет обсуждаться далее, см. табл.11). Во многих случаях невысокий коэффициент корреляции может быть связан с тем, что, как в случае T Сер [34], между изменениями амплитуды и периода существует некоторый сдвиг во времени.

Таблица 1

КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ, НАИБОЛЕЕ ЧАСТО ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ У ДПП

	Параметр	Параметр	$\langle \rho \rangle \times$ 100	$N_{3\sigma}^-$	$N_{3\sigma}^+$	$\rho_{min} \times$ 100	$\rho_{max} \times$ 100
ρ_1	Блеск в предыдущем минимуме	Блеск в последующем минимуме	40	0	18	43	90
ρ_2	Амплитуда нисходящей ветви	Период между минимумами	38	2	12	-92	65
ρ_3	Блеск в текущем максимуме	Блеск в предыдущем минимуме	37	1	17	-62	89
ρ_4	Амплитуда нисходящей ветви	Период между текущим и последующим максимумами	31	0	13	46	69
ρ_5	Блеск в последующем максимуме	Разность блеска между предыдущим и последующим минимумами	31	9	0	-71	-38
ρ_6	Разность блеска между текущим и предыдущим максимумами	Период между минимумами	30	1	7	-53	65
ρ_7	Блеск в последующем минимуме	Обратный наклон нисходящей ветви	28	15	0	-72	-35
ρ_8	Амплитуда восходящей ветви	Период между минимумами	28	0	6	40	79
ρ_9	Блеск в текущем максимуме	Период между минимумами	28	7	0	-64	-46
ρ_{10}	Блеск в текущем максимуме	Блеск в последующем максимуме	26	1	5	-42	80
ρ_{11}	Амплитуда восходящей ветви	Период между текущим и последующим максимумами	23	2	4	-47	60

Корреляции ρ_1 и ρ_5 свидетельствуют о наличии систематических изменений среднего блеска (эти изменения также отражены далее в табл.10).

Определенную информацию о стабильности амплитуды несет корреляция ρ_3 . Здесь противоположный по знаку коэффициент корреляции наблюдается у V Boo, для которой характерно уменьшение амплитуды и изменение

характера переменности, более характерное для полуправильных звезд. Однако, поскольку эта корреляция встречается не во всех звездах, представляет интерес ее связь с другими параметрами переменности.

4. *Взаимосвязь переменности характеристик индивидуальных циклов и средних параметров переменности звезд.* Следующий этап нашего анализа заключался в том, чтобы выяснить, зависят ли параметры переменности индивидуальных циклов, в том числе и коэффициенты корреляции, от параметров средних кривых блеска, а

Таблица 2

ОБОЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗД

SP	Спектральный класс в максимуме
$SP2$	Спектральный класс в минимуме
$\langle P \rangle$	Средний период
$\langle Am \rangle$	Средняя амплитуда
$\langle As \rangle$	Средняя асимметрия
Δt_{max}	Разброс индивидуальных периодов между максимумами
Δt_{min}	Разброс индивидуальных периодов между минимумами
ΔM	Разброс среднего блеска
ΔAm	Разброс индивидуальных амплитуд
Δt_{RP}	Статистически оптимальная полуширина фильтра при аппроксимации методом скользящих парабол кривой блеска

также таких параметров, как спектральный класс, количество горбов, отнесенное к количеству максимумов, полуширина фильтра при аппроксимации скользящими параболом и др. В табл.2 мы приводим список обозначений, используемых для этого анализа.

Параметры $\langle P \rangle$, $\langle Am \rangle$, $\langle As \rangle$, s относятся к средней фазовой кривой блеска, разбросы (Δt_{max} , ΔAm и др.) вычислялись как разность максимального и минимального значения по параметрам индивидуальных циклов.

Особого внимания заслуживает вычисление численного показателя для спектрального класса. Как указывалось, мириды в основном принадлежат к спектральным классам M, S, C, причем существуют и промежуточные типы MS, SC. Только одна мирида, присутствующая также и в нашем исследовании, X Cam, имеет в максимуме спектральный класс K8. Как указывалось, последовательность $M \rightarrow MS \rightarrow S \rightarrow SC \rightarrow C$ характеризует возрастание отношения содержания углерода и кислорода. Опираясь на это положение, численный показатель спектрального класса вычислялся следующим образом:

$$SP = \begin{cases} \text{Спектральный класс ОКПЗ} & \text{для M} \\ \text{Спектральный класс ОКПЗ} + 10 & \text{для S} \\ \text{Спектральный класс ОКПЗ} + 20 & \text{для C.} \end{cases}$$

Для X Сам принималось $SP = -2$. Аналогичным образом вычислялся параметр $SP2$.

В табл.3 перечислены наиболее значимые корреляции между различными характеристиками переменности звезд. Зависимости различных параметров от амплитуды и спектрального класса далее обсуждаются отдельно.

Зависимости параметров переменности от спектрального класса. Как видно из рис.1, наибольшее среднее значение амплитуды наблюдается

Таблица 3

КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПЕРЕМЕННОСТИ 52 ЗВЕЗД

Параметр	Параметр	ρ	ρ/σ_p
SP	Δt_{RP}	0.70	7.0
$\Delta t_{min} / \langle P \rangle$	$\Delta Am. / \langle Am. \rangle$	0.70	6.8
$\Delta t_{max} / \langle P \rangle$	$\Delta Am. / \langle Am. \rangle$	0.58	5.0
Δt_{max}	$\langle Am. \rangle$	-0.63	5.8
Δt_{RP}	$\langle Am. \rangle$	-0.52	4.4
ΔM	ρ_3	0.51	4.2

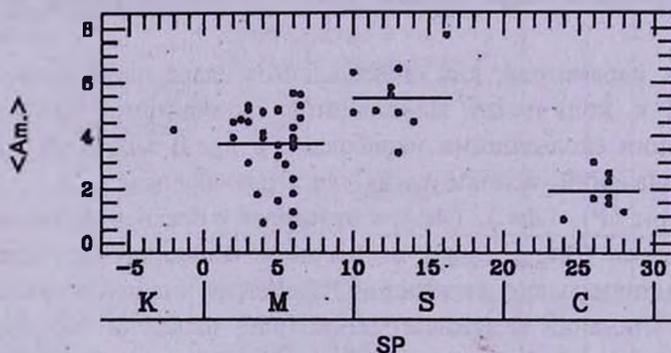


Рис.1. Зависимость амплитуды средней кривой блеска от спектрального класса. Горизонтальными линиями показаны средние значения для спектральных классов М, С, S.

Таблица 4

СРЕДНИЕ ВЕЛИЧИНЫ АМПЛИТУДЫ, ОТНОСИТЕЛЬНЫХ РАЗБРОСОВ АМПЛИТУДЫ И СРЕДНЕГО БЛЕСКА, А ТАКЖЕ РАЗБРОСА ПЕРИОДОВ МЕЖДУ МАКСИМУМАМИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ

Спектр. класс	$\langle Am. \rangle$	$\Delta Am. / \langle Am. \rangle$	$\Delta M / \langle Am. \rangle$	Δt_{max}
M	3.7 ± 1.4	0.78 ± 0.65	0.4 ± 0.3	61 ± 27
S	5.6 ± 1.9	0.25 ± 0.08	0.3 ± 0.1	58 ± 23
C	2.2 ± 1.0	0.72 ± 0.6	0.7 ± 0.5	106 ± 40

у звезд спектрального класса S, а наименьшее у класса C. У звезд спектрального класса M нет четкого разграничения на мириды и полуправильные переменные.

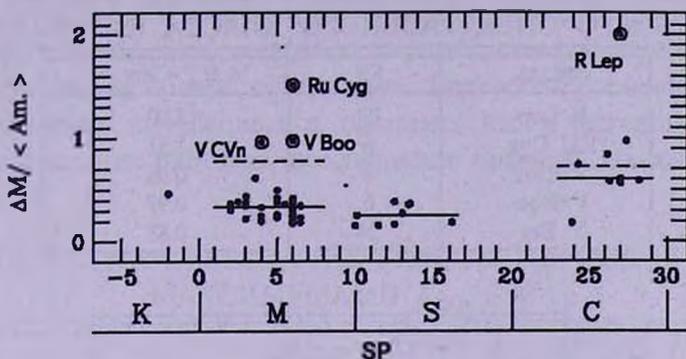


Рис.2. Зависимость относительного разброса среднего блеска от спектрального класса.

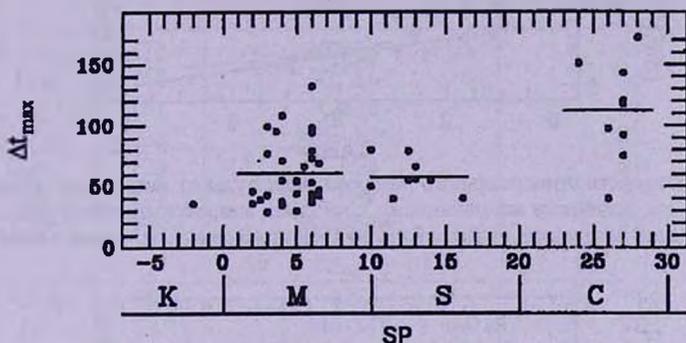


Рис.3. Зависимость разброса индивидуальных периодов между максимумами от спектрального класса.

Для относительных разбросов амплитуды, среднего блеска и разброса периодов между максимумами наблюдается обратная картина (рис.2, 3): эти величины больше всего для класса C и меньше всего для спектрального класса S. Средние значения этих величин указаны в табл.4 (большие погрешности связаны с "выпадающими" звездами).

Однако существует несколько звезд, которые сильно выделяются из основной массы звезд на этих диаграммах. Их характеристики приведены в табл.5 и 6.

Таблица 5

ЗВЕЗДЫ С АНОМАЛЬНО БОЛЬШИМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАЗБОСА АМПЛИТУДЫ

Звезда	SP	$\langle Am. \rangle$	$\Delta Am. / \langle Am. \rangle$
RU Cyg	6	0.67	3.72
V Cvn	4	0.76	3.32
V Boo	6	1.15	3.00

ЗВЕЗДЫ С АНОМАЛЬНО БОЛЬШИМИ ЗНАЧЕНИЯМИ
ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАЗБРОСА СРЕДНЕГО БЛЕСКА ДЛЯ
СВОЕГО СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА (см. рис.2)

Звезда	SP	$\Delta M / \langle Am. \rangle$
R Lep	27	2.00
RU Cyg	6	1.51
V Cvn	4	0.96
V Boo	6	0.97
Y Per	24	0.88

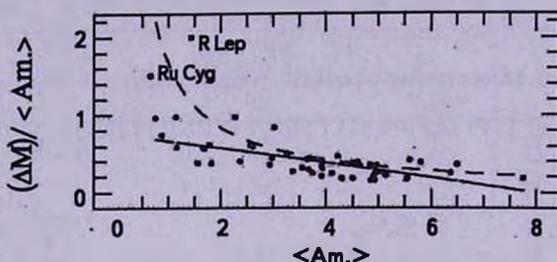


Рис.4. Зависимость относительного разброса амплитуды от амплитуды средней кривой блеска. Точки, обозначенные заполненными кружками, аппроксимированы прямой линией. Пунктирная линия соответствует гиперболе со средним значением, равным наблюдаемому.

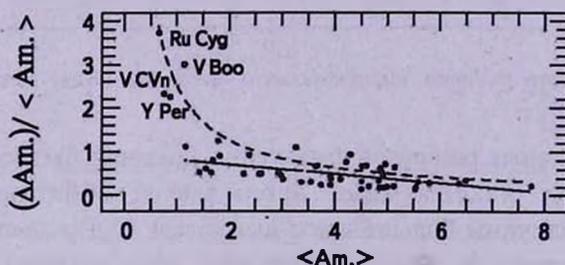


Рис.5. Зависимость относительного разброса среднего блеска от амплитуды средней кривой блеска. (Линии - см. подпись к рис.4.).

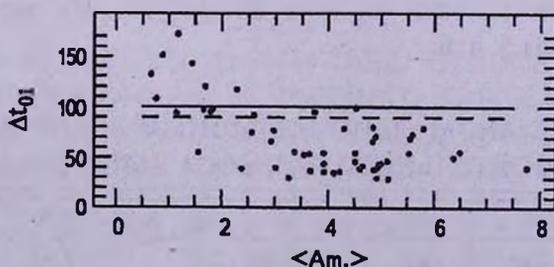


Рис.6. Зависимость разброса периода между максимумами от амплитуды средней кривой блеска. Сплошная линия соответствует значению 100^d , а пунктирная - 90^d .

Зависимости параметров переменности от амплитуды. Зависимости относительного разброса амплитуды, среднего блеска и разброса периодов между максимумами показаны на рис.4-6.

То, что на рис.4 и 5 амплитуда средней кривой блеска является и абсциссой и делителем ординаты, предполагает гиперболическую зависимость между этими величинами. Гиперболы, имеющие то же среднее значение по абсциссе и ординате, что и исходные данные, изображены на этих рисунках пунктирными линиями. На рис.5 данные

Таблица 7

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕЗД С РАЗБРОСОМ ПЕРИОДОВ МЕЖДУ
МАКСИМУМАМИ $\Delta t_{max} > 90^d$

$\Delta t_{max} > 100^d$			
Звезда	Δt_{max}	Спектральный класс (ОКПЗ)	Тип переменности (ОКПЗ)
RS Cyg	172	C8.2e	SR
R Lep	143	C7.6e	M
Y Per	151	C4.3e	M
RU Cyg	132	M6e-M8e	SR
S Cam	120	C7.3e	SR
S Cep	117	C7.4e	M
V CVn	108	M4e-M8e	SR
$90^d < \Delta t_{max} < 100^d$			
W Dra	99	M3	M
T Ari	98	M6-M8	SR
SS Vir	97	C6.3e	SR
S Aql	95	M3-M5.5	SR
T Cas	95	M6e-M9e	M
V Boo	94	M6e	SR
W Cas	92	C7.1e	M

могут быть описаны такой гиперболой, хотя они имеют гораздо больший разброс в области меньших амплитуд. На рис.4 звезды из табл.4 ложатся на гиперболу в области малых амплитуд, но в то же время существует

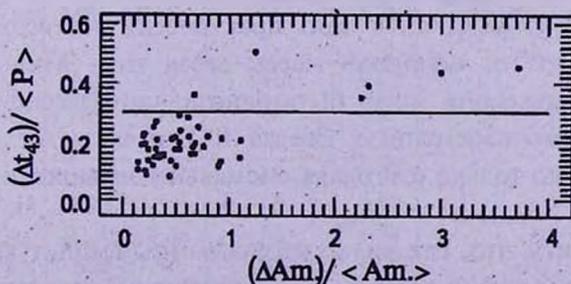


Рис.7. Зависимость относительного разброса периодов между минимумами от относительного разброса амплитуды.

последовательность звезд (мирид), которые лучше ложатся на прямую (с коэффициентом корреляции $\rho(\Delta Am./\langle Am. \rangle, \langle Am. \rangle) = -0.60$, $\rho/\sigma_p = 5.1$), чем на гиперболу.

Из рис.6 и табл.7 видно, что большинство мирид имеет разброс периодов между максимумами менее 90^d . В группу звезд с $\Delta t_{max} > 100^d$ входят мириды и полуправильные (по классификации ОКПЗ) переменные

Таблица 8

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВЕЗД С ОТНОСИТЕЛЬНЫМ РАЗБРОСОМ ПЕРИОДОВ МЕЖДУ МИНИМУМАМИ $\Delta t_{min}/\langle P \rangle > 0.30$

Звезда	$\Delta Am./\langle Am. \rangle$	$\Delta t_{min}/\langle P \rangle$	Спектральный класс (ОКПЗ)	Тип переменности (ОКПЗ)
RU Cyg	3.72	0.45	M6e-M8e	SR
V CVn	2.32	0.39	M4e-M8e	SR
V Boo	3.00	0.44	M6e	SR
RS Cyg	1.25	0.5	C8.2e	SR
Y Per	1.16	0.35	C4e	M
W Dra	0.67	0.36	M3	M

спектрального класса С, а также две полуправильные звезды класса М. В переходную группу с $90^d < \Delta t_{max} < 100^d$ входят как полуправильные переменные, так и типичные мириды спектрального класса М.

На рис.7 показана зависимость относительного разброса амплитуды от относительного разброса периода между минимумами. На этом рисунке большинство звезд образуют тесную группу в области малых значений этих величин. Характеристики нескольких звезд, отстоящих от этой группы по значениям относительного разброса периода, даны в табл.8. По обоим параметрам наиболее сильно отстоят три звезды, уже знакомые нам по табл.5: RU Cyg, V CVn, V Boo.

5. Дополнительные параметры классификации. Таким образом, зависимость между параметрами изменений характеристик индивидуальных циклов может дать дополнительные критерии классификации долгопериодических переменных звезд.

Звезды RU Cyg, V CVn, V Boo практически на всех графиках существенно отстоят от основной массы звезд типа Миры Кита, и, таким образом, только они могут быть однозначно классифицированы как полуправильные переменные. Звезда R Lep также отличается от типичных мирид, но только благодаря аномально большим изменениям среднего блеска.

Следует отметить, что, как видно из диаграммы амплитуда - разброс периода между максимумами, мириды и полуправильные (по классификации ОКПЗ) переменные спектрального класса С образуют группу звезд с

Таблица 9

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗВЕЗД НА ГРУППЫ ПО ИЗМЕНЕНИЯМ
ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ

Группа	Звезда	Спектральный класс (ОКПЗ)	Тип переменности (ОКПЗ)	<Am>	Изменения амплитуды	Изменения среднего блеска
1	2	3	4	5	6	7
1	R Aql	M5e-M9e	M	5.00	Уменьш. с Уменьш. периода	
	R Hya	M6e-M9e	M	4.30		
	T UMi	M4e-M6e	M	4.90		
	W Dra	M3e-M4e	M	4.52		
2	T Cep	M5.5e-M8.8e	M	2.93	Циклич.	Циклич., нерегулярн. Циклич., нерегулярн.
	U UMi	M6e-M8e	M	2.38	Циклич.	
	W Lyr	M2e-M8e	M	3.93	Циклич.	
	T Cas	M6e-M9e	M	3.74	Циклич.?	
3	R Cas	M6e-M10e	M	5.59	Увел. Увел. Увел. Увел. Увел. Увел. Увел. + нерегулярн. Нерегулярн.?	Скачкообр. уменьш. Циклич., нерегулярн.
	R Aur	M6.5e-M9.5e	M	5.55		
	R Boo	M3e-M8e	M	5.14		
	R LMi	M6.5e-M9.8e	M	5.12		
	R UMa	M3e-M9e	M	4.96		
	R Dra	M5e-M9e	M	4.92		
	T UMa	M4e-M7e	M	4.87		
	U Her	M6.5e-M9.5e	M	4.65		
	T Her	M2.5e-M8e	M	4.6		
	RT Cyg	M2e-M8e	M	4.51		
	X Cam	K8-M8	M	4.22		
	RS Her	M4e-M8e	M	4.11		
	U CMi	M4e	M	3.92		
	R Leo	M6e-M9.5e	M	3.92		
	X Aur	M3e-M7e	M	2.98		
	W Peg	M6e-M8e	M	3.67		
S UMi	M6e-M9e	M	3.55			
o Cet	M5e-M9e	M	3.32			
V Cas	M5e-M8.5e	M	3.26			
4	T Aql	M6e-M8e	SRa	1.83	Циклич., нерегулярн.	Циклич., нерегулярн.
	X Oph	M5e-M9e	M	1.56		
5	S UMa	S0e-S9e	M	3.37		Нерегулярн.
	T Cam	S4,7e-S8.5,8e	M	4.51		
	S Cas	S3,4e-S5,8e	M	4.84		
	V Cnc	S0e-S7,9e	M	4.85		
	T Gem	S1.5,5-S9.5e	M	4.93		
	R Lyn	S2.5,5e-S6,8e	M	5.53		

Таблица 9 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	
	R Cyg W And R And χ Cyg	S2.5,9-S6,9e S6,1e-S9,2e (M4-M10) S3,5-S8,8e (M7e) S6,2e-S10,4e	M M M M	5.80 6.37 6.49 7.75		Нерегулярн.	
6	V CrB W Cas U Cyg S Cep S Cam SS Vir R Lep RS Cyg	C6,2e C7,1e C7,2-9,2e C7,4e C7,3e C6,3e C7,6e C8,2e	M M M SRa SRa M SRa	3.02 2.61 2.57 2.28 1.69 1.66 1.44 1.17		Уменьш. +нерегулярн. Циклич., нерегулярн. Увел. Параболическое изменение	Циклич.+резкие нерегулярн. Циклич. Циклич. Нерегулярн. Резкие нерегулярн. Нерегулярн.
7	S Aql Y Per	M3e-M5.5e C4,3e	SRa M	1.79 0.88		Нерегулярн. Нерегулярн.	
8	V Boo V CVn RU Cyg RX UMa	M6e M4e-M6e M6e-M8e M5	SRa SRa SRa SRb	1.15 0.76 0.67 0.77		Уменьш.+циклич Циклич., нерегулярн. Уменьш. +нерегулярн. Нерегулярн., переключения различ. значений периодов	Циклич. Циклич. Нерегулярн.

очень близкими характеристиками.

В табл.9 приведен список исследуемых звезд, их спектральные классы и тип переменности по ОКПЗ, а также качественное описание наличия изменений амплитуды и средней яркости. Звезды разделены на группы по типу изменений характеристик индивидуальных циклов и спектральному классу. В таблице отмечены только уверенно определенные изменения параметров. "Циклические" изменения не всегда подразумевают сохранение продолжительности цикла.

Еще одним дополнительным параметром, характеризующим мириды и полуправильные переменные, видимо, могут служить *вековые изменения амплитуды* (за исключением звезд на стадии гелиевой вспышки [14]).

Вековое увеличение амплитуды было обнаружено у 5 звезд (среди них 4 мириды и SS Vir, ранее классифицированная как полуправильная),

Таблица 10

КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЕКОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ АМПЛИТУДЫ

Звезда	Коэффициент изменения (+ соответствует увеличению), зв. вел./год
S UMi	0.0055±0.0004
R Dra	0.009±0.001
W Peg	0.011±0.002
SS Vir	0.011±0.002
U CMi	0.029±0.008
RU Cyg	-0.0135±0.001
V Boo	-0.0274±0.001

Таблица 11

КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЕКОВОГО УМЕНЬШЕНИЯ СРЕДНЕГО БЛЕСКА

Звезда	Коэффициент уменьшения, зв. вел./год
R LMi	0.023±0.002*
R Dra	0.0056±0.0007
V CrB	0.016±0.003

*Скачкообразное падение на 1^m.

вековое уменьшение обнаружено у двух звезд, для которых нами была подтверждена классификация как полуправильных переменных: RU Cyg и V Boo. Коэффициенты уменьшения со временем указаны в табл.10. Таким образом, можно предположить, что для некоторых мирид характерно вековое увеличение периода, в то время как для полуправильных переменных - его уменьшение.

Три звезды показывают уверенное уменьшение среднего блеска. Они указаны в табл.11. При этом у различных звезд это уменьшение носит как постепенный, так и скачкообразный характер.

Итак, наш анализ позволил нам отнести звезды из исследуемой выборки к следующим подтипам. (см. табл.9):

1. *Мириды на стадии гелиевой вспышки* (Средняя по группе амплитуда $\langle A_p \rangle = 4^m.68$, спектральный класс M). Характерно резкое уменьшение периода, которое затем сменяется кратковременным увеличением и плавным уменьшением (см. подробности в [14]). Аналогично периоду изменяется и амплитуда.

2. *Мириды с циклическими изменениями периода и амплитуды* ($\langle A_p \rangle = 3^m.25$, спектральный класс M). Кривые O-C показывают синусоидальные изменения. Циклы порядка 17-20 тыс. дней. Наиболее

четко выражены изменения у Т Сер: изменения периода сопровождаются изменением амплитуды, асимметрии и звездной величины горба на восходящей ветви, но между кривыми изменения этих параметров имеется сдвиг (1-4 цикла) [34].

3. *Типичные мириды спектрального класса M* ($\langle A_{\text{м}} \rangle = 4^{\text{м}}.36$). Кривая блеска регулярна, амплитуда существенно больше $2^{\text{м}}$. Для некоторых звезд характерно увеличение амплитуды. Составляют основную группу звезд на наших диаграммах.

4. *Малоамплитудные мириды* ($\langle A_{\text{м}} \rangle = 1^{\text{м}}.70$, спектральный класс M) отличаются только малой амплитудой ($< 2^{\text{м}}$), все остальные параметры характерны для мирид. У X Орн заподозрена двойственность [35].

5. *Мириды спектрального класса S* отличаются наибольшими среди мирид амплитудами ($\langle A_{\text{м}} \rangle = 5^{\text{м}}.44$).

6. *Регулярные долгопериодические переменные спектрального класса C* ($\langle A_{\text{м}} \rangle = 2^{\text{м}}.06$). Характерны небольшие амплитуды, сильная зашумленность кривой блеска, кривая блеска нестабильна: период, амплитуда, асимметрия в определенных пределах меняются хаотически. В некоторых циклах возникают горбы или двойные максимумы на различных участках кривой блеска. Типичны сильные изменения среднего блеска. По приведенным выше диаграммам группа довольно однородна, независимо от классификации в ОКПЗ (M или SR), т.е. классификация долгопериодических переменных *спектрального класса C* не может производиться по тем же критериям, которые приняты для остальных звезд этого типа (амплитуда, регулярность).

7. *Переходный тип между M и SR* ($\langle A_{\text{м}} \rangle = 1^{\text{м}}.34$). У двух звезд наблюдаются переключения между регулярной переменностью, типичной для мирид и полуправильной переменностью с существенно худшей периодичностью и существенно меньшей амплитудой. На некоторых из наших диаграмм данные звезды выпадают из группы мирид.

8. *Полуправильные переменные* (спектральный класс M, $\langle A_{\text{м}} \rangle = 0^{\text{м}}.84$). Очень низкая амплитуда, часто уменьшается со временем. Сильно меняется средний блеск. На большинстве приведенных диаграмм эти переменные отделяются от остальных звезд выборки.

Наши результаты находятся в хорошем согласии с [6], где тоже рассматривается классификация по диаграмме амплитуда - разброс амплитуды и предложена переклассификация для 5 звезд из рассматриваемой нами выборки.

Таким образом, в традиционной классификации долгопериодических пульсирующих звезд основными критериями являются средняя амплитуда и регулярность кривой блеска. Однако первый параметр, вследствие изменения со временем, часто не может быть точной характеристикой

звезды. Второй параметр является в большей степени качественным, что затрудняет классификацию с его помощью. Предложенный нами ряд параметров и диаграмм, использующих характер и диапазон изменений характеристик индивидуальных циклов, может быть использован в качестве численных характеристик "регулярности", на основе которых может проводиться классификация долгопериодических пульсирующих звезд.

Авторы выражают свою благодарность за полезное обсуждение В.П. Гринину и Е.П.Павленко.

¹ Астрономическая обсерватория и кафедра астрономии Одесского национального университета им. И.И.Мечникова, Украина

² Одесский Национальный морской университет,
Украина, e-mail: vlada@mail.od.ua il-a@mail.od.ua

INVESTIGATION OF VARIABILITY OF LONG-PERIODIC PULSATING STARS. II. ADDITIONAL CLASSIFICATION CRITERIA FOR VARIABLES

V.I.MARSAKOVA¹, I.L.ANDRONOV^{1,2}

The results of the analysis of the observation of 53 long period variables are presented (44 of these stars belong to Mira-type variables and 9 - to semiregular variables). The catalog of individual cycles characteristics is obtained for these stars. The correlation analysis of individual cycles characteristics is provided for each variable. The range of diagrams connecting variability of individual cycles characteristics with mean parameter of variability and spectral classes is obtained. The classification criteria for long periodic variables based on these diagrams is proposed.

Key words: *stars: long period variables: classification*

ЛИТЕРАТУРА

1. К.Гоффмейстер, Г.Рихтер, В.Венцель, Переменные звезды, Наука, М., 1990, с.360.
2. К. де Ягер, Звезды наибольшей светимости, Мир, М., 1984, с.137-139.
3. D.L.Lambert, V.V.Smith, M.Busso, R.Gallino, O.Straniero, Astrophys. J., 450, 302, 1995.

4. *L.A.Willson*, Jour. Amer. Assoc. Var. Star. Observ., 15, No.2., 228, 1986.
5. *П.Н.Холопов и др.*, Общий каталог переменных звезд. Т.1-3, Изд. 4-е, Наука, М., 1985.
6. *J.A.Mattei, G.Foster, L.A.Hurwitz et. al.*, Proc. ESA Symp. "Hipparcos-Venice' 97", Venice (Italy), 269, 1997.
7. *H.Ludendorff*, Stzb. Preuss. Akad. Wiss., vol. XX , 1932.
8. *M.S.Vardya*, Astron. Astrophys., 182, 75, 1987.
9. *M.S.Vardya*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 73, 181, 1988.
10. *M.O.Mennessier*, Astron. Astrophys., 144, 463, 1985.
11. *M.O.Mennessier, H.Boughaleb, J.A.Mattei*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 124, 143, 1997.
12. *Л.С.Кудашкина, И.Л.Андронов*, Кинем. физ. неб. тел., 10, 1, 41, 1994.
13. *L.S.Kudashkina, I.L.Andronov*, Proc. IAU Symp. №180 "Planetary Nebulae", Groningen (The Netherlands), 353, 1996.
14. *V.I.Marsakova*, Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser., 203, 130, 2000.
15. *А.Г.Худженко*, Переменные звезды, 19, 4, 381, 1974.
16. *Л.С.Кудашкина*, Переменные звезды, 22, 6, 928, 1988.
17. *J.P.Harrington*, Astrophys. J., 70, 569, 1965.
18. *C.A.Feuchter*, Astron. J., 72, 702, 1967.
19. *J.A.Mattei, G.Foster*, Proc. IAU Symp. №177, "Carbon Star Phenomena", 120, 1998.
20. *J.E.Isles, D.R.B.Saw*, J. Brit. Astron. Assoc., 97, 106, 1987.
21. *J.E.Isles, D.R.B.Saw*, J. Brit. Astron. Assoc., 99, 121, 1989.
22. *J.E.Isles, D.R.B.Saw*, J. Brit. Astron. Assoc., 99, 165, 1989.
23. *J.E.Isles, D.R.B.Saw*, J. Brit. Astron. Assoc., 99, 275, 1989.
24. *L.S.Kudashkina, G.M.Rudnitskij*, Odessa Astron. Publ., 7, 63, 1995.
25. *A.J.Fleicher, A.Gauger, E.Sedlmayr*, Astron. Astrophys., 297, 543, 1995.
26. *S.Hofner, M.U.Feuchtinger, E.A.Dorfi*, Astron. Astrophys., 297, 815, 1995.
27. *J.M.Winters, A.J.Fleischer, A.Gauger, E.Sedlmayr*, Astron. Astrophys., 290, 623, 1994.
28. *P.R.Wood, D.M.Zarro*, Astrophysical Journal., 247, 247, 1981.
29. *J.Gal, K.Szatmary*, Astrophys. J., 297, 461, 1995.
30. *J.A.Mattei, G.Foster*, Jour. Amer. Assoc. Var. Star. Observ., 23, 106, 1995.
31. *E.Schweitzer et al.*, <http://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/afouv/>.
32. *D.Nogami et al.*, <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/vsnet/>.
33. *И.Л.Андронов, В.И.Марсакова*, Астрофизика, 49, 433, 2006.
34. *V.I.Marsakova, I.L.Andronov*, Astron. Soc. Pacif. Conference Series, 203, 131, 2000.
35. *K.H.Hinkle, W.W.G.Scharlach, D.N.B.Hall*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 56, N1, 1, 1984.