

ОБЗОРЫ

ПОЛУПРАВИЛЬНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Л.С.КУДАШКИНА

Поступила 19 декабря 2018

Принята к печати 13 сентября 2019

Рассмотрены исследования полуправильных переменных звезд, выполненных разными авторами, дан обзор основных теоретических и наблюдательных проблем, связанных с этими звездами. Обсуждается их эволюционный статус и возможная связь с долгопериодическими переменными типа Миры Кита. Подробно описаны отдельные объекты, принадлежащие разным типам полуправильных переменных. Для всех рассмотренных звезд проведены исследования периода с помощью периодограммного и/или вейвлет-анализа. К разработанным ранее дополнительным фотометрическим критериям классификации добавлено изучение фазовых портретов сглаженного колебания блеска. Отмечено также, что все методы анализа фотометрического поведения, применяемые для звезд типа Миры Кита, можно применять и к полуправильным переменным. Уйдя с Главной последовательности, звезды проходят область неустойчивости цефеид, превращаясь в радиально пульсирующие переменные типа δ Цефея. С этими звездами могут быть связаны полуправильные переменные гиганты и сверхгиганты спектральных классов F-K, которые принято обозначать символом SRd. В процессе дальнейшей эволюции переменные высокой светимости попадают в область красных сверхгигантов, превращаясь в переменные типа SRc (или Lc), а переменные меньшей светимости превращаются в полуправильные переменные SRab (или неправильные Lb) поздних спектральных классов. Переменные типа RV Тау представляют собой класс маломассивных (с массами порядка одной солнечной) пульсирующих F-K - сверхгигантов ($M_v = -3^m \div 5^m$), находящихся, возможно, на кратковременной эволюционной стадии перехода от красного гиганта к протопланетарной туманности, что и объясняет немногочисленность звезд этого типа переменности.

Ключевые слова: *звезды: обзор: пульсирующие переменные: полуправильные: кривые блеска: периодограммный анализ: вейвлет: асимптотическая ветвь гигантов*

1. *Введение.* Исторически к полуправильным переменным звездам (SR) относят пульсирующие переменные весьма различных типов, например, желтые полуправильные звезды типа RV Тельца и красные полуправильные поздних типов, соседствующие на диаграмме Герцшпрунга-Рессела со звездами типа Миры Кита (рис.1). При этом у первых кривая блеска достаточно регулярна, а у вторых поведение обладает такими неправильностями, что часто с трудом удастся выделить какую-либо периодичность, чтобы классифицировать звезды. К тому же, красные полуправильные переменные от звезд типа Миры Кита часто отличает только меньшая амплитуда изменения блеска (менее 2.5

звездных величин).

Пульсационная неустойчивость возникает на определенных стадиях звездной эволюции, поэтому классификация пульсирующих переменных звезд по продолжительности периода, форме кривой блеска, виду спектра и другим наблюдательным признакам отражает их эволюционный статус, т.е. принадлежность к группе звезд с определенными значениями массы, возраста и химического состава.

По сравнению со временем прохождения звездной стадии неустойчивости промежуток времени раскачки колебаний достаточно короток, поэтому практически все наблюдаемые нами пульсирующие звезды находятся на

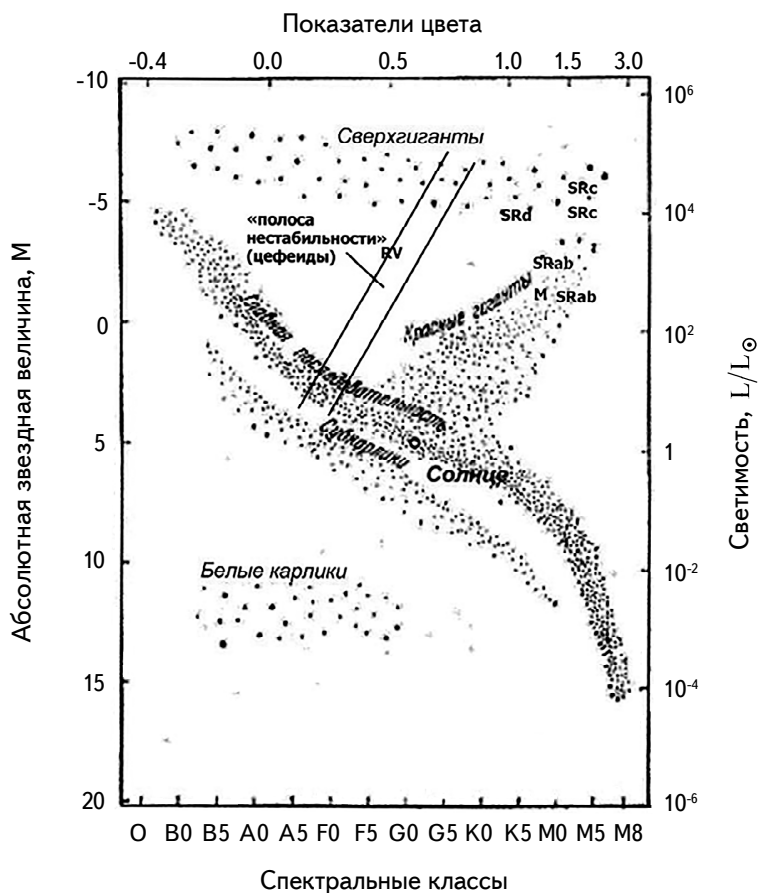


Рис.1. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела, на которой показаны приблизительные положения пульсирующих переменных: полуправильных сверхгигантов (SRc), полуправильных красных гигантов (SRab), долгопериодических типа Миры (M), полуправильных типа RV Тельца (RV), полуправильных желтых гигантов и сверхгигантов (SRd) и полосы неустойчивости. Одинаково обозначенные звезды, лежащие на диаграмме выше, отличаются меньшим возрастом (см. табл.4) [1,2].

стадии автоколебаний.

В отличие от теории пульсаций классических пульсирующих звезд, которая была подробно разработана Жевакиным уже к середине XX в. [3], детальной модели пульсаций долгопериодических переменных звезд (ДПП) пока не существует. Это связано с проблемами теории развития конвекции во времени, а также с определением мод пульсаций (что в свою очередь связано с неточностью определения радиусов, так как на поздней стадии эволюции звезд они имеют протяженную атмосферу, плавно переходящую в околозвездную оболочку). В результате многие наблюдательные проявления, такие, как скачкообразные изменения периодов, изменения амплитуды и формы кривой блеска не получили теоретического объяснения. Однако некоторые наблюдательные эффекты, например, "прогрессивное" уменьшение периодов, получили приемлемое объяснение, или, по крайней мере, были высказаны гипотезы, хорошо согласующиеся с наблюдениями. Можно предположить, что развитие теории в существенной мере тормозится недостаточной классификацией наблюдаемых явлений. Например, мало изучено изменение кривых блеска от цикла к циклу, так как это требует длинных рядов наблюдений и их тщательного анализа. Изучение закономерностей изменения кривых блеска от цикла к циклу и вековых изменений на протяжении длительных интервалов времени и их классификация могли бы стать наблюдательным фундаментом для развития теории пульсаций ДПП.

Основные решаемые в настоящее время проблемы, касающиеся звезд асимптотической ветви гигантов, это - построение динамических моделей атмосфер, определение моды пульсации, изучение механизма потери массы и дальнейшая эволюция звезд.

Одним из главных в теории звездных пульсаций является вопрос моды, в которой пульсируют звезды асимптотической ветви.

У каждой звезды существует свой набор периодов радиальных колебаний, который задается распределением вещества внутри звезды. Самый длинный из всех возможных периодов принадлежит колебаниям в фундаментальной моде. При пульсациях в первом оберitone внутри звезды имеется слой газа - узел обертона, который остается неподвижным на протяжении всего пульсационного цикла [4]. Проблема заключается в том, что, радиальные пульсации в фундаментальной моде свойственны, например, как ярким звездам асимптотической ветви (AGB), так и звездам меньшей светимости, составляющим ветвь красных гигантов (RGB) [5].

Для решения вопроса о типе звездной пульсации необходимо сначала классифицировать наблюдательные проявления звездной активности, т.е. изменения блеска звезд.

Любые способы классификации звезд по типам переменности опираются

на общий вид кривой блеска и спектральный класс. Однако такой подход не всегда удачен, если речь идет о полуправильных переменных (SR). Для них часто нельзя рассматривать общую кривую блеска, так как она содержит участки, характерные для звезд различных типов. Происходит это, вероятно, потому что SR-звезды (от английского *semiregular*) в большинстве своем, во-первых, мультипериодичны и все компоненты этой мультипериодичности проявляют себя очень активно, т.е. имеют сравнимую амплитуду с главным колебанием. А, во-вторых, период основного колебания также меняется [6].

2. *Данные.* Учитывая наблюдательные особенности полуправильных переменных (звезды яркие в визуальной области, спектры содержат молекулярные полосы, максимум энергии лежит в длинноволновой области, периоды - несколько десятков или сотен дней), для фотометрических исследований удобно использовать наблюдательные базы ассоциаций любителей астрономии, такие как AFOEV (<ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/afoev>), VSOLJ (<http://vsolj.cetus-net.org>), AAVSO (<http://aavso.org>), ASAS (<http://www.astrouw.edu.pl/asas>). Данные наблюдений очень разнородны, поэтому обычно производится предварительная обработка. Подробное описание работы с базами данных наблюдений приводится в работах Андропова и Марсаковой [7] и Марсаковой и Андропова [8].

К указанным базам наблюдений можно добавить коллекции фотопластинок патрульных снимков неба, которые являются достаточно однородным наблюдательным материалом. Общее число накопленных фотопластинок составляет около 2.1 млн. Три обсерватории мира являются собственниками наиболее крупных фотографических коллекций (больше 100 тыс. астронегативов), прежде всего это Гарвардская обсерватория в США (500 тыс. негативов, с 1885 г.) и Зоннебергская обсерватория в Германии (около 300 тыс. негативов, с 1926 г.). В архиве Астрономической обсерватории Одесского национального университета им. И.И.Мечникова - третьей в мире обсерватории-собственника крупной фотографической коллекции - содержится около 104 тыс. пластинок с 1909 г.: 20 тыс. старинных, включая коллекцию Симеизской обсерватории, и более 80 тыс., полученных в Одессе в с. Маяки, начиная с 1957 г. (большую часть этой коллекции составляют прямые фотографические снимки, выполненные по программам наблюдений переменных звезд) [9].

Исходя из теории пульсаций звезд, фундаментальной характеристикой, которую можно определить из наблюдений, является период изменения блеска. Для наиболее точного его определения необходимо иметь среднюю кривую блеска на большом интервале времени. Однако для полуправильных переменных это является весьма трудной задачей. Часто удобно использовать отдельные сезоны в некотором временном интервале, длительность которого заведомо превышает возможный период изменения блеска. Кроме того, можно исследовать

период в разных диапазонах длин волн. Например, для поиска периода и построения средних кривых блеска полуправильной переменной L_2 Pup использовались наблюдения в ближних инфракрасных полосах H и K [10]. А для анализа средней кривой блеска слабой полуправильной переменной V411 Sct использовались данные [11].

3. Методы. Полуправильные переменные могут на отдельных интервалах показывать достаточно устойчивый период, который затем может смениться другим или плавно менять свое значение, а также колебания могут стать хаотическими. Периодограммный анализ (рис.2) позволяет определить значения циклов не только устойчивых колебаний, но и меняющихся со временем.

Для анализа используется метод наименьших квадратов, где сравнивается дисперсия отклонений от сглаживающей функции с дисперсией исходных наблюдений. В качестве тест-функции использована статистика

$$S(f) = \frac{\sigma_C^2}{\sigma_O^2} = 1 - \frac{\sigma_{O-C}^2}{\sigma_O^2}, \quad (1)$$

где σ_O - среднеквадратичное отклонение "наблюдений" O от среднего. C - соответствует "расчетным" значениям и $O - C$ отклонениям "наблюдаемых" значений от "расчетных". Основные уравнения, сглаживающие функции, определение моментов экстремумов методом дифференциальных поправок, а также одночастотное и многочастотное приближения гармоническими функциями подробно рассмотрены в [12,7].

"Wavelet" или всплеск-анализ применяется для исследования процессов произвольной природы, в данном случае, для квазициклических, мультиперио-

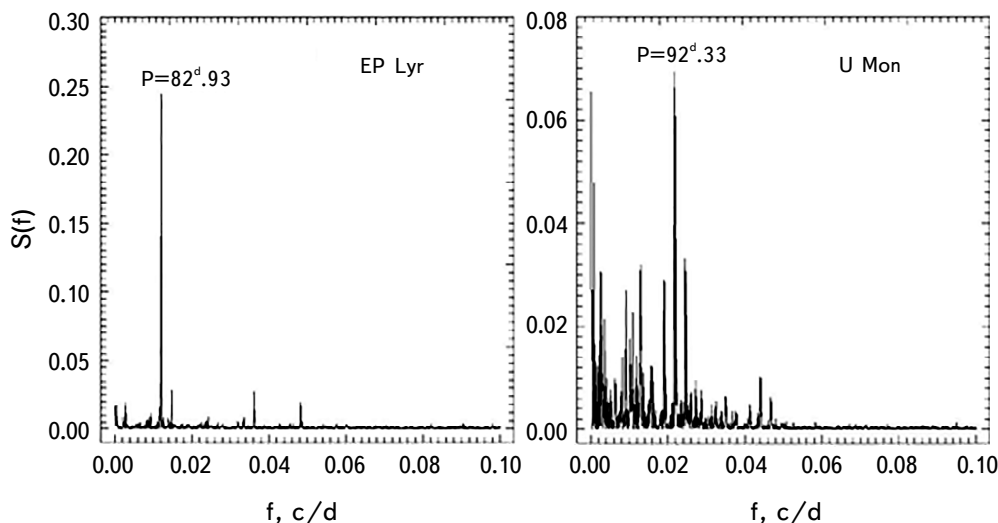


Рис.2. Пример периодограмм для двух звезд типа RVb.

дических или хаотических колебаний блеска полуправильных переменных звезд. Как и в периодограммном анализе, алгоритм всплеск-анализа основан на методе наименьших квадратов с дополнительными весами. Здесь используется тест-функция, которая аппроксимируется синусоидой (для медленно меняющихся "периодов") или скользящими синусами (если период постоянный). В отличие от периодограммного анализа, в данном методе определяется зависимость характеристик переменности от времени, например, периода и амплитуды.

В случае, если период меняется скачкообразно, либо колебания хаотичны, проводится шкалограммный анализ (зависимость тест-функции от шкалы - пробного периода), где тест-функция аппроксимируется параболой. Циклические или квазипериодические колебания приводят к появлению на шкалограмме отдельных пиков, хаотические колебания характеризуются отсутствием таких пиков и показывают только "непрерывный спектр". Основные соотношения, обсуждения разных модификаций метода всплеск-анализа в применении к

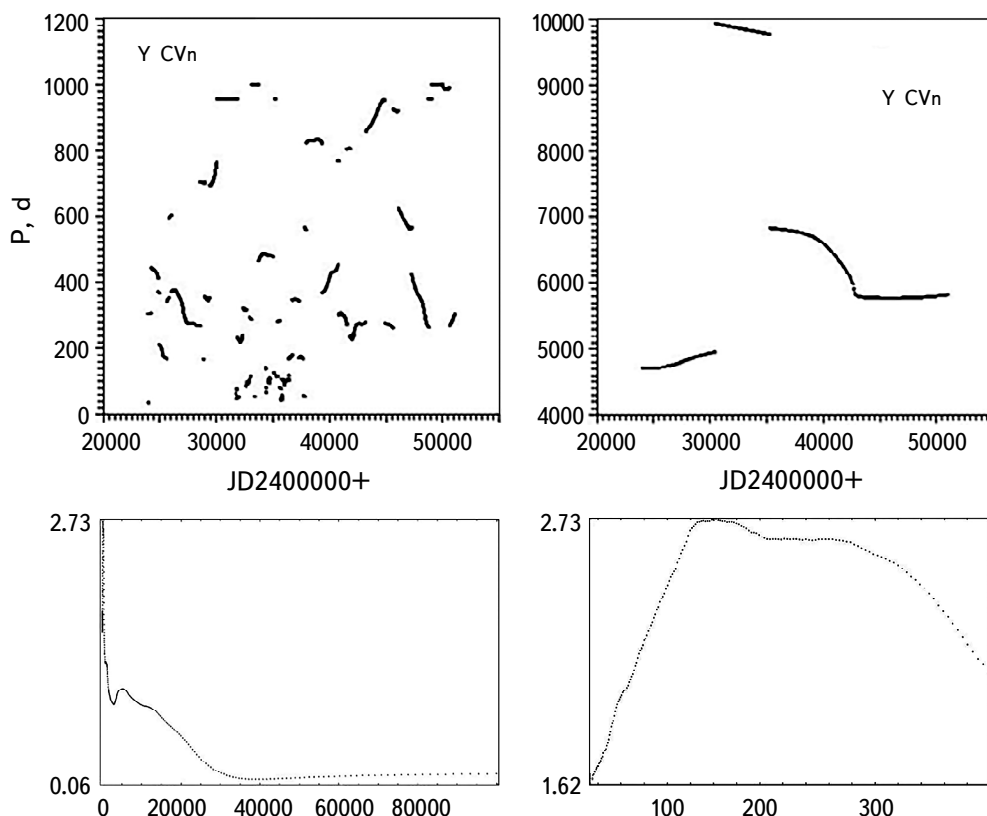


Рис.3. Всплеск-анализ (вверху) и шкалограмма (зависимость тест-функции от пробного периода) для SRb - звезды Y CVn (внизу).

переменности звезд разных типов, а также обсуждение оптимального выбора сетки пробных частот (периодов) можно найти в работе Андропова [13]. Пример всплеск-анализа приведен на рис.3.

Еще один метод исследования, который можно использовать как дополнение к предыдущим, - анализ фазовых плоскостей (портретов). В качестве координат фазовой плоскости x и $\dot{x}$ используются m - блеск звезды и его производная по фазе [14]. На рис.4 приведен анализ звезд W Нya, RV Tau и U Mon.

Заметим, что кривые блеска звезд типа RV Tau, хотя и подвержены сильной изменчивости, но их фазовые портреты указывают на то, что

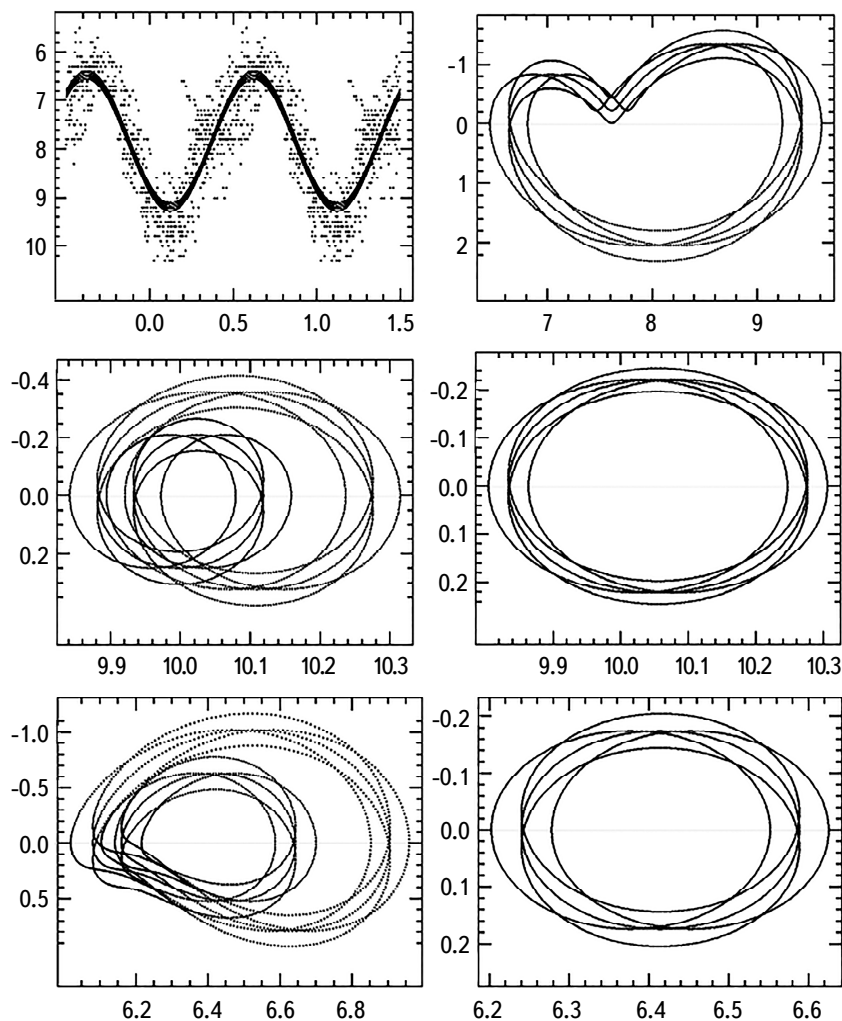


Рис.4. Средняя кривая блеска [15] и фазовый портрет SRa - звезды W Нya [14] - сверху; фазовые портреты RV Tau с основным периодом (слева) и половинным (справа) - посередине и то же для U Mon - внизу [38].

Таблица 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ПОЛУПРАВИЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД (ОКПЗ)

Звезда	Тип	Sp	P, дни	Δmag	Примечание
W Hya	SRA	M7.5e - M9ep	361	3 ^m .9	Δmag и форма кривой блеска сильно меняются
PZ Cas	SRC	M3Ia	850	2.0	Второй период 3195 ^d
S Per	SRC	M3Iae - M7	822	4.1	Вторичные волны, мультипериодичность
Y CVn	SRb	C5, 4J(N3)	3000	2.46	Мультипериодичность: 273 ^d , 160 ^d
RX Boo	SRb	M6.5e - M8IIIe	162.3	2.67	$P_2 = 304^d.7$, $P_3 = 2692^d$
RT Vir	SRb	M8III	155	1.29	
SV Peg	SRb	M7	144.6	1.8	
TW Peg	SRb	M6 - M8	929.3	0.9	Накладываются малые колебания с $P = 94^d.13$
BK Vir	SRb	M7III	150	1.52	
L ₂ Pup	SRb	M5IIIe - M6IIIe	140.6	3.6	
AF Cyg	SRb	M5e - M7	92.5	2.0	Накладывается более двух независимых колебаний $P_2 = 175.8$ и $P_3 = 942.2$ дней
U Mon	RVb	F8eVIb - K0pIb(M2)	91.32	2.7	Средняя величина меняется с периодом $P = 2320^d$
DF Cyg	RVb	G5 - K4I-II	49.88	4.4	Средний блеск меняется с периодом 780.2 дня
R Sct	RVa	G0Iae - K2p(M3)Ibe	146.5	4.4	[Fe/H] = -1. Период переменный
R Sge	RVb	G0Ib-G8Ib	70.770	2.4	$70.07 < P < 71.24$, средний блеск меняется с периодом 1112 ^d
EP Lyr	RVb	A4Ib-G5p	83.34	0.94	Вторичные колебания $P_2 = 45.1$, $P_3 = 7067$ дней
RV Tau	RVb	G2eIa-M2Ia	78.731	3.5	Средний блеск меняется с периодом 1224 ^d

колебания с половинным от основного (см. табл.1) периодом лучше отражают предельный цикл автоколебательного пульсационного процесса.

Также, в результате изучения фазовых портретов 24-х долгопериодических пульсирующих звезд (звезд типа Миры Кита и полуправильных) [14,39], обращает внимание тот факт, что чем больше амплитуда колебаний, тем сильнее искажен предельный цикл. На такой эффект указал Фадеев [16], объясняя его существенным вкладом нелинейных эффектов (с ростом светимости звезды), которые приводят к нерегулярности периода и амплитуды колебаний.

4. *Объекты.* Характеристики некоторых полуправильных переменных звезд, которые будут рассмотрены, приведены в табл.1 (данные взяты из ОКПЗ [44]).

W Гидры. Поиск периода проводился программой FO [17], а затем периоды, соответствующие самым высоким пикам, уточнялись методом дифференциальных поправок программой Four-M [12].

Найдены три значения периодов $P_1 = 381^{\text{d}}.7 \pm 0^{\text{d}}.3$, $P_2 = 400^{\text{d}}.2 \pm 0^{\text{d}}.7$, $P_3 = 357^{\text{d}}.2 \pm 0^{\text{d}}.8$, соответствующие амплитуды $A_1 = 1^{\text{m}}.30 \pm 0^{\text{m}}.030$, $A_2 = 0^{\text{m}}.50 \pm 0^{\text{m}}.029$, $A_3 = 0^{\text{m}}.32 \pm 0^{\text{m}}.03$ и начальные эпохи для максимумов $T_{\text{max1}} = 2446448.8 \pm 1.4$, $T_{\text{max2}} = 2446506.9 \pm 3.7$, $T_{\text{max3}} = 2446286.9 \pm 5.3$. Средняя кривая блеска с периодом $P_1 = 381^{\text{d}}.7$ показана на рис.4.

PZ Кассиопеи. Эта SRa - звезда исследовалась нами на протяжении 14 лет [18]. Период этой звезды, видимо, имеет тенденцию к увеличению, так как первоначально определялся как 801 день, затем $830^{\text{d}}-842^{\text{d}}$ и с момента JD 2448400 по 2449500 (1 полный цикл колебаний) определяется как 905 дней. Однако после этого вскоре звезда вступила в интервал постоянства блеска (с 1994г.) и до начала 1997г. показывала лишь незначительные хаотические поярчения. Наблюдения Брюханова [19] и Neumann [20] на участке JD 2448600-2449200 полностью совпадают (не считая небольшого систематического сдвига в звездных величинах).

У этой звезды возможно также наличие колебания с периодом около 300 дней, однако, это может также оказаться ошибкой селекции наблюдений.

S Персея. Эта звезда-сверхгигант SRc отнесена к звездам с гармонической переменностью. Период определен $P = 809^{\text{d}}.91$ [21]. На самом деле на периодограмме пик является сдвоенным $P_1 = 809^{\text{d}}.6 \pm 0^{\text{d}}.22$ и $P_2 = 768^{\text{d}}.8 \pm 0^{\text{d}}.31$.

Принимая, что звезда пульсирует в фундаментальной моде и, используя зависимость "период - абсолютная болометрическая величина", полученную Фистом [22], а также параметры, которые получил Абрамян [23] для сверхгигантов, был оценен радиус звезды $R = 1.0 \cdot 10^{14}$ см или примерно $1400 R_{\odot}$. При этом пульсационная константа будет равна $Q \approx 0.077$, что, вообще говоря, согласуется с теоретическими значениями (Q от 0.06 до 0.08) для полуправильных переменных [24].

Y Гончих Псов. С 1981 по 2010гг. мы находим упоминания у разных авторов необычного поведения блеска этой звезды.

Эта яркая углеродная холодная звезда редкого J-типа имеет обособленную асимметричную оболочку. Звезда расположена не точно в центре оболочки, яркость которой в западной части ниже. Толщина оболочки равна $(2-5) \cdot 10^{17}$ см при внутреннем радиусе оболочки $7 \cdot 10^{17}$ см, а расстояние до звезды 250 пк. Темп потери массы уменьшился за последние 14000 лет на два порядка. Похожие вариации встречаются у звезд U Нya, U Ant. Но Y CVn не показывает

абсорбционную линию технеция. Утверждается, что у нее не идет s -процесс. Из-за этого $Y CVn$ можно поместить не на AGB, а на RGB или на стадию стационарного горения гелия в ядре после гелиевой вспышки [25].

Звезда была исследована с помощью периодограммного и всплеск-анализа (рис.3). В литературе встречаются весьма разнообразные значения периодов, которые сведены в табл.2.

Таблица 2

ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДОВ ДЛЯ ЗВЕЗДЫ $Y CVn$ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ РАЗНЫХ АВТОРОВ

Значение периода	Работа
187 ^d с амплитудой 0 ^m .5 и 98 ^d с амплитудой 0 ^m .15 Min=2436097.5+251.8E 157 ^d 4000 ^d	Krisciunas [27] Vetešnik [28] Barnbaum [26] Kučinskas [29]

По нашим исследованиям наиболее характерными значениями периодов для этой звезды являются значения от 247^d на интервале JD 24 45322-46499 до 343^d на интервале JD 24 24362-27129 [30].

RX Волопаса. Исследование этой звезды типа SRb, проведенное Шаповаловой [21] по всему массиву данных AFOEV и VSOLJ, подтвердило наше значение периода около года ($P=369^d$). Однако характерная мультипериодичность с периодами 162^d и 179^d [31] не была выявлена, хотя на периодограммах присутствуют пики в этой области (≈ 164 и 183 дня), но их отношение сигнал/шум низкое.

RT Девы. Значение периода из ОКПЗ (табл.1) противоречит некоторым наблюдательным данным. Например, Венцель [32] получил значение периода около 200 дней из кривой блеска. Также обнаружены признаки систематической переменности в радиодиапазоне с периодом также близким к 200 дням. Исследования периода в работах Андропова и др. [33,34] показали, что период этой звезды меняется со временем и последнее значение найдено равным примерно 136 дней. Однако на периодограммах присутствуют сразу несколько пиков, удовлетворительно описывающих среднюю кривую блеска. Учитывая неоднородность наблюдений, периодограммный анализ был проведен с использованием методики "сглаживания сглаживающих сплайнов" [35] с числом базисных функций $NF=5$. В качестве тест-функции использовался коэффициент корреляции r между вычисленными (с использованием "наилучшей", в смысле метода наименьших квадратов, функции) и наблюдаемыми значениями для каждого пробного периода. В качестве критерия значимости пиков на периодограмме использовалось значение $\rho = r/\sigma_r$, где

$$\sigma_r = \sqrt{(1-r^2)/(N-NF)} \quad , \quad (2)$$

где N - число наблюдений. По правилу "трех сигм", значимыми пиками можно считать с достоверностью 99% те, для которых $\rho > 3$.

В табл.3 приведены значения периодов, соответствующих локальным максимумам на периодограмме, и оценки погрешностей их определения σ_P , вычисленные по формуле

$$\sigma_P = \frac{2\sigma_{O-C}^2(P_0)}{(N-NF) \left(\frac{d^2 \sigma_{O-C}(P)}{dP^2} \right)_{P=P_0}} \quad , \quad (3)$$

где

$$\sigma_{O-C}^2(P) = \sigma_0^2 (1 - r^2(P)) \quad , \quad (4)$$

где σ_0 - среднеквадратичное отклонение наблюдений от среднего, σ_{O-C} - от сглаживающей кривой, P_0 - "оптимальное" значение периода, соответствующее локальному пику.

SV Пегаса. Тип SRb. Поиск периода по всему массиву наблюдений (примерно 100 лет) приводит к значениям $359^d.69 \pm 2^d.46$ (отношение сигнал/шум ≈ 13); 764.84 ± 17.35 (≈ 5.8); 12.82 ± 0.01 (≈ 4.9). Более ранние исследования в двух цветах (где использовались более однородные наблюдения) показали наличие периодов 316^d и 170^d [36].

TW Пегаса. Тип SRb. Для исследования периодичности этой звезды использовались наблюдения разных авторов, в том числе и членов AFOEV.

Таблица 3

ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДОВ В РАЗЛИЧНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ
ДЛЯ ЗВЕЗДЫ RT VIR ПО НАБЛЮДЕНИЯМ РАЗНЫХ АВТОРОВ [34]

P, d	1955-1969	σ_P	1957-1980	σ_P	1970-1986	σ_P	1979-1987	σ_P
100-150	111.63 ± 0.37	6.79	103.54 ± 0.51	4.03	101.13 ± 0.56	3.50	115.48 ± 0.76	4.75
	118.62 ± 0.63	4.68	113.34 ± 0.52	4.14	115.43 ± 1.00	3.43		
			118.60 ± 0.41	6.05				
			140.24 ± 0.57	5.63	140.19 ± 1.08	3.08	136.04 ± 0.45	5.87
			144.51 ± 0.78	5.72			136.10 ± 0.83	5.87
150-250	159.22 ± 0.82	8.12	177.53 ± 0.85	7.29	167.14 ± 1.24	5.59	163.53 ± 2.50	5.10
							169.27 ± 2.29	5.31
	187.57 ± 1.27	6.48					197.91 ± 1.17	6.08
							224.72 ± 2.55	5.82
			227.47 ± 1.22	6.44				
			237.36 ± 0.86	7.05				

Данные были разделены в однородные группы, по которым и проводился поиск периода. Значение из ОКПЗ, равное 929.3 дня не подтверждено ни на одном из исследуемых интервалов. Более подробно об исследованиях этой звезды см. в работе [36].

ВК Девы. Исследования периода позволили выявить два значения характерного времени переменности звезды: 147 дней, что близко к значению периода, указанного в ОКПЗ, но более уверенным нам кажется значение 264.30 ± 0.47 дней. За время исследования блеск переменной менялся с амплитудой $0^m.75$ в фотовизуальных лучах (pv) [36].

L₂ Кормы. Исследование периода проводилось в полосах Н и К по данным работы [10]. Определено значение периода близкое к указанному в ОКПЗ: Н-полоса - 137.14 ± 0.19 дней и К-полоса - 137.19 ± 0.18 дней. Для анализа использовались программы Андронова [12,17]. Период в 137 дней хорошо описывает среднюю кривую. Возможно также, что у звезды присутствуют колебания с циклом около 5511 дней [37].

AF Лебедя. Звезда AF Cyg вполне может быть прототипом отдельного класса звезд (как, например, RV Tau). Этот объект показывает последовательное "переключение" колебаний, значения периодов которых никак не зависят друг от друга [38]. Подобные ей звезды - RX UMa, W Cyg, RU Cyg [21].

U Единорога. Для изучения возможной мультипериодичности медленного колебания, предварительные пары частот были взяты из одночастотного приближения, и затем уточнены методом дифференциальных поправок. В результате обнаружено, что медленное колебание является бимодальным с периодами $P_1 = 2006 \pm 38^d$, $P_2 = 1382 \pm 70^d$ [36]. В то же время по нашим исследованиям у звезды наблюдается мультипериодичность с характерными для объекта типа RV Tau периодами $P = 46^d.183 \pm 0.001$, $P = 91^d.32 \pm 0.07$. На рис.4 показаны фазовые портреты звезды с этими периодами.

На рис.5 изображено изменение среднего блеска звезды U Mon, которое показывает квазипериодические колебания с амплитудой около 2^m .

DF Лебедя. Для этой звезды было проведено исследование фазового портрета. В отличие от других звезд типа RV Tau, для DF Cyg более регулярный квазиэллипс получается для периода 776.4 дня, т.е. с периодом, близким к периоду изменения среднего блеска, а не половинного от основного [39].

Для R Sct, R Sge, EP Lyr и RV Tau также изучались изменения среднего блеска, амплитуды и фазы максимума блеска со временем. В большинстве случаев не удалось выделить какой-либо период [40].

Похожие изменения, в частности, амплитуды на больших временных интервалах присутствуют и у долгопериодических переменных типа Миры Кита [40]. Вообще говоря, из расчетов гидродинамических моделей и эволюционных треков пульсирующих красных гигантов на асимптотической ветви, выпол-

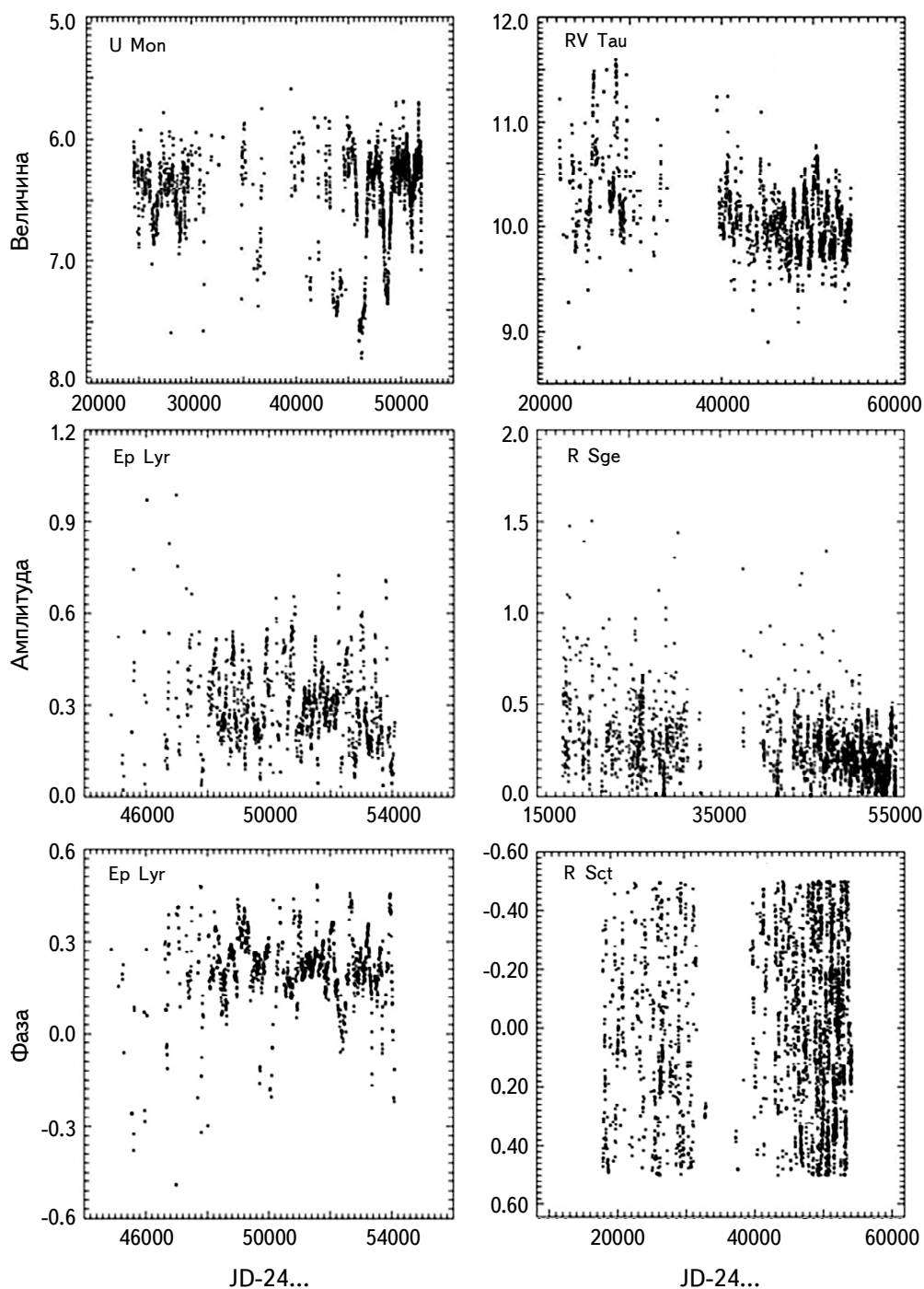


Рис.5. Изменение среднего блеска - вверху; амплитуды - посередине; фазы максимума блеска - внизу - со временем для звезд типа RV Tau.

ненных Фадеевым [16,41], следует, что вместе с вековыми (эволюционными) изменениями периода пульсаций могут также наблюдаться и вековые изменения амплитуды кривых блеска. Тем не менее, в работе [40] изменения амплитуды носят скорее циклический характер и, вероятно, не являются эволюционными. Скорее всего, эти изменения, как и изменения среднего блеска, обусловлены локальными процессами в атмосферах и оболочках звезд. Ударная волна от радиальной звездной пульсации проходит в слоях с изменяющимися случайным образом параметрами, что проявляется в хаотических или квазипериодических изменениях амплитуды от цикла к циклу.

5. *Классификация.* На сегодняшний день имеется очень грубая классификация SR-звезд, которую можно обобщить, используя три фундаментальные работы "Пульсирующие звезды" [42], "Общий каталог переменных звезд" [44], "Переменные звезды" [43], следующим образом (табл.4):

Следует заметить, что SRc-класс фактически отмечают только звезды-

Таблица 4

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛУПРАВИЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД

SRc	$0 < t < 10^7$ лет	Поздние спектры (M), сверхгиганты, амплитуды порядка 1^m , периоды от 30 до нескольких тысяч дней	μ Cep
SRc	$10^7 < t < 10^9$ лет	M, C, S спектры, сверхгиганты	RS Cnc 1700 ^d
SRb	$10^7 < t < 10^9$ лет	M, C, S спектры, гиганты, средний цикл от 20 до 2300 дней, возможно три вида поведения: квазипериодическое, постоянное, хаотическое	RR CrB AF Cyg
SRb	$t > 10^9$ лет	M, C, S спектры. Маломассивные гиганты (меньше 1.3 массы Солнца). Интенсивно теряют массу. Колебания блеска часто хаотичны	RT Vir RX Boo
SRa	$10^7 < t < 10^9$ лет	M, C, S спектры, гиганты, амплитуды меньше $2^m.5$, периоды в пределах от 35 до 1200 дней, форма кривой блеска сильно меняется, имеют эмиссионные линии	очень похожи на звезды типа Миры Кита ZAqr 136 ^{d.9} M1e-M3e
SRa	$t > 10^9$ лет	M, C, S спектры. Маломассивные гиганты (меньше 1.3 массы Солнца). Интенсивно теряют массу	W Hya VX Sgr
SRd	$10^7 < t < 10^9$ лет	F, G, K спектры, гиганты и сверхгиганты. Амплитуды от $0^m.01$ до 4^m . Периоды от 30 до 1400 дней отличаются от остальных отсутствием или очень слабыми полосами окиси титана, большими скоростями и светимостями	SX Her SV Uma UU Her AG Aur

сверхгиганты чаще всего с переменностью типа SRa.

Таким образом, обширный и неоднородный класс полуправильных переменных требует внимательного подхода и ревизии, которую вполне успешно можно провести, используя современные математические методы и уже имеющийся наблюдательный материал.

Прежде всего, полуправильные переменные звезды принадлежат AGB или post-AGB, т.е. это, в основном, красные гиганты и сверхгиганты. Однако встречаются объекты, которые, возможно, все еще находятся на стадии RGB (например, Y CVn).

Гоффмейстер [43] делит полуправильные на 4 группы - SRa, b, c, d, - а также, звезды типа RV Тельца. Такой же классификации придерживается и Общий каталог переменных звезд [44]. Однако имеются интересные работы, предлагающие дополнительное разделение полуправильных переменных. Например, согласно работам [45,46], в которых были изучены основные свойства SRa и SRb переменных, а именно - болометрические величины, периоды, амплитуды в визуальной и ИК областях, химические свойства, пульсационные свойства (диаграммы период-цвет, амплитуда-цвет, цвет-цвет) и пространственно-кинематическое распределение, следует, что SRa-звезды являются промежуточными объектами между миридами и SRb во всех аспектах исследования. SRb могут быть разделены на две группы соответственно присутствию или отсутствию эмиссии от околозвездной пыли. Это разделение также соответствует разделению по периодам, амплитудам и температуре: звезды без околозвездной пыли имеют меньшие периоды и амплитуды, и они горячее. Авторы назвали их "голубыми" SRb-звездами. "Красные" SRb имеют темп потери массы, светимости и начальные массы на ГП, сравнимые с такими же миридами, но их эффективные температуры незначительно выше. Их периоды содержат первый обертоны пульсации.

Углеродные звезды и звезды с технецием найдены только среди "красных" SRb. Практически все циркониевые полуправильные переменные тоже находятся в группе "красных". Кроме того, при аппроксимации инфракрасных спектров чернотельным излучением показано, что только в случае "голубых" кислородных полуправильных переменных возможна интерпретация одним "черным телом", в то время как для остальных групп полуправильных необходимо два [6].

Многие аспекты указывают на то, что полуправильные переменные "перемешаны" со звездами типа Миры Кита. Например, ряд работ по определению зависимости "период-светимость" обнаруживают интересный факт. Беддинг и Зийлстра [47] на основании зависимости в К-полосе, полученной Фистом [48] для мирид и выведенной ими самими для полуправильных, обнаружили следующее. Те SR-звезды, которые имеют основной период и вторичный, на зависимость "период-светимость" для мирид ложатся с основным периодом, а согласно вторичному периоду эти звезды ложатся на полученную ими зави-

симось для полуправильных переменных.

6. *Заключение.* Основные, решаемые в настоящее время, проблемы для полуправильных звезд в целом, те же, что и для звезд типа Миры Кита - построение динамических моделей атмосфер, определение моды пульсации, изучение механизма потери массы, дальнейшая эволюция звезд. Заметные шаги в этом направлении в последние годы сделаны Фадеевым [49], в работах которого значительно развита эволюционная и пульсационная теория звезд асимптотической ветви и ветви красных гигантов, а также других типов пульсирующих переменных, родственных миридам и полуправильным и соседствующим с ними на диаграмме Герцшпрунга-Рессела [50,51]. Остается еще немаловажный вопрос: трансформация правильных колебаний в хаотические и наоборот. Последняя проблема усложняет изучение этих звезд. Но, несмотря на сильные нелинейные эффекты (переключения моды пульсации, изменения амплитуды и формы кривой блеска, асимметричные пылевые оболочки), все методы анализа фотометрического поведения, применяемые для звезд типа Миры, можно применять и к полуправильным переменным. Это еще раз подтверждает то, что существуют объекты, которые по фотометрическому поведению относятся одновременно и к миридам и к полуправильным. Например, Υ Per (углеродная мирида) на большом интервале времени показывает сложные квазипериодические изменения блеска, типичные для SRb объектов, а сверхгигант S Per (звезда типа SRC) на протяжении нескольких циклов показывал регулярные миридоподобные пульсации с периодом около 816 дней [52], а в последнее время снова стал проявлять хаотические изменения блеска.

Перечислим основные направления работы, которые могут помочь в исследовании процессов пульсаций полуправильных переменных звезд и понимании их эволюции:

- создание атласа средних кривых блеска полуправильных переменных звезд, как например "Catalogue of main characteristics of pulsations of 173 semi-regular stars" [53];

- использование для уточнения классификации звезд трех групп фотометрических параметров (фундаментальных - период P , амплитуда $\Delta m = m_{\min} - m_{\max}$, асимметрия $f = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$, степень тригонометрического полинома s ; параметры крутизны ветвей кривой блеска - $m_i = dm(t)/dt$ - максимальный наклон восходящей ветви, $m_d = dm(t)/dt$ - максимальный наклон нисходящей ветви, $t_i = dt/dm$ - характерное время возрастания блеска на 1^m , $t_d = dt/dm$ - характерное время спадания блеска на 1^m , $m_{is} = (dm/dt)_{\text{curve}} / (dm/dt)_{\text{sinus}}$ - для восходящей ветви, m_{ds} - то же самое для нисходящей ветви, где $(dm/dt)_{\text{sinus}} = \pi(m_{\min} - m_{\max})/P$; дополнительные (параметры гармоник) - r_k -

амплитуда гармоник с частотой $k f_1$, φ_k - фаза максимума гармоник относительно фазы максимума блеска, $\varphi_{kl} = \varphi_k - k \varphi_1$ - сдвиг фаз относительно главного колебания блеска [37,54,55];

- анализ фазовых портретов полуправильных переменных, полученных с различными значениями периодов в случае мультипериодичных звезд [14,39];
- пересмотр классификации отдельных объектов и выделение переходной группы (полуправильные - мириды) [56-58] и звезд с "переключением" мод колебаний и мультипериодичностью [59].

Автор выражает свою благодарность за полезные обсуждения авторам международного исследования в рамках проектов "Междолготная астрономия" [60,61], "Украинская виртуальная обсерватория" [9] и "АстроИнформатика" [62].

Одесский национальный морской университет,
Украина, e-mail: kuda2003@ukr.net

REVIEWS

SEMIREGULAR VARIABLE STARS

L.S.KUDASHKINA

The studies of semi-regular variables of stars by different authors are considered, and the main theoretical and observational problems associated with these stars are reviewed. Their evolutionary status and possible connection with long-period variables such as Mira Ceti are discussed. Individual objects belonging to different types of semi-regular variables are described in detail. The studies of the period were carried out for all the considered stars using periodogram and/or wavelet analysis. The study of phase portraits of smoothed light fluctuations was added to the previously developed additional photometric classification criteria. It is also noted that all methods of analysis of photometric behavior used for Mira-type stars can be applied to semi-regular variables. After leaving the main sequence, the stars pass through the region of instability of Cepheids, turning into radially pulsating variables of type δ Cepheus. These stars can be associated with semi-regular variables giants and supergiants of spectral classes F-K, which are usually denoted by the symbol SRd. In the process of further evolution of the variables of high luminosity fall in the region of red supergiants, becoming the type variables SRc (or Lc), and the variables lower luminosity turn into a semiregular variables SRab (or wrong Lb) of late spectral classes. Variables of the RV Tau type are

a class of low-mass (with masses of the order of one solar) pulsating F-K - supergiants ($M_v = -3^m \div 5^m$), which may be at the short-term evolutionary stage of transition from the red giant to the protoplanetary nebula, which explains the small number of stars of this type of variability.

Keywords: *stars:review:pulsating variables:semi-regular:light curves:periodogram analysis:wavelet:asymptotic giant branch*

ЛИТЕРАТУРА

1. П.Н.Холопов, Переменные звезды, **21**, 465, 1981.
2. И.С.Шкловский, Проблемы современной астрофизики, М., Наука, 1988.
3. С.А.Жевакин, Теория звездных пульсаций, в кн.: Пульсирующие звезды, ред. Б.В.Кукаркин, М., 17, 1970.
4. Ю.А.Фадеев, Природа, **8**, 16, 2006.
5. Ю.А.Фадеев, Письма в Астрон. ж., **43**, 763, 2017.
6. Л.С.Кудашкина, Кинем. физ. неб. тел, **19**, 193, 2003.
7. И.Л.Андронов, В.И.Марсакова, Астрофизика, **49**, 433, 2006, (Astrophysics, **49**, 370, 2006).
8. В.И.Марсакова, И.Л.Андронов, Астрофизика, **49**, 595, 2006, (Astrophysics, **49**, 506, 2006).
9. И.Б.Вавилова и др., Кинем. физ. неб. тел, **28**, 59, 2012.
10. P.A.Whitelock, F.Marang, M.Feast, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **319**, 728, 2000.
11. P.Maffei, G.Tosti, <http://www.archiviomaffei.org/All/main.htm>.
12. I.L.Andronov, Odessa Astron. Publ., **7**, 49, 1994.
13. И.Л.Андронов, Кинем. физ. неб. тел, **14**, 490, 1998.
14. L.S.Kudashkina, I.L.Andronov, Odessa Astron. Publ., **30**, 93, 2017.
15. Л.С.Кудашкина, Тезисы 64 профессорско-преподавательской научно-технической конференции, 17-19 мая 2011, ОНМУ, Одесса, 56, 2011.
16. Ю.А.Фадеев, Письма в Астрон. ж., **43**, 663, 2017.
17. I.L.Andronov, ASP Conf. Ser. 292, Ed. C.Sterken, San Francisco: Astron. Soc. Pacif., 391, 2003.
18. И.Л.Андронов, Л.С.Кудашкина, Т.В.Романенко, Переменные звезды, **23**, 23, 1992.
19. Л.С.Кудашкина, И.С.Брюханов, В.В.Шукин, Астрон. Цирк., **1554**, 25, 1993.
20. J.Neumann, BAV-Rund., **3**, 71, 1998.
21. Л.Л.Шаповалова, Мультипериодические колебания полуправильных переменных звезд, дипломная работа, с.114, 1998.
22. M.W.Feast, Proc. Fifth Europ. Peg. Meet., P.B.1.1., 1980.

23. Г.В.Абрамян, *Астрофизика*, **20**, 239, 1984, (*Astrophysics*, **20**, 126, 1984).
24. L.S.Kudashkina, *Odessa Astron. Publ.*, **25**, 18, 2012.
25. H.Izumiura, O.Hashimoto, K.Kawara *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **315**, L221, 1996.
26. C.Barnbaum, *Astron. J.*, **104**, 1585, 1992.
27. K.Krisciunas, *Journal of the American Association of Variable Star Observers*, **10**, 75, 1981.
28. M.Vetesnik, *Information Bulletin on Variable Stars*, 2271, 1983.
29. A.Kučinskas, *Bulletin AFOEV*, **61**, 17, 1992.
30. L.S.Kudashkina, I.L.Andronov, *Odessa Astron. Publ.*, **23**, 67, 2010.
31. I.L.Andronov, L.S.Kudashkina, *Astron. Nachr.*, **309**, 323, 1988.
32. W.Wenzel, *Mitt. Ver. Stern.*, **8**, 18, 1977.
33. И.Л.Андронов, Л.С.Кудашкина, Е.В.Величко и др., *Переменные звезды*, **22**, 683, 1988.
34. I.L.Andronov, L.S.Kudashkina, *Arbeitskreis Veranderlicheim Kulturbund der DDR, Information N.*, **121**, 3, 1987.
35. I.L.Andronov, *Contr. Astron. Inst. Czechoslovak.*, **20**, 161, 1987.
36. L.S.Kudashkina *et al.*, *Proc. 29th Conf. Var. Star. Res., Brno, Czech Rep.*, 126, 1998.
37. L.S.Kudashkina, *Częstochowski Kalendarz Astronomiczny*, 2017, ed. B.Wszolek, 151, 2016.
38. И.Л.Андронов, И.В.Чернышева, *Астрон. Цирк.*, **1538**, 18, 1989.
39. L.S.Kudashkina, I.L.Andronov, *Częstochowski Kalendarz Astronomiczny*, 2018, ed. B.Wszolek, 275, 2017.
40. I.L.Andronov, L.S.Kudashkina, L.V.Grenishena, *Częstochowski Kalendarz Astronomiczny*, 2013, ed. B.Wszolek, 197, 2013.
41. Ю.А.Фадеев, *Письма в Астрон. ж.*, **42**, 731, 2016.
42. Б.В.Кукаркин, *Пульсирующие звезды*, М., Наука, с.372, 1970.
43. К.Гоффмейстер, Г.Рихтер, В.Венцель, *Переменные звезды*, М., Наука, с.360, 1990.
44. Н.Н.Самусь, Е.В.Казаровец, О.В.Дурлевич и др., *Астрон. ж.*, **94**, 87, 2017.
45. F.Kerschbaum, J.Hron, *Astron. Astrophys.*, **263**, 97, 1992.
46. F.Kerschbaum, J.Hron, *Astron. Astrophys.*, **308**, 489, 1996.
47. T.R.Bedding, A.A.Zijlstra, *Astrophys. J.*, **506**, L47, 1998.
48. M.W.Feast, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **278**, 11, 1996.
49. Ю.А.Фадеев, *Письма в Астрон. ж.*, **38**, 295, 2012.
50. Ю.А.Фадеев, *Письма в Астрон. ж.*, **39**, 342, 2013.
51. Ю.А.Фадеев, *Письма в Астрон. ж.*, **44**, 851, 2018.
52. V.I.Marsakova, I.L.Andronov, *Proc. 29th Conf. Var. Star. Res., Brno, Czech Rep.*, 130, 1998.
53. L.L.Chinarova, I.L.Andronov, *Odessa Astron. Publ.*, **13**, 116, 2000.
54. L.S.Kudashkina, I.L.Andronov, *Odessa Astron. Publ.*, **9**, 108, 1996.
55. L.S.Kudashkina, I.L.Andronov, *Odessa Astron. Publ.*, **23**, 65, 2010.
56. V.I.Marsakova, I.L.Andronov, *Odessa Astron. Publ.*, **12**, 205, 1999.

57. *Л.С.Кудашкина*, Вісник ОДУ, **4**, 55, 1999.
58. *V.I.Marsakova, I.L.Andronov*, Odessa Astron. Publ., **25**, 60, 2012.
59. *I.L.Andronov, L.L.Chinarova*, Częstochowski Kalendarz Astronomiczny, 2014, ed. B.Wszolek, **X**, 171, 2013.
60. *I.L.Andronov et al.*, ASP Conference Series, **511**, San Francisco: Astron. Soc. Pacif., 43, 2017.
61. *I.L.Andronov, V.I.Marsakova, L.S.Kudashkina et al.*, Advances in Astron. Space Phys., **4**, 3, 2014.
62. *I.B.Vavilova et al.*, Astrodynamics, Proc. IAU Symposium, **325**, 361, 2017.