

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ЗВЕЗД. III. ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГОРБОВ НА ВОСХОДЯЩЕЙ ВЕТВИ

В.И.МАРСАКОВА¹, И.Л.АНДРОНОВ^{1,2}

Поступила 15 апреля 2006

Принята к печати 20 октября 2006

Рассмотрены свойства такого феномена, как возникновение горбов на восходящей ветви или двойных максимумов на кривой блеска у долгопериодических пульсирующих звезд. Получены характеристики горбов и средних кривых блеска для группы мирид и полуправильных (SRa) переменных. Обсуждаются корреляции между параметрами кривых блеска и характеристиками горбов у этих звезд. Проведено сравнение полученных результатов с теоретическим моделированием из литературных источников.

Ключевые слова: *звезды: долгопериодические переменные: кривые блеска*

1. *Введение.* Как известно, кривые блеска у долгопериодических пульсирующих звезд сильно изменчивы от цикла к циклу. У многих из них присутствует горб на восходящей ветви, однако, чаще всего, он появляется далеко не в каждом цикле. Здесь мы обсуждаем только те звезды, у которых горб присутствует более, чем в 10 % циклов.

Кудашкина и Рудницкий [1] связывают возникновение горбов на восходящей ветви с прохождением ударной волны в атмосфере мириды. В их 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.

Винтерс и др. [2] связывают долговременные изменения кривой блеска, в том числе появление на ней горбов и двойных максимумов, с взаимодействием пульсационных движений внутри звезды и колебаний, возникающих в околосредных пылевых оболочках, в особенности у углеродных долгопериодических переменных.

Нами были использованы наблюдения из баз данных Ассоциации Французских Наблюдателей Переменных Звезд AFOEV [3] и Японской Лиги Наблюдателей Переменных звезд VSOLJ [4]. Они охватывают

переменность в интервале до 80 лет, начиная с 1921 года. Подробное описание методики обработки наблюдений приведено в статье данного цикла "I. Методы анализа наблюдений" [5].

Общие результаты анализа корреляций между параметрами индивидуальных циклов пульсаций долгопериодических переменных представлены в статье данного цикла "II. Дополнительные параметры классификации звезд" [6]. Здесь мы обсуждаем те корреляции, которые связаны с параметрами горбов на восходящей ветви.

2. *Анализ параметров горбов на восходящей ветви.* Мы проанализировали 17 звезд (в это количество входят, в основном, мириды и две полуправильные: RS Cyg и S Cam). Звезды имеют различные величины периодов, амплитуд и асимметрий. Эти характеристики (вычисленные по средней фазовой кривой) приведены в табл. 1 (*P*, *As*, *Am*). Также в таблице приведены спектральный класс и количество наблюдений, использованных для анализа по каждой звезде *N*.

Таблица 1

СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИВЫХ БЛЕСКА ДЛЯ 17 ЗВЕЗД

Звезда	Спектральный класс	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>As</i>	<i>Am</i>
I					
U CMi	M4e	1733	411.3	0.576	3.92
T Cas	M6e-M9e	8907	444.7	0.560	3.74
S UMa	S0e-S9e	15178	226.1	0.506	3.37
T Cam	S4,7e-S8,5e (C3,9e-C6,4e)	5702	374.1	0.476	4.51
S Cep	C7,4e	4512	487.4	0.552	2.28
R Aur	M6,5e-M9,5e	7015	457.1	0.534	5.55
T Cep	M5,5e-M8,8e	20297	338.4	0.478	2.93
U UMi	M6e-M8e	8745	326.3	0.540	2.38
S Cam	C7e	4920	327.2	0.590	1.69
RS Cyg	C8,2e	8622	418.7	0.600	1.17
II					
U Her	M6,5e-M9,5e	5255	406.3	0.440	4.65
R Cas	M6e-M10e	10652	430.5	0.383	5.59
V Cas	M5e-M8,5e	9380	228.9	0.523	3.33
X Aur	M3e-M7e	7060	164.1	0.498	2.98
S UMi	M6e-M9e	9158	328.1	0.505	3.55
X Cyg	S6,2e-S10,4e	22358	408.9	0.447	7.75
R Lyn	S2,5e-S6,8e	3315	378.6	0.441	5.53

В табл.2 приведены средние характеристики горбов для каждой из звезд: N_g/N_m - отношение (наблюдаемого) числа горбов к (наблюдаемому) числу максимумов, δt и δm - продолжительности горба по

времени и звездной величине (амплитуда горба), а также их отношения к периоду и амплитуде, ϕ - (средняя) фаза горба.

Таблица 2

СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРБОВ НА ВОСХОДЯЩЕЙ
ВЕТВИ ДЛЯ 17 ЗВЕЗД

Звезда	N_h/N_m	δt	$\delta t/P$	δm	$\delta m/A$	ϕ
I						
U CMi	1.00	41	0.100	0.12	0.031	-0.25
T Cas	1.81	40	0.090	0.39	0.104	-0.24
S UMa	0.70	14	0.062	0.26	0.077	-0.21
T Cam	0.68	25	0.067	0.27	0.060	-0.16
S Cep	0.57	38	0.078	0.32	0.140	-0.27
R Aur	0.45	30	0.066	0.52	0.094	-0.25
T Cep	0.41	24	0.071	0.51	0.174	-0.02
U UMi	0.51	19	0.058	0.41	0.017	-0.24
S Cam	0.32	28	0.086	0.29	0.172	-0.18
RS Cyg	0.56	51	0.122	0.43	0.368	-0.20
II						
U Her	0.33	21	0.051	0.16	0.034	-0.28
R Cas	0.24	18	0.042	0.47	0.084	-0.19
V Cas	0.19	9	0.039	0.32	0.096	-0.21
X Aur	0.18	12	0.073	0.43	0.144	-0.07
S UMi	0.15	19	0.058	0.22	0.006	-0.02
X Cyg	0.29	14	0.034	0.61	0.079	-0.20
R Lyn	0.33	12	0.032	0.35	0.063	-0.01

Данные характеристики были получены по оригинальным кривым, построенным по наблюдениям, поскольку малая амплитуда горбов и зашумленность остальных участков кривых не позволяли провести сглаживание, позволяющее корректно определять характеристики горбов на восходящей ветви. Наш анализ показывает, что, несмотря на наличие волн и ступенек на разных участках кривой блеска в некоторых циклах, горб на восходящей ветви появляется с достаточным постоянством в определенном диапазоне фаз (только у отдельных звезд наблюдается систематическое смещение горба по фазе, что происходит одновременно с циклическими изменениями периода и амплитуды [7]), что позволяет исследовать этот феномен отдельно.

Все исследуемые звезды могут быть условно разделены на два типа (см. рис.1): Тип I - звезды, которые имеют большие горбы, временами становящиеся вторичными максимумами. Относительное количество горбов N_h/N_m для них, как правило, более 0.3. Тип II - звезды с малыми горбами или ступеньками и для них $N_h/N_m \leq 0.3$.

U Her -промежуточный вариант с относительно большим числом

маленьких горбов. X Aur и S Cam имеют небольшое количество сильных горбов, которые часто выглядят как двойные максимумы.

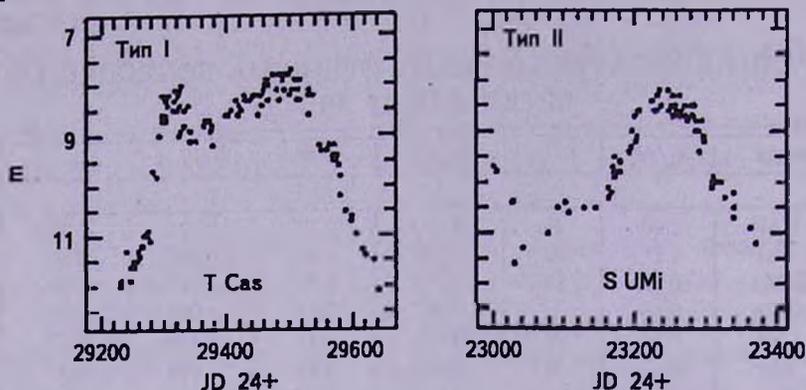


Рис.1. Два типа горбов на восходящей ветви.

Как видно из табл.1, в первой группе встречаются переменные всех трех спектральных классов, характерных для долгопериодических переменных, в то время, как в группу типа II не входят звезды спектрального класса C. Это связано с сильной изменчивостью и зашумленностью кривой блеска у переменных спектрального класса C (см. [8] и [6], где обсуждаются свойства углеродных долгопериодических пульсирующих звезд), которая не позволяет выделить маленькие горбы на восходящей ветви.

Корреляции горбов с другими характеристиками индивидуальных циклов достаточно неоднозначны (не у всех звезд встречаются одинаковые корреляции).

Например, относительно часто встречающаяся корреляция между фазой горба и асимметрией у разных звезд имеет различные знаки, хотя отрицательные корреляции имеют небольшие отношения $|\rho|/\sigma_\rho$. Также, у некоторых звезд, встречаются корреляции звездной величины горба с

Таблица 3

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ И ГОРБОВ НА ВОСХОДЯЩЕЙ ВЕТВИ

	Параметр	Параметр	$\langle \rho \rangle \times$ 100	$N_{3\sigma}^-$	$N_{3\sigma}^+$	$\rho_{min} \times$ 100	$\rho_{max} \times$ 100
ρ_1	фаза горба	асимметрия	0.77	2	4	-0.87	0.75
ρ_2	звездная величина горба	блеск в текущем максимуме	0.68	0	6	0.55	0.78
ρ_3	звездная величина горба	блеск в предыдущем минимуме	0.66	0	4	0.58	0.76

асимметрией. Возможно, неуверенность этих результатов связана с тем, что асимметрия вычисляется не во всех циклах, когда количество данных невелико (должны присутствовать оба соседних минимума); горбы также встречаются не во всех циклах, и это уменьшает количество параметров, используемых для вычисления коэффициента корреляции.

В табл.3 приведены наиболее часто встречающиеся корреляции между параметрами индивидуальных циклов и горбов на восходящей ветви. Приведены средние коэффициенты корреляции $|\rho|$ по звездам, у которых $|\rho|/\sigma_\rho > 3$. Указано количество положительных и отрицательных коэффициентов корреляции ($N_{3\sigma}^-$, $N_{3\sigma}^+$), а также их минимальные и максимальные значения.

В табл.4-6 приведены значения этих коэффициентов корреляции для отдельных звезд, у которых $|\rho|/\sigma_\rho > 3$.

Корреляции звездной величины горба со звездными величинами максимума или минимума также различны у различных звезд: часть звезд показывает только первую из них, часть - только вторую, а звезды S Cep и RS Cyg - обе эти корреляции (табл.5-6).

Большинство звезд, показывающих эти корреляции, принадлежит к типу I. Возможно, это связано с большим количеством пар данных

Таблица 4

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ФАЗОЙ ГОРБА И АСИММЕТРИЕЙ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ КРИВОЙ БЛЕСКА

Звезда	ρ_1	$ \rho /\sigma_\rho$
S Cep	0.66	3.6
S UMi	-0.80	3.5
U CMi	-0.87	3.1
R Aur	0.93	6.2
U UMi	0.75	5.4
S Cam	0.75	4.2

Таблица 5

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ЗВЕЗДНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ГОРБА И ЗВЕЗДНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ МАКСИМУМА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ КРИВОЙ БЛЕСКА.

Звезда	ρ_2	$ \rho /\sigma_\rho$
x Cyg	0.78	5.3
R Lyn	0.66	3.4
S Cam	0.65	3.3
RS Cyg	0.70	5.4
S Cep	0.55	3.1
U Her	0.74	3.7

Таблица 6

**КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ЗВЕЗДНОЙ
ВЕЛИЧИНОЙ ГОРБА И ЗВЕЗДНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ МИНИМУМА
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ КРИВОЙ БЛЕСКА**

Звезда	ρ_z	$ \rho /\sigma_p$
T Cep	0.76	7.8
S Cep	0.65	3.9
T Cas	0.69	5.3
RS Cyg	0.58	3.7

для корреляционного анализа, так как горбов у этих звезд больше.

Нами также был проведен корреляционный анализ средних характеристик, приведенных в таблицах 1 и 2. Значимые корреляции приведены в табл.7.

Таблица 7

**КОРРЕЛЯЦИИ СРЕДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРБОВ С
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СРЕДНИХ КРИВЫХ БЛЕСКА**

Параметр	Параметр	ρ	$ \rho /\sigma_p$
dt/P	As	0.80	5.2
dt/P	Am	-0.66	3.4
$N_{\text{горба}}/N_{\text{мин}}$	As	0.48	3.8

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Параметры горбов связаны с асимметрией кривой. Особенно хорошо коррелирует с асимметрией средняя относительная продолжительность горба. Этот результат находится в хорошем согласии с работой [1]. В среднем, количество горбов возрастает у звезд с более асимметричными кривыми.

2. У малоамплитудных звезд горбы продолжительнее. Причем эта

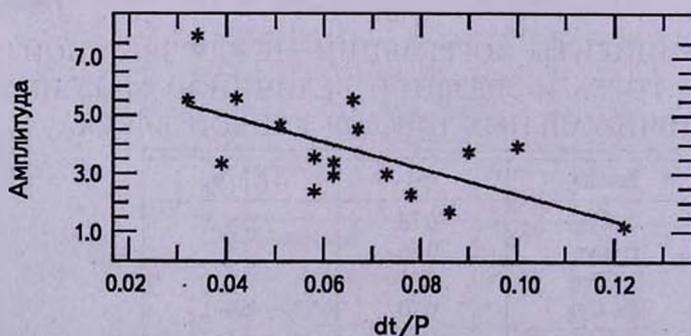


Рис.2 Зависимость между относительной продолжительностью горба и амплитудой переменной звезды.

корреляция наблюдается по всей выборке звезд. Как видно из рис.2, из этой зависимости не выделяются звезды различных спектральных классов (M-C-S), а также те звезды, которые были ранее классифицированы как полуправильные.

Авторы благодарят Л.С.Кудашкину за плодотворное обсуждение данной работы, а также выражают свою благодарность за полезное обсуждение В.П.Гринину и рецензенту.

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

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

INVESTIGATION OF VARIABILITY OF LONG PERIOD PULSATING STARS. III. CHANGES OF PARAMETERS OF HUMPS ON ASCENDING BRANCH

V.I.MARSAKOVA¹, I.L.ANDRONOV^{1,2}

The properties of the such phenomena as appearance of humps at the ascending branch or double maxima at the light curves of long period variables are examined. The characteristics of humps and the mean light curves are obtained for the group of Miras and semiregular (SRA) variables. Correlations between the parameters of the mean light curves and the characteristics of humps of these stars are discussed. Obtained results are compared to theoretical modeling from the literature sources.

Key words: *stars: long period variables: light curves*

ЛИТЕРАТУРА

1. L.S.Kudashkina, G.M.Rudnitskij, Odessa Astron. Publ., 7, 63, 1995.
2. J.M.Winters, A.J.Fleischer, A.Gauger, E.Sedlmayr, Astron. Astrophys, 290, 623, 1994.
3. E.Schweitzer, <http://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/afoev/>.
4. D.Nogami, <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/vsnet/>.
5. И.Л.Андронов, В.И.Марсакова, Астрофизика, 49, 433, 2006.
6. В.И.Марсакова, И.Л.Андронов, Астрофизика, 49, 595, 2006.
7. V.I.Marsakova, I.L.Andronov, Astron. Soc. Pacif. Conference Series, 203, 131, 2000.
8. V.I.Marsakova, I.L.Andronov, Odessa Astronomical Publications, 12, 205, 1999.