

УДК 524.387-54

Г. Н. Дремова, М. А. Свечников

Уральский государственный университет им. А. М. Горького
620000, Россия, Екатеринбург, пр. Ленина 51
g.n.dryomova@mail.ru

Расчет констант приливной эволюции разделенных тесных двойных систем

Константы тормозных моментов были рассчитаны для каждого компонента 112 разделенных тесных двойных систем (ТДС) из каталога Свечникова, Перевозкиной, 1999 на базе эволюционных моделей-треков Кларэ (2004), впервые предоставляющих константы для изучения приливных эффектов в ТДС. Использовалась построенная на идее оптимальной нелинейной интерполяции методика обращения сетки модельных треков в сетку изохрон с произвольно малым временным шагом. Это условие гарантировало применение линейной интерполяционной процедуры для однозначного восстановления возраста ТДС и соответствующего этому моменту времени индивидуального для данной ТДС набора констант приливной эволюции. Теоретические значения периода апсидального движения, вычисленные по индивидуально рассчитанным для каждой ТДС константам внутреннего строения, хорошо согласуются с наблюдениями, что подтверждает надежность эволюционных моделей Кларэ и предлагаемого численного алгоритма.

РОЗРАХУНОК КОНСТАНТ ПРИПЛИВНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ РОЗДІЛЕНИХ ТІСНИХ ПОДВІЙНИХ СИСТЕМ, Дремова Г. Н., Свечников М. А. — Константи тормозних моментів було розраховано для кожного компонента 112 розділених тісних подвійних систем (ТПС) із каталогу Свечнікова, Перевозкіної (1999) на базі еволюційних моделей-треків Кларе (2004), що вперше надають константи для вивчення приливних ефектів у ТПС. Використовувалась побудована на ідеї оптимальної нелінійної інтерполяції методика перетворення сітки модельних треків у сітку ізохрон с довільно малим часовим кроком. Ця умова гарантувала застосування лінійної інтерполяційної процедури

для однозначного відтворення віку ТПС і відповідного цьому моменту часу індивідуального для даної ТПС набору констант приливної еволюції. Теоретичні значення періоду апсидального руху, обчислені за індивідуально розрахованими для кожної ТПС константами внутрішньої будови, добре узгоджуються із спостереженнями, що свідчить про надійність еволюційних моделей Кларе і запропонованого числового алгоритму.

CALCULATION OF TIDAL EVOLUTION CONSTANTS FOR CLOSE BINARY SYSTEMS, by Dryomova G. N., Svechnikov M. A. — We calculated the tidal torque constants for the components of 112 close eclipsing binaries of the DMS-type (detached components located within the main sequence) from the catalogue developed by Svechnikov and Perevozkina (1999) on the basis of the evolutionary model-tracks proposed by Claret (2004), that include for the first time the tidal-evolution constants to study tidal effects in close binaries. The method of conversion of the grid of model-tracks into isochrones with an arbitrary small time-step using optimal non-linear interpolation was applied. The small time-step criterion guaranteed the application of the linear interpolation for age estimation of the DMS components and the individual tidal-evolution constant set corresponding to the estimated time for the considered close eclipsing binary. The theoretical values of the apsidal-motion period which were calculated from the internal structure constants computed for the components of each close binary agree well with the observational values. This confirms the reliability of evolutionary stellar models developed by Claret and the numerical algorithm proposed here.

КОНСТАНТЫ ПРИЛИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Компоненты в тесных двойных системах (ТДС) испытывают взаимную приливно-вращательную деформацию, которая отвечает за перераспределение углового момента между вращением звезд и их орбитальным движением и приводит к торможению и к искажению классических кеплеровских орбит компонентов. Наблюдательно это проявляется во вращении главной оси орбитального эллипса (линии апсид) со скоростью, зависящей от распределения плотности (ρ) в компонентах, в наличии сдвига распределений поверхностной яркости компонентов друг относительно друга, что в вековой эволюции ТДС приводит к двум важным эффектам: синхронизации и циркуляризации орбиты.

Развитая за последние 80 лет на базе ньютоновской механики динамическая теория апсидального движения [22, 31, 66, 67, 82, 107, 117] совместно с анализом диссипативной природы приливных осцилляций, которой был посвящен цикл работ [143—148], в которых фа-

зовый сдвиг прилива имитировался различными механизмами затухания, позволяют количественно учесть приливные эффекты. Вычислительная процедура оперирует набором констант, характеризующих распределение плотности (ρ) и механизмы затухания ответных осцилляций звезды. Этими константами для каждого компонента ТДС являются глубина x_{bf} конвективной оболочки, радиус гирации r_g , характеристика E политропной структуры конвективной оболочки, константы второго порядка, характеризующие тормозные моменты вследствие лучистого затухания ($\lg E_2$) и вследствие турбулентной вязкости в конвективных средах (η), а также параметры апсидального движения второго порядка k_{21} и k_{22} для главного и вторичного компонентов соответственно. Именно второй порядок указанных констант дает максимальный вклад в апсидальное движение и создание тормозных моментов. Это обстоятельство позволяет упростить теоретические выкладки. Например, соотношение для оценки периода апсидального движения приобретает простой вид:

$$P / U_{cl} = c_1 k_{21} + c_2 k_{22}, \quad (1)$$

где P — аномалистический орбитальный период, U_{cl} — период вращения линии апсид из-за вращательно-приливной деформации. Коэффициенты c_1 и c_2 — константы известных из спектроскопических и фотометрических наблюдений физических характеристик и элементов орбиты:

$$c_i = \frac{R_i}{A} \left(\frac{M_{3i}}{M_i} \right)^5 15 f(e) \left(\frac{w_{ax,i}}{w_{orb}} \right)^2 + \frac{M_{3i}}{M_i} g(e), \quad (2)$$

$$f(e) = 1 - \frac{3}{2}e^2 + \frac{1}{2}e^4 - (1 - e^2)^5, \quad (3)$$

$$g(e) = (1 - e^2)^2, \quad (4)$$

где i — номер компонента, M — масса, R — радиус, $w_{ax,i}$ — угловые скорости осевого вращения компонентов, w_{orb} — средняя угловая скорость орбитального обращения, e — эксцентриситет, A — большая полуось орбиты. Эти формулы справедливы в предположении, что векторы осевого и орбитального вращения параллельны.

Оценка периода апсидального движения для ТДС с разделенными компонентами, доступными из каталога орбитальных элементов, масс и светимостей переменных звезд РГП-типа М. А. Свечникова, Е. Л. Перевозкиной [120] и сравнение ее с наблюдательной оценкой, представляет основной тест корректности предлагаемой в нашей работе численной схемы для определения констант приливной эволюции. Следует отметить, что в соответствии с принятой классификацией затменно-переменных звезд [119] РГП-класс представляет разделенные системы главной последовательности (ГП), компоненты ко-

торых почти не заполняют свои полости Роша и считаются разделенными, занимая положение на диаграмме Герцшпрунга — Рассела в пределах полосы ГП.

Известно, что апсидальное движение в эксцентричных ТДС происходит не только вследствие вращения компонентов и взаимного влияния неоднородного гравитационного поля компаньона. Также имеет место релятивистский эффект апсидального движения, порождаемый искривлением пространства и не связанный с конечными размерами звезд. В рамках ОТО релятивистский эффект апсидального движения определяется согласно [88, 89]

$$P/U_{rel} = 6.37 \cdot 10^{-6} (M_1 + M_2) A^{-1} (1 - e^2)^{-1} \quad (5)$$

и суммируется к классическому эффекту в случае ТДС (трояственность системы усложняет характер учета релятивистской поправки):

$$U_A^{-1} = U_{cl}^{-1} + U_{rel}^{-1}. \quad (6)$$

Сравнение теоретически оцененного (U_A) и полученного из наблюдений (U_{obs}) значений периода апсидального движения для эксцентричной ТДС также является важным тестом для теоретических эволюционных моделей в вопросе о правильности выбранного распределения плотности компонентов ($\rho(r)$).

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ КОНСТАНТ ПРИЛИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Вычислительный алгоритм представляет собой шестиуровневую интерполяционную процедуру, привязанную к сетке эволюционных теоретических звездных моделей Кларэ [25], включающих информацию о константах внутреннего строения $\lg k_2, \lg k_3, \lg k_4$, глубине конвективной оболочке x_{bf} , радиусе гирации r_g , характеристике политропной структуры E конвективной оболочки, константе тормозного момента вследствие лучистого затухания $\lg E_2$. Эти константы затабулированы как функции времени, выведенного вдоль треков, соответствующих широкому по начальной массе $M_{mod} = (0.8...125)M_\odot$ диапазону моделей-звезд. Поэтому задача определения шкалы приливной эволюции требовала предварительного вычисления возраста ТДС по методу изохрон, построенному по исходным модельным трекам.

Первый уровень интерполяционной схемы — описание каждого табличного эволюционного трека индивидуальным набором кусочно-гладких функций $M = M(t), R = R(t), \lg k_2(t), x_{bf}(t), \rho(t), E(t), \lg E_2(t)$, соответствующих конкретной эволюционной фазе (горение водорода в ядре, сжатие центральной части звезды, включение слоевого источника и т. д.). Это процедура необходима, чтобы предусмотреть нелинейную интерполяцию только между однотипными ветвями треков, соответствующих одной и той же эволюционной фазе.

Второй уровень схемы — равномерное по времени разбиение эволюционных треков (включая каждую из семи приведенных выше интерполяционных функций) внутри каждой фазы как мера предупреждения возможной немонотонности, возникающей при нелинейной интерполяции.

Третий уровень — детализация исходной сетки треков, что эквивалентно построению дополнительных эволюционных треков, число которых при проведении этой процедуры увеличилось с 25 до 19680. Дополнительно построенные треки описываются полным набором интерполяционных функций $M(t)$, $R(t)$, $\lg k_2(t)$, $x_{bf}(t)$, (t) , $E(t)$, $\lg E_2(t)$, полученных путем нелинейной интерполяции между табличными исходными треками с шагом по массе $0.0025M_\odot$.

Четвертый уровень — процедура обращения сетки треков в сетку изохрон, представляющих собой семейство кривых $M = M(R)$, параметризованных по времени $t = \text{const}$. Рассчитанная сетка изохрон охватывает широкий диапазон изменения времени [$t_{\text{НГП}} - t_{\text{Hubble}}$], и каждая изохрона описана собственным набором нелинейных интерполяционных функций вида $\lg k_2(M_{\text{mod}}, t)$, $x_{bf}(M_{\text{mod}}, t)$, (M_{mod}, t) , $E(M_{\text{mod}}, t)$, $\lg E_2(M_{\text{mod}}, t)$.

Пятый уровень — вычисление возрастов компонентов t_1, t_2 ТДС из каталога [120] методом линейной интерполяции, которую правомерно использовать на подробной сетке изохрон. Результаты представлены в табл. 1 (графы 2 и 3).

Шестой уровень интерполяционной схемы — определение индивидуального набора констант приливной эволюции (табл. 2) для каждого компонента ТДС линейным интерполированием соответствующих этим константам функций на возраст компонентов.

ЗАВИСИМОСТИ « $\gamma_2 - M$ » И « $E_2 - M$ »

Эволюция интегрального (равновесный плюс динамический) прилива всецело определяется структурой звезды, которая в зависимости от типа оболочки звезды запускает разные механизмы диссипации. Расчеты Зана [143, 145], выполненные в рамках неадиабитического анализа невращающихся звезд, показали, что для звезд ранних спектральных классов таким эффективным механизмом затухания является лучистое охлаждение, временная шкала которого сопоставима с периодом приливной волны. Диссипативная роль турбулентной вязкости в значительной мере повышается при рассмотрении эволюции маломассивных ТДС. Этот механизм диссипации дает основной вклад в создание тормозных моментов γ_2 , эффективно гасящих равновесную составляющую прилива. Количественная оценка констант тормозных моментов E_2 и γ_2 позволяет объяснить некоторые динамические свойства ТДС, в частности их малые эксцентриситеты и наблюдаемые времена синхронизации компонентов.

Таблица 1. Временные шкалы ядерной эволюции компонентов ТДС (возрасты t_1 и t_2), вычисленные в рамках моделей Кларэ, 2004 [25]. Сравнение теоретического U_A и наблюдательного U_{obs} значений периода апсидального движения; e — эксцентриситет орбиты ТДС

Название ТДС	t_1 , млн лет	t_2 , млн лет	e	U_{obs} , лет	U_A , лет	Примечания
1 AN And	1370±83	8360±880	0.04		3.9	[45, 142]
2 BW Aqr	2290±126	2650±152	0.17	7400±400	8408	[28]
3 V805 Aql	500±16	668±2.5	0?			мало наблюдений II Min [96, 104]
4 Aql	26.9±1.74	29.6±0.69	0.043		24.5	[90]
5 V539 Ara	39.1±0.83	47.4±1.14	0.053	150±15	141	[27]
6 WW Aur	390±3	670±18	0			[113]
7 AR Aur	до НГП	84.7±9.1	0.019		3570	третий компонент [90, 92]
8 EO Aur	15.6±0.67	42.9±2.84	0.05		71	[110]
9 HS Aur	13020±230	9070±390	0			[105]
10 Aur	490±20	515±20	0?			оба компонента синхронизованы [93]
11 ZZ Boo	1300±60	1230±56	0?			[98]
12 AD Boo	2360±138	3790±366	0			компоненты почти синхронизованы [71]
13 SZ Ca m	8.46±0.16	9.55±0.1	0			квадрупольная [78]
14 TU Cam	65.4±4.3	224±29	0.035		84	[150]
15 AN Cam	3410±370	2200±313	0.465		80800	[56]
16 AS Cam	104±0.8	101±2.7	0.17	2400±970	810±110 870 2250±200	[62] класс-релятив. несимм. теор. грав. [80] оба компонента синхронизованы [70]
17 CW CMa	290±2	290±7				[103]
18 GZ CMa	550±14	600±18	0?			[6]
19 EM Car	4.65±0.045	4.66±0.038	0.012	42±6	32.1	[12]
20 QX Car	7.50±0.16	8.40±0.16	0.278	354±4	341	[69]
21 YZ Cas	475±10	595±84	0.003?		3200	[50]
22 CC Cas	7.24±0.14	13.9±0.16	0			[51]
23 AR Cas	25.7±0.87	82.8±11.8	0.205	1938±207 ($e=0.24$) 1100±160 ($e=0.21$) 94±2	1550	[68]
24 PV Cas	153±2.2	153±2.6	0.033		71	[17]
25 V649 Cas	до НГП	275±12	0?			WD- третий компонент?[85]
26 SZ Cen	760±21	720±35	0.03?		230	[5]
27 V346 Cen	14.2±0.68	11.0±0.18	0.288	321±16	318	[41]
28 WX Cep	540±21	515±21	0?			оба компонента синхронизованы [101]
29 ZZ Cep	92.0±4.85	980±66	0			[59]
30 AH Cep	3.28±0.04	4.20±0.014	0			квадрупольная [24]
31 CW Cep	6.47±0.045	6.45±0.045	0.029	45.6±0.4	40	[118]
32 EI Cep	1420±94	1650±102	0.0064		40.3	компоненты не синхронизованы [124]
33 EK Cep	до НГП	5750±506	0.109	4330±720	3760	[26, 122]
34 NY Cep	10.5±0.33	17.1±0.6	0.48	1300±800	4730	[1, 53]
35 TV Cet	1260±101	1180±146	0.0545	30000±8000	32500	[135]
36 XY Cet	1040±31	820±20	0			сдвиг Min II [115]
37 RS Cha	835±31	1060±41	0?			[74]
38 RZ Cha	2390±128	2480±120	0.018		190	[13]
39 TY CrA	до НГП	1090±95	0.003		1090	квадрупольная, не синхронна [21, 23]
40 CrB	415±25	6810±524	0.371	46000±8000 60000	64400	[132] [123]
41 Y Cyg	2.25±0.075	2.70±0.08	0.146	47.8±0.2	39.6	[52]
42 MR Cyg	95.0±3.75	490±23	0			[77]
43 MY Cyg	1000±40	1020±40	0.0048		1900	[104]
44 V380 Cyg	20.3±0.92	23.5±1.24	0.234	1490±120	646	[48]
45 V442 Cyg	1755±77	1925±134	0?			[72]
46 V453 Cyg	11.0±0.19	10.2±0.18	0.022	66.4±1.8	69.0	[112]
47 V477 Cyg	до НГП	до НГП	0.307	350±10	—	[43]
48 V478 Cyg	6.33±0.07	6.62±0.10	0.019	26.3±2.7	20.3	[91, 138]
49 V1143 Cyg	550±48	790±134	0.54	10230±4630	7770	[179]
50 V1765 Cyg	6.4±0.3	9.4±0.3	0.335	25860?	812	[84]
51 UZ Dra	285±72	до НГП	0?			[73]
52 BH Dra	310±1	8850±1100	0.1		99.8	[44]
53 BS Dra	1270±120	1100±108	<10 ⁻⁴		2340	[104]

РАСЧЕТ КОНСТАНТ ПРИЛИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Окончание табл. 1

Название ТДС	t_1 , млн лет	t_2 , млн лет	e	U_{obs} , лет	U_A , лет	Примечания
54 CM Dra	—	—	0.005		—	[86]
55 DE Dra	220±20	4320±1275	0.018		4785	[54]
56 CW Eri	1590±98	2510±322	0			[98]
57 YY Gem	—	—	0			[57]
58 RX Her	220±7	245±4.5	0.022		75.5	[34]
59 TX Her	400±39	510±33	0			оба компонента
60 DI Her	0.61±1.37	до НГП	0.489	34600±3060 55400±16600	8630 52200	синхронизованы [2, 127] класс.+релятив. [47, 79] несимм. теор. грав [80]
61 HS Her	11.3±2.22	126±126	0.0205	89±5.1	74.25	[20, 61]
62 V624 Her	645±29	870±27	0?			[99]
63 V819 Her	1560±278	5640±830	0			третий компонент [128]
64 V822 Her	140±2.7	120±2.6	0.009		16.3	[55]
65 VZ Hya	2930±256	3150±416				третий компонент [114]
66 AI Hya	940±23	946±37	0.23	12400±7800	4512	[63]
67 HS Hya	150±75	790±122	0			третий компонент [125]
68 KM Hya	630±12	285±31	0.095		17950	[16]
69 ² Hya	190±10	153±1.3	0			[30]
70 CM Lac	до НГП	271±7				третий компонент? [94]
71 CO Lac	28.9±1.6	22.8±3.8	0.03	43.4±0.1	28.6	[131]
72 EN Lac	17.5±0.91	416±223	0.054		16260	[76]
73 TX Leo	390±41	10500±1960	0.06		17	[116]
74 GG Lup	до НГП	до НГП	0.15	102±4	—	[7, 140]
75 RR Lyn	995±52	1740±133	0.078	28100±1400	27250	третий компонент [60]
76 FL Lyr	2275±220	6730±572	0			[105]
77 V478 Lyr	10050±540	—	0			[38]
78 TZ Men	146.7±0.4	до НГП	0.035	25000	22280	[11]
79 UX Men	2610±228	2765±274	0			оба компонента
80 RU Mon	64.0±2.2	41.6±1.7	0.396	347±17	360	синхронизованы [8]
81 AO Mon	35.8±0.94	34.4±0.64	0.05		29.3	третий компонент [136]
82 IM Mon	4.60±0.71	до НГП	0			[58]
83 U Oph	52.6±1.2	45.8±2.2	0.003	20.1±0.2	22.9	[108]
84 WZ Oph	5230±500	6190±560	0			третий компонент [130,137]
85 V451 Oph	255±5	207±2.5	0.013	170±5	159	[95]
86 VV Ori	8.52±0.19	до НГП	0			[135]
87 EW Ori	810±158	920±182	0.079	160000±40000	19740	третий компонент [102, 121]
88 V1031 Ori	630±24	615±25	0.006		145	[139]
89 Ori	6.4±0.2	27.2±2.3	0.04—0.08	210	110	[14]
90 Ori	9.0±0.32	6.5±0.02	0.011		2033	третий компонент [64, 65]
91 BK Peg	2700±248	3685±227	0			квадру полная [33]
92 EE Peg	400±6	450±87	0?			оба комп. синхронизованы
93 AG Per	13±0.7	до НГП	0.071	75.6	75	[98]
94 IQ Per	54.1±2.1	до НГП	0.076	119±9	95	[96]
95 V467 Per	1085±142	-	0.056		40	[40, 138]
96 Phe	77.4±1.5	до НГП	0.0113	44.2±6.5 63	50.3	[32, 36, 138]
97 PV Pup	350±40	130±82	0.05		173	[81]
98 TY Pyx	4790±136	5255±365	0			третий компонент [42, 149]
99 VV Pyx	510±12	510±14	0.0956	3200±1100	3110	[83]
100 V1647 Sgr	155±13	100±21	0.4143	531±10	580.6	оба компонента
101 V760 Sco	33.5±0.36	12.2±1.4	0.0265	38.9±0.3	38.8	синхронизованы [129]
102 V906 Sco	200±10	390±25	0.0054	37±18	65	[15]
103 AL Scl	143±6	до НГП	0.074		188	[9]
104 EG Ser	8270±1575	12120±1800	0			третий компонент? [134]
105 CD Tau	2280±121	3235±219	0			[134]
106 V818 Tau	до НГП	—	0			третий компонент [3]
107 DN UMa	250±14	370±5	0.015		140.6	третий компонент? [49]
108 CV Vel	37.1±0.2	35.7±0.16	0?			[100, 126]
109 DM Vir	1815±82	1860±85	0.003—0.015 10 ⁻⁴		3110 4650	третий компонент? [106]
110 Vir	16.3±0.48	30.5±1.7	0.140 0.205	128±12 108±5	95	[109]
111 HD 84207	10120±700	10850±710	?			квадруполная [35, 39, 46]
112 HD 208095	100±2.1	122±5	0.359		9620	[29, 141]
						оба компонента
						синхронизованы [10,75]
						[111]
						[90]
						[133]
						[97]

Таблица 2. Орбитальные периоды P , абсолютные характеристики (массы M и радиусы R в солнечных единицах) компонентов ТДС типа РГП из каталога [120], а также индивидуально рассчитанные для каждого компонента в рамках эволюционных моделей-треков [25] параметры приливной эволюции: константа внутреннего строения $\lg k_2$, глубина конвективной оболочки x_{b1} , радиус гирации r_1 , характеристика политропной структуры E конвективной оболочки, константы тормозного момента вследствие лучистого затухания, $\lg E_2$, и вследствие конвективной теплопроводности, $\lg \kappa_2$

ТДС	M_1/M_\odot	R_1/R_\odot	P , сут	$\lg k_{21}$	x_{b1}	r_1	$\lg E_{21}$	$\lg \kappa_{21}$	E_1
	M_2/M_\odot	R_2/R_\odot		$\lg k_{22}$	x_{b2}	r_2	$\lg E_{22}$	$\lg \kappa_{22}$	
1 AN And	1.90±0.05 1.12±0.03	4.00±0.10 3.45±0.09	3.2195665	-2.6349 -1.1950	— 0.1992	0.1577 0.3670	-11.133 —	— -1.5665	— 26.9795
2 BW Aqr	1.49±0.02 1.39±0.02	2.07±0.03 1.79±0.03	6.7196950	-2.3587 -2.2925	0.8696 0.8542	0.1936 0.2014	— —	-3.3780 -3.1839	0.9636 1.3031
3 V805 Aql	2.12±0.04 1.63±0.03	2.18±0.04 1.68±0.03	2.4082330	-2.4723 -2.4553	— —	0.1933 0.1966	-8.0157 -8.2891	— —	— —
4 Aql	6.80±0.17 5.40±0.14	4.20±0.11 3.30±0.08	1.9502600	-2.2155 -2.1943	— —	0.2265 0.2296	-6.4918 -6.5876	— —	— —
5 V539 Ara	6.25±0.09 5.33±0.08	4.41±0.07 3.72±0.06	3.1691260	-2.2816 -2.2759	— —	0.2172 0.2181	-6.6948 -6.7945	— —	— —
6 WW Aur	1.99±0.03 1.80±0.03	1.89±0.03 1.88±0.03	2.52501906	-2.4274 -2.4709	— —	0.2001 0.1944	-8.0495 -8.1612	— —	— —
7 AR Aur	2.48±0.04 2.29±0.04	1.78±0.03 1.82±0.03	4.13466645	— -2.3312	— —	— 0.2133	— -7.2569	— —	— —
8 EO Aur	11.0±0.35 7.00±0.22	7.40±0.23 7.05±0.22	4.0656340	-2.3390 -2.4927	— —	0.2084 0.1867	-6.9445 -7.2731	— —	— —
9 HS Aur	0.90±0.01 0.88±0.01	1.01±0.02 0.88±0.01	9.8153770	-1.6889 -1.5657	0.6775 0.6905	0.2775 0.3032	— —	-1.9709 -1.9212	11.4317 14.5665
10 Aur	2.38±0.04 2.30±0.04	2.77±0.04 2.63±0.04	3.9600421	-2.5223 -2.5148	— —	0.1856 0.1869	-7.9768 -8.0193	— —	— —
11 ZZ Boo	1.71±0.03 1.70±0.03	2.26±0.04 2.15±0.04	4.9917440	-2.5421 -2.5323	— —	0.1809 0.1834	-8.5188 -8.4473	— —	— —
12 AD Boo	1.36±0.02 1.16±0.02	1.62±0.03 1.27±0.02	2.0688112	-2.3082 -2.0053	0.8723 0.7788	0.2031 0.2352	— —	-3.3971 -2.4947	0.9682 4.1779
13 SZ Cam	16.6±0.30 11.8±0.21	9.83±0.18 5.85±0.11	2.6984708	-2.3743 -2.1429	— —	0.2048 0.2363	-6.9701 -6.4397	— —	— —
14 TU Cam	5.60±0.18 2.00±0.06	5.53±0.17 1.76±0.06	2.9332500	-2.4544 -2.3844	— —	0.1921 0.2062	-7.4544 -7.9455	— —	— —
15 AN Cam	1.40±0.04 1.40±0.04	2.30±0.06 1.70±0.04	20.998600	-2.2834 -2.3533	0.8007 0.8861	0.1898 0.1987	— —	-2.7752 -3.6021	2.0908 0.7085
16 AS Cam	3.30±0.07 2.50±0.06	2.55±0.06 1.95±0.04	3.4309714	-2.3215 -2.3148	— —	0.2132 0.2156	-6.9149 -6.8115	— —	— —
17 CW CMa	2.09±0.03 1.98±0.03	1.89±0.03 1.79±0.03	2.11797737	-2.4020 -2.3991	— —	0.2035 0.2042	-7.8053 -7.9876	— —	— —
18 GZ CMa	2.21±0.03 2.01±0.03	2.49±0.04 2.13±0.03	4.8008510	-2.5113 -2.4855	— —	0.1875 0.1917	-8.0997 -8.2314	— —	— —
19 EM Car	22.3±0.33 20.3±0.30	9.22±0.14 8.23±0.12	3.4142940	-2.2042 -2.1410	— —	0.2286 0.2369	-6.0878 -5.9057	— —	— —
20 QX Car	9.27±0.15 8.48±0.13	4.29±0.07 4.05±0.06	4.478040	-2.0392 -2.0521	— —	0.2514 0.2496	-5.9054 -5.9803	— —	— —
21 YZ Cas	2.32±0.03 1.35±0.02	2.54±0.04 1.35±0.02	4.4672240	-2.4975 -2.2308	— 0.8937	0.1893 0.2186	-7.9101 —	— -3.6331	— 0.8134
22 CC Cas	18.3±0.37 7.60±0.15	10.1±0.20 4.00±0.08	3.3663240	-2.3658 -2.1122	— —	0.2063 0.2410	-6.7211 -6.1977	— —	— —
23 AR Cas	7.90±0.20 2.20±0.06	5.43±0.14 1.77±0.04	6.0663309	-2.3018 -2.3392	— —	0.2133 0.2122	-6.5234 -7.4761	— —	— —
24 PV Cas	2.81±0.05 2.76±0.05	2.30±0.04 2.26±0.04	1.75055934	-2.3469 -2.3477	— —	0.2105 0.2103	-6.9770 -6.9606	— —	— —
25 V649 Cas	8.74±0.17 3.07±0.06	3.46±0.07 3.56±0.07	2.3912530	— -2.5177	— —	— 0.1849	— -7.8034	— —	— —

РАСЧЕТ КОНСТАНТ ПРИЛИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Продолжение табл. 2

ТДС	M_1/M_\odot	R_1/R_\odot	P , сут	$\lg k_{21}$	$x_{b/1}$	1	$\lg E_{21}$	\lg_{21}	E_1
	M_2/M_\odot	R_2/R_\odot		$\lg k_{22}$	$x_{b/2}$		2		
26 SZ Cen	2.32±0.04	4.56±0.07	4.1079830	-2.7368	—	0.1533	-11.6365	—	—
	2.28±0.04	3.63±0.06		-2.6263	—		0.1695	-8.6136	—
27 V346 Cen	11.8±0.24	8.27±0.16	6.3219350	-2.3767	—	0.2034	-7.1209	—	—
	8.40±0.17	4.19±0.08		-2.0816	—		0.2455	-6.0693	—
28 WX Cep	2.54±0.04	4.00±0.07	3.3784535	-2.6220	—	0.1701	-8.2992	—	—
	2.33±0.04	2.71±0.04		-2.5218	—		0.1858	-8.0329	—
29 ZZ Cep	4.10±0.11	3.20±0.08	2.1418000	-2.3304	—	0.2111	-6.9954	—	—
	1.90±0.05	2.50±0.06		-2.5761	—		0.1782	-8.5792	—
30 AH Cep	17.7±0.34	6.41±0.12	1.7747274	-1.9817	—	0.2593	-5.6895	—	—
	15.6±0.30	6.00±0.11		-1.9975	—		0.2570	-6.0144	—
31 CW Cep	12.8±0.20	5.61±0.09	2.7290000	-2.0567	—	0.2487	-6.3569	—	—
	11.7±0.18	5.11±0.08		-2.0381	—		0.2511	-6.1854	—
32 EI Cep	1.79±0.04	2.85±0.06	8.4393340	-2.5366	—	0.1760	-8.7711	—	—
	1.69±0.03	2.59±0.05		-2.5033	—		0.1794	-8.7554	—
33 EK Cep	2.03±0.04	1.60±0.03	4.4277500	—	—	—	—	—	—
	1.13±0.02	1.33±0.02		-2.0081	0.7548	0.2298	—	-2.3903	4.6583
34 NY Cep	12.9±0.33	6.86±0.18	15.2756600	-2.2131	—	0.2262	-6.6848	—	—
	9.40±0.24	5.70±0.15		-2.2357	—		0.2231	-6.4909	—
35 TV Cet	1.39±0.02	1.49±0.02	9.1032190	-2.3379	0.9124	0.2056	—	-4.0089	0.4521
	1.27±0.02	1.28±0.02		-2.1246	0.8514		0.2285	—	-3.0651
36 XY Cet	1.76±0.03	2.13±0.04	2.7807118	-2.5351	—	0.1844	-8.3201	—	—
	1.64±0.03	1.75±0.03		-2.4768	—		0.1933	-8.3106	—
37 RS Cha	1.86±0.03	2.14±0.03	1.6698700	-2.5220	—	0.1866	-8.2864	—	—
	1.82±0.03	2.34±0.04		-2.5442	—		0.1820	-8.4457	—
38 RZ Cha	1.52±0.02	2.27±0.03	2.8320840	-2.3062	—	0.1955	-8.8653	—	—
	1.51±0.02	2.27±0.04		-2.2795	—		0.1974	-8.8898	—
39 TY CrA	3.18±0.14	1.90±0.08	2.8877790	—	—	—	—	—	—
	1.64±0.07	1.90±0.09		-2.5081	—	0.1881	-8.3831	—	—
40 CrB	2.58±0.07	3.00±0.08	17.359907	-2.5208	—	0.1854	-7.8144	—	—
	0.92±0.02	0.90±0.02		-1.6021	0.6989		0.2971	—	-1.9674
41 Y Cyg	17.0±0.29	5.91±0.10	2.9968504	-1.9200	—	0.2686	-5.7208	—	—
	16.4±0.28	5.91±0.10		-1.9475	—		0.2644	-5.8242	—
42 MR Cyg	4.50±0.09	4.07±0.08	1.66703362	-2.4123	—	0.1987	-7.3518	—	—
	2.50±0.05	3.17±0.06		-2.5551	—		0.1803	-7.9906	—
43 MY Cyg	1.81±0.03	2.21±0.03	4.0051873	-2.5445	—	0.1835	-8.3499	—	—
	1.78±0.03	2.17±0.03		-2.5396	—		0.1840	-8.3189	—
44 V380 Cyg	10.6±0.27	16.0±0.41	12.4256120	-2.7593	—	0.1528	-11.8071	—	—
	6.8±0.18	4.04±0.10		-2.1882	—		0.2303	-6.4450	—
45 V442 Cyg	1.56±0.02	2.07±0.03	2.3859437	-2.4786	—	0.1859	-8.5975	—	—
	1.41±0.02	1.66±0.02		-2.3804	0.9029		0.1977	—	-3.8882
46 V453 Cyg	13.9±0.22	8.78±0.14	3.8898128	-2.3600	—	0.2059	-7.0570	—	—
	10.7±0.17	5.30±0.08		-2.1154	—		0.2402	-6.2541	—
47 V477 Cyg	1.79±0.03	1.56±0.03	2.3470199	—	—	—	—	—	—
	1.35±0.02	1.27±0.02		—	—	—	—	—	—
48 V478 Cyg	16.6±0.30	7.59±0.14	2.8808994	-2.1710	—	0.2323	-6.3849	—	—
	16.3±0.29	7.59±0.14		-2.1820	—		0.2306	-6.4541	—
49 V1143 Cyg	1.35±0.02	1.35±0.02	7.6407600	-2.2275	0.8936	0.2191	—	-3.6296	0.8207
	1.32±0.02	1.324±0.02		-2.1928	0.8780		0.2221	—	-3.3959
50 V1765 Cyg	23.7±1.06	20.9±0.93	13.373833	-2.9247	—	0.1452	-8.3876	—	—
	11.8±0.53	5.80±0.26		-2.1352	—		0.2374	-6.4256	—
51 UZ Dra	1.34±0.02	1.31±0.02	3.2613024	-2.1908	0.8871	0.2236	—	-3.5194	0.9723
	1.23±0.02	1.14±0.02		—	—		—	—	—
52 BH Dra	2.10±0.05	1.92±0.05	1.8172360	-2.4076	—	0.2028	-7.8069	—	—
	1.05±0.03	1.37±0.04		-1.9335	0.7029		0.2331	—	-2.1716
53 BS Dra	1.36±0.02	1.44±0.02	3.3640103	-2.2935	0.8980	0.2100	—	-3.7353	0.6634
	1.36±0.02	1.42±0.02		-2.2830	0.8987		0.2116	—	-3.7387
54 CM Dra	0.23±0.004	0.25±0.004	1.26838965	—	—	—	—	—	—
	0.21±0.003	0.24±0.004		—	—	—	—	—	—

ТДС	M_1/M_\odot	R_1/R_\odot	P , сут	$\lg k_{21}$	x_{b1}	1	$\lg E_{21}$	$\lg E_{21}$	E_1
	M_2/M_\odot	R_2/R_\odot		$\lg k_{22}$	x_{b2}		2	$\lg E_{22}$	
55 DE Dra	3.05±0.14 1.08±0.05	2.93±0.13 1.11±0.05	5.2980360	-2.4371 -1.8932	— 0.7483	0.1968 0.2505	-7.3441 —	— -2.2966	— 6.0629
56 CW Eri	1.59±0.03 1.33±0.03	2.08±0.04 1.56±0.03	2.7283737	-2.5099 -2.2756	— 0.8631	0.1841 0.2064	-8.5876 —	— -3.2791	— 1.1525
57 YY Gem	0.59±0.01 0.59±0.01	0.60±0.01 0.60±0.01	0.81428254	—	—	—	—	—	—
58 RX Her	2.75±0.05 2.33±0.04	2.46±0.04 2.05±0.03	1.7785720	-2.4010 -2.3838	—	0.2026 0.2059	-7.1852 -7.3578	—	—
59 TX Her	1.62±0.03 1.45±0.03	1.59±0.03 1.47±0.03	2.05980915	-2.4255 -2.3610	— 0.9447	0.2008 0.2063	-8.1304 —	— -4.7940	— 0.1809
60 DI Her	5.16±0.10 4.53±0.09	2.72±0.05 2.47±0.05	10.550185	-2.1063 —	—	0.2423 —	-6.2363 —	—	—
61 HS Her	4.7±0.12 1.60±0.04	2.70±0.07 1.52±0.04	1.6374120	-2.1468 -2.3967	—	0.2370 0.2050	-6.3794 -8.0547	—	—
62 V624 Her	2.27±0.04 1.87±0.03	3.03±0.05 2.21±0.04	3.8949770	-2.5766 -2.5329	—	0.1775 0.1850	-8.3749 -8.3432	—	—
63 V819 Her	1.53±0.07 1.11±0.05	1.87±0.08 1.28±0.10	2.2296296	-2.4837 -1.9847	— 0.7534	0.1882 0.2343	-8.4421 —	— -2.3706	— 4.9218
64 V822 Her	3.28±0.06 3.28±0.06	2.74±0.05 2.61±0.05	1.3911130	-2.3648 -2.3377	—	0.2069 0.2108	-7.0569 -6.9681	—	—
65 VZ Hya	1.23±0.02 1.12±0.02	1.36±0.02 1.14±0.02	2.9042997	-2.1232 -1.9185	0.8225 0.7669	0.2232 0.2489	—	-2.8213 -2.3947	2.4801 5.1773
66 AI Hya	2.15±0.03 1.98±0.03	3.92±0.06 2.77±0.04	8.2899676	-2.6469 -2.5947	—	0.1652 0.1752	-9.0336 -8.7798	—	—
67 HS Hya	1.34±0.02 1.29±0.02	1.30±0.02 1.28±0.02	1.5680350	-2.1806 -2.1360	0.8862 0.8618	0.2249 0.2286	—	-3.5013 -3.1726	1.0065 1.6138
68 KM Hya	1.98±0.03 1.49±0.03	2.13±0.04 1.48±0.03	7.7504690	-2.4912 -2.3826	— 0.9631	0.1909 0.2052	-8.2578 —	— -5.5513	— 0.0698
69 ² Hya	3.62±0.06 2.64±0.04	4.37±0.07 2.15±0.03	2.2677010	-2.5325 -2.3505	—	0.1818 0.2099	-7.9809 -6.9187	—	—
70 CM Lac	1.88±0.03 1.47±0.02	1.52±0.03 1.46±0.02	1.6046916	— -2.3619	— 0.9537	— 0.2071	—	— -5.1029	— 0.1283
71 CO Lac	4.50±0.09 3.70±0.07	2.80±0.06 2.38±0.05	1.5422075	-2.1928 -2.2116	—	0.2308 0.2286	-6.4970 -6.5091	—	—
72 EN Lac	9.70±0.31 1.25±0.04	6.30±0.20 1.20±0.04	12.096840	-2.2837 -2.0359	— 0.8355	0.2162 0.2400	-6.6766 —	— -2.8753	— 2.5866
73 TX Leo	2.75±0.12 1.05±0.05	3.49±0.16 2.10±0.09	2.4450566	-2.5555 -1.3453	— 0.4305	0.1797 0.3301	-7.9824 —	— -1.5940	— 25.1449
74 GG Lup	4.12±0.06 2.51±0.04	2.38±0.04 1.73±0.03	1.8496247	—	—	—	—	—	—
75 RR Lyn	1.89±0.04 1.50±0.03	2.48±0.05 1.86±0.04	9.9450700	-2.5751 -2.4572	— 0.9276	0.1783 0.1896	-8.5640 —	— -4.3857	— 0.2548
76 FL Lyr	1.22±0.02 0.96±0.02	1.28±0.02 0.96±0.02	2.1781544	-2.0863 -1.6817	0.8239 0.7035	0.2301 0.2826	—	-2.8104 -2.0353	2.6363 10.6229
77 V478 Lyr	0.93±0.02 0.25±0.01	0.99±0.03 0.30±0.008	2.1305140	-1.6961 —	0.6955 —	0.2792 —	—	-2.0133 —	10.9115 —
78 TZ Men	2.49±0.04 1.50±0.02	2.02±0.03 1.43±0.02	8.5690000	-2.3444 —	—	0.2113 —	-6.9064 —	—	—
79 UX Men	1.24±0.02 1.20±0.02	1.35±0.02 1.28±0.02	4.1811000	-2.1357 -2.0697	0.8315 0.8112	0.2230 0.2302	—	-2.8964 -2.7154	2.2350 2.9900
80 RU Mon	3.60±0.06 3.33±0.06	2.55±0.05 2.29±0.04	3.5845860	-2.2624 -2.2488	—	0.2217 0.2237	-6.7175 -6.6102	—	—
81 AO Mon	5.55±0.11 5.25±0.10	3.53±0.07 3.29±0.07	1.8847619	-2.2271 -2.2103	—	0.2249 0.2274	-6.6485 -6.6326	—	—
82 IM Mon	8.40±0.26 5.60±0.18	3.80±0.12 2.70±0.09	1.1902430	-2.0146 —	—	0.2551 —	-5.9030 —	—	—
83 U Oph	4.90±0.08 4.55±0.07	3.34±0.05 2.99±0.05	1.67734523	-2.2636 -2.2396	—	0.2200 0.2235	-6.7803 -6.6901	—	—

РАСЧЕТ КОНСТАНТ ПРИЛИВНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Окончание табл. 2

ТДС	M_1/M_\odot	R_1/R_\odot	P , сут	$\lg k_{21}$	x_{b1}	1	$\lg E_{21}$	\lg_{21}	E_1
	M_2/M_\odot	R_2/R_\odot		$\lg k_{22}$	x_{b2}		2	$\lg E_{22}$	\lg_{22}
84 WZ Oph	1.13±0.02 1.11±0.02	1.31±0.02 1.34±0.02	4.1835110	-2.0136 -2.0000	0.7635 0.7462	0.2308 0.2294	— —	-2.4295 -2.3500	4.4328 4.9477
85 V451 Oph	2.78±0.04 2.36±0.04	2.64±0.04 2.02±0.03	2.1965988	-2.4334 -2.3745	— —	0.1977 0.2070	-7.3291 -7.2466	— —	— —
86 VV Ori	10.8±0.19 4.50±0.08	5.03±0.09 2.45±0.04	1.48537788	-2.0707 —	— —	0.2466 —	-6.1434 —	— —	— —
87 EW Ori	1.19±0.02 1.16±0.02	1.14±0.02 1.09±0.02	6.9368515	-1.9461 -1.8775	0.8027 0.7828	0.2502 0.2592	— —	-2.5986 -2.4462	3.9562 5.1770
88 V1031 Ori	2.47±0.04 2.29±0.04	4.32±0.07 2.98±0.05	3.4055650	-2.6454 -2.5675	— —	0.1666 0.1788	-8.5750 -8.3027	— —	— —
89 Ori	23.0±1.03 9.00±0.40	17.0±0.76 10.0±0.45	5.7324760	-2.7429 -2.6157	— —	0.1631 0.1691	-7.4634 -10.7790	— —	— —
90 Ori	13.9±0.44 11.9±0.38	7.00±0.22 5.20±0.16	7.9892680	-2.1985 -2.0429	— —	0.2282 0.2504	-6.6374 -6.2304	— —	— —
91 BK Peg	1.43±0.03 1.27±0.02	1.97±0.04 1.57±0.03	5.4899085	-2.2714 -2.1444	0.8393 0.8087	0.2012 0.2162	— —	-3.0267 -2.7386	1.6480 2.6590
92 EE Peg	2.15±0.03 1.33±0.02	2.09±0.03 1.31±0.02	2.6282284	-2.4401 -2.1870	— 0.8825	0.1981 0.2235	-7.8497 —	— -3.4562	— 1.0513
93 AG Per	5.36±0.09 4.95±0.08	2.99±0.05 2.60±0.04	2.02872963	-2.1319 —	— —	0.2388 —	-6.3794 —	— —	— —
94 IQ Per	3.51±0.06 1.73±0.03	2.45±0.04 1.50±0.02	1.7435673	-2.2562 —	— —	0.2226 —	-6.6548 —	— —	— —
95 V467 Per	2.00±0.09 0.38±0.02	3.40±0.15 0.57±0.03	1.7653511	-2.6525 —	— —	0.1655 —	-9.3304 —	— —	— —
96 Phe	3.93±0.06 2.55±0.04	2.85±0.04 1.85±0.03	1.6697671	-2.2782 —	— —	0.2191 —	-6.8297 —	— —	— —
97 PV Pup	1.57±0.02 1.56±0.02	1.54±0.02 1.50±0.02	1.6607280	-2.4118 -2.3890	— —	0.2024 0.2055	-7.9946 -7.9685	— —	— —
98 TY Pyx	1.22±0.02 1.20±0.02	1.59±0.02 1.68±0.03	3.1985787	-2.0622 -2.1266	0.7667 0.7649	0.2212 0.2095	— —	-2.4657 -2.4988	4.0430 3.5405
99 VV Pyx	2.10±0.03 2.10±0.03	2.165±0.03 2.16±0.03	4.5961832	-2.4733 -2.4733	— —	0.1932 0.1932	-8.0471 -8.0471	— —	— —
100 V1647 Sqr	2.19±0.03 1.97±0.03	1.83±0.03 1.67±0.03	3.28279251	-2.3567 -2.3591	— —	0.2099 0.2099	-7.5160 -7.9943	— —	— —
101 V760 Sco	4.69±0.07 4.42±0.07	2.96±0.05 2.60±0.04	1.7309000	-2.2032 -2.1611	— —	0.2291 0.2352	-6.5955 -6.3846	— —	— —
102 V906 Sco	3.55±0.09 2.80±0.07	4.20±0.11 3.86±0.10	2.7858470	-2.5291 -2.5847	— —	0.1824 0.1753	-7.9083 -8.1466	— —	— —
103 AL Scl	3.63±0.06 1.71±0.03	3.24±0.05 1.40±0.02	2.4450830	-2.4033 —	— —	0.2010 —	-7.2274 —	— —	— —
104 EG Ser	1.1±0.05 1.0±0.04	1.73±0.08 1.57±0.07	4.9736200	-1.8859 -1.7485	0.6583 0.6112	0.2320 0.2534	— —	-2.0469 -1.8923	8.0209 11.5216
105 CD Tau	1.40±0.02 1.31±0.02	1.72±0.03 1.63±0.03	3.4351150	-2.3485 -2.2065	0.8820 0.8293	0.1986 0.2102	— —	-3.5402 -2.9196	0.7750 1.9839
106 V818 Tau	1.08±0.02 0.77±0.01	0.90±0.02 0.77±0.01	5.6092000	— —	— —	— —	— —	— —	— —
107 DN UMa	2.02±0.04 1.91±0.04	1.79±0.04 1.79±0.04	1.7304180	-2.3890 -2.4171	— —	0.2055 0.2019	-7.9094 -8.0659	— —	— —
108 CV Vel	6.10±0.09 6.00±0.09	4.09±0.06 3.95±0.06	6.8894960	-2.2569 -2.2464	— —	0.2207 0.2222	-6.6623 -6.6494	— —	— —
109 DM Vir	1.46±0.02 1.45±0.02	1.77±0.03 1.77±0.03	4.6694335	-2.4264 -2.4209	0.9186 0.9152	0.1931 0.1934	— —	-4.1779 -4.1101	0.3328 0.3601
110 Vir	10.9±0.34 6.80±0.22	7.60±0.24 4.4±0.14	4.0145200	-2.3579 -2.2483	— —	0.2057 0.2218	-7.0147 -6.5478	— —	— —
111 HD 84207	0.97±0.02 0.95±0.02	1.10±0.03 1.07±0.03	1.3742000	-1.7934 -1.7654	0.6904 0.6846	0.2587 0.2630	— —	-2.0648 -2.0372	8.8647 9.4405
112 HD 208095	3.70±0.16 3.35±0.15	2.90±0.13 2.70±0.12	9.4791700	-2.3277 -2.3453	— —	0.2119 0.2097	-6.9702 -6.9934	— —	— —

В отличие от напрямую вычисляемых в интерполяционной процедуре параметров E_2 тормозных моментов для лучистых сред, значения параметров λ_2 тормозных моментов в конвективных средах рассчитывались путем интегрирования глубины конвективной оболочки. Для этой цели использовалась формула [148]

$$\lambda_{2,i} = 0.607 \int_{x_{bf,i}}^1 E_i^{2/3} x^{22/3} (1-x)^2 dx, \quad (7)$$

где λ_2 — параметр длины перемешивания, выбранный для новой калибровки в моделях [25] равным 1.68, $x_{bf,i}$ — нижняя граница конвективной оболочки, E_i — ее политропная характеристика, которые индивидуально рассчитываются для каждого компонента маломассивной ТДС.

Из 112 ТДС каталога [120] были отобраны 24 системы, у которых и главный компонент, и спутник имеют массы менее $1.5M_\odot$. Структура внутреннего строения таких звезд подразумевает наличие лучистого ядра и конвективной оболочки. Изучение зависимости параметра тормозных моментов λ_2 , возникающих из-за тепловой конвекции и эффективно гасящих равновесную составляющую прилива, от массы звезды показывает хорошо выраженную корреляцию: чем массивнее звезда, тем меньше параметр λ_2 , а значит должна ожидать более протяженной шкала синхронизации, так как $\lambda_{syn}^{turb} \propto R^{16/3}$ [147].

На рис. 1 несколько ТДС (номера в каталоге 2, 15, 91, 98, 104, 105) заметно выпадают из общей зависимости. Важно подчеркнуть, что компоненты этих систем имеют хорошо выраженный избыток радиуса (30—70 %) по сравнению со звездами главной последовательности. Из-за сильной обратной зависимости от радиуса ($\lambda_{syn}^{turb} \propto R^{16/3}$) дли-

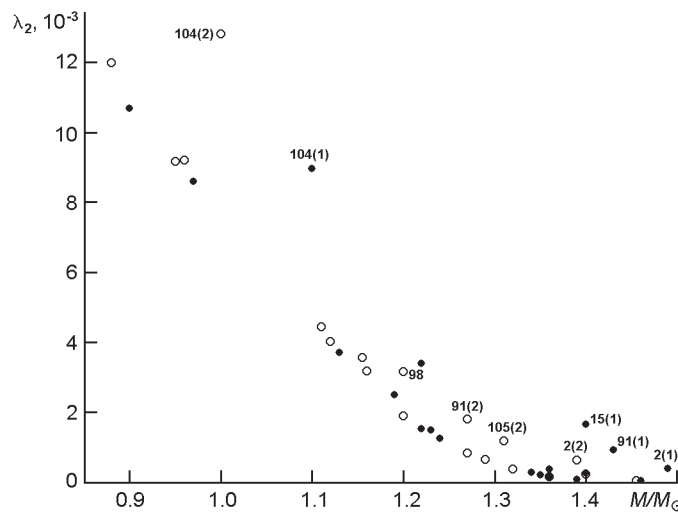


Рис. 1. Зависимость параметра тормозных моментов λ_2 , возникающих из-за тепловой конвекции от массы компонента ТДС (точки — главные компоненты, кружки — спутники)

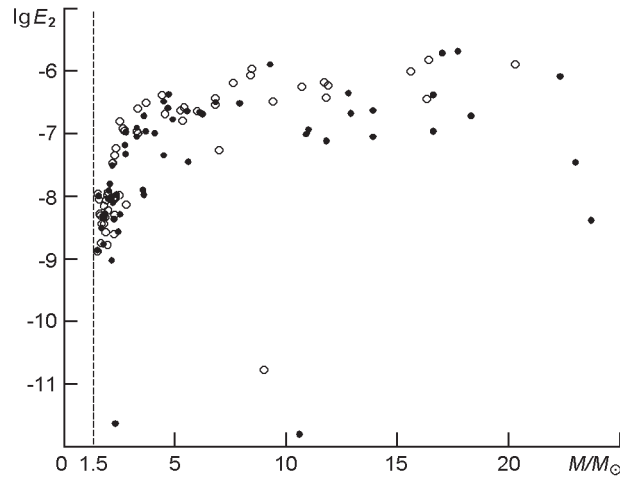


Рис. 2. Зависимость параметра тормозных моментов E_2 вследствие лучистого охлаждения от массы компонента ТДС (точки — главные компоненты, кружки — спутники)

тельность шкалы синхронизации может значительно сократиться для компонентов с большими избытками радиусов. Происхождение избытка не совсем понятно для непроэволюционировавших систем (находящихся в пределах полосы ГП). Возможно, он возникает из-за ошибок в наблюдениях, что в результате приводит к ошибочному определению абсолютных параметров ТДС. Другой фактор, порождающий избыток радиуса — неучтенная потеря массы, которая может иметь место даже у непроэволюционировавших ТДС, далеких от заполнения своих полостей Роша [18]. Также нужно понимать, что соотношение «масса — радиус» для звезд главной последовательности представляет собой осредненную зависимость между положением начальной (НГП) и конечной (КГП) главной последовательности.

Следующая группа ТДС была отобрана по критерию, согласно которому массы главного и вторичного компонентов превосходят предел $1.5M_{\odot}$. Такой класс ТДС с лучистыми оболочками и с CNO-циклом термоядерного синтеза в конвективном ядре включает 69 систем из каталога [120] и показывает обратную классу маломассивных ТДС корреляцию: чем массивнее звезда, тем больше параметр E_2 тормозных моментов вследствие лучистого охлаждения (рис. 2), а значит, короче шкала синхронизации $\frac{rad}{syn} E_2^{-1}$ [146]. Размытый характер зависимости « $E_2 — M$ », по всей вероятности, свидетельствует о многократности пересечения компонентами массивных ТДС границы лучисто-конвективных зон, которые определяют тип механизма переноса энергии. Кроме того, изучаемые ТДС наблюдаются на разных стадиях эволюции в пределах главной последовательности, что также отражается на статистическом разбросе их зависимости $E_2(M)$. Эффект размытости усиливается по мере увеличения массы звезды; например, модель звезды с начальной массой $10M_{\odot}$ трижды проходит границы

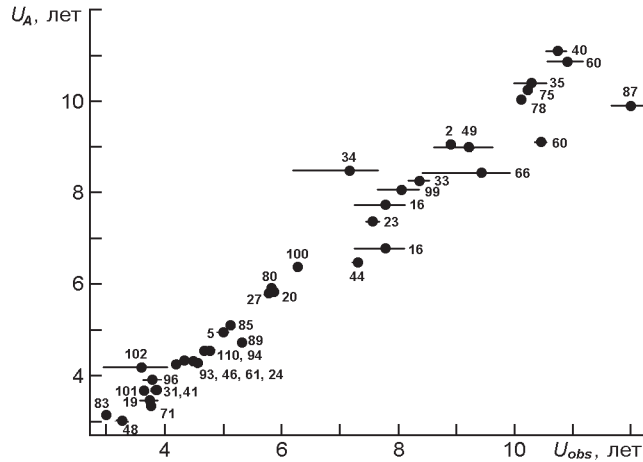


Рис. 3. Сравнение наблюдаемого U_{obs} и теоретического U_A значений апсидального периода

лучистой оболочки и слоевого источника с конвективной теплопроводностью [25], что, безусловно, сказывается на колебании значения параметра тормозного момента E_2 .

СРАВНЕНИЕ U_{obs} И U_A

Несмотря на отсутствие численных моделей-треков для ТДС, ввиду очевидной сложности учета влияния гравитационного взаимодействия компонентов на их ядерную эволюцию роль приливных эффектов все же можно оценить в рамках динамической теории апсидального движения, объединенной с анализом неадиабатических приливных осцилляций. Уникальное свойство параметров апсидального движения — одновременно характеризовать темп поворота эллиптической орбиты ТДС и распределение плотности внутри каждого компонента — позволяет использовать константы внутреннего строения, рассчитываемых в модельных треках одиночных звезд, в качестве интерполяционной сетки для индивидуального вычисления $\lg k_{21}$ и $\lg k_{22}$ для компонентов ТДС. О правомерности такого подхода свидетельствуют результаты сравнения наблюдаемого (U_{obs}) и теоретического (U_A) значений апсидального периода (табл. 1, графы 5, 6; рис. 3).

Представляет интерес выделить пять систем, для которых заметно выражен релятивистский эффект — AS Cam (20 %), NY Cep (28 %), V1765 Cyg (7 %), AI Hya (20 %), DI Her (56 %), EW Ori (76 %). Для AS Cam и DI Her была сделана попытка устранить различие между U_{obs} и U_A в рамках несимметричной теории гравитации [87—89], которая привела к существенному замедлению поворота орбиты этих ТДС по сравнению с оценками, предсказываемыми в ОТО. Остальные системы (33 ТДС из каталога [120]), для которых возможно было выпол-

нить сравнение U_{obs} и U_A , показывают хорошее согласие, что подтверждает надежность используемых эволюционных моделей Кларэ [25], впервые включающих константы тормозных моментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в рамках одной вычислительной сетки, построенной на базе эволюционных моделей-треков Кларэ [25], для ТДС с разделенными компонентами из каталога [120] проведены расчеты основных констант приливной эволюции ($\lg k_2$, x_{bf} , E , $\lg E_2$). Анализ параметров тормозных моментов с точки зрения внутреннего строения звезды позволяет спрогнозировать очередность синхронизации компонентов ТДС:

1. В маломассивных РГП-системах с конвективными оболочками меньший по массе компонент быстрее синхронизирует свое вращение с орбитальным движением, тогда как в массивных ТДС с лучистыми оболочками — наоборот. Это объясняется характером зависимости (обратной или прямой) параметра тормозных моментов (k_2 или E_2) конвективной или лучистой оболочки от массы звезды соответственно.

2. Синхронизация значительно быстрее устанавливается у компонентов с конвективными оболочками, в которых константы моментов торможения k_2 на порядки больше, чем константы E_2 , определяемые для компонентов с лучистыми оболочками.

Хорошее совпадение теоретического значения периода апсидального движения, оцениваемого по индивидуально рассчитанным для каждой ТДС константам внутреннего строения k_2 на базе эволюционных звездных моделей-треков Кларэ [25], с его наблюдательным значением, характеризует надежность предлагаемого численного алгоритма вычисления всех остальных индивидуальных констант x_{bf} , E , E_2 , k_2 приливной эволюции, рекомендуемых для изучения процессов синхронизации и циркуляризации орбиты ТДС.

Авторы благодарны Т. С. Полушиной и Е. И. Старицину за плодотворные обсуждения численного алгоритма и результатов. Работа выполнена при поддержке РФФИ гранта N 10-02-00426 «Определение основных параметров, эволюционного статуса, истории звездообразования затменных двойных систем».

1. Ahn Y. S. Photometric observations of NY Cephei // *Astrophys. and Space Sci.*—1992.—**198**.—P. 137—148.
2. Ak T., Albayrak B., Selam S. O., Tannverdi T. A new light-time effect study of TX Herculis // *New Astronomy*.—2004.—**9**.—P. 265—272.
3. Alencar S. H. P., Vaz L. P. R., Helt B. E. Absolute dimensions of eclipsing binaries. XXI.

- V906 Scorpii: a triple system member of M 7 // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**326**.—P. 709—721.
4. *Andersen J.* Spectroscopic observations of eclipsing binaries. III. Definitive orbits and effects of line blending in CV Velorum // *Astron. and Astrophys.*—1975.—**44**.—P. 355—362.
 5. *Andersen J.* Spectroscopic observations of eclipsing binaries IV. Absolute dimensions of the giant system SZ Centauri // *Astron. and Astrophys.*—1975.—**45**.—P. 203—208.
 6. *Andersen J., Clausen J. V.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. XV. EM Carinae // *Astron. and Astrophys.*—1989.—**213**.—P. 183—194.
 7. *Andersen J., Clausen J. V., Gimenez A.* Absolute dimensions of eclipsing binaries — Part twenty — GG-Lupi — young metal deficient B-Stars // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**277**.—P. 439—451.
 8. *Andersen J., Clausen J. V., Magain P.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. XIV. UX Mensae // *Astron. and Astrophys.*—1989.—**211**.—P. 346—352.
 9. *Andersen J., Clausen J. V., Nordstrom B.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. V. VV Pyxidis, a detached early A-type system with equal components // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**134**.—P. 147—157.
 10. *Andersen J., Clausen J. V., Nordstrom B.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. VI. The F-type system DM Virginis // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**137**.—P. 281—286.
 11. *Andersen J., Clausen J. V., Nordstrom B.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. XII. TZ Mensae // *Astron. and Astrophys.*—1987.—**175**.—P. 60—70.
 12. *Andersen J., Clausen J. V., Nordstrom B., Reipurth B.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. I. The early-type detached system QX Carinae // *Astron. and Astrophys.*—1983.—**121**.—P. 271—280.
 13. *Andersen J., Gjerloff H., Imbert M.* Spectroscopic observations of eclipsing binaries. II. Absolute dimensions, evolutionary state, and helium content of RZ Chamaeleontis // *Astron. and Astrophys.*—1975.—**44**.—P. 349—353.
 14. *Andersen J., Nordstrom B., Clausen J. V.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. XVI. V1031 Orionis // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**228**.—P. 365—378.
 15. *Andersen J., Popper D. M.* The G-type eclipsing binary TY Pyxidis // *Astron. and Astrophys.*—1975.—**39**.—P. 131—134.
 16. *Andersen J., Vaz L. P. R.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. III. KM Hydrae — A detached AM system with unequal components // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**130**.—P. 102—110.
 17. *Barembaum M. J., Etzel P. B.* A Photometric Analysis of the Apsidal Motion Binary System PV Cassiopeiae // *Astron. J.*—1995.—**109**.—P. 2680—2689.
 18. *Botsula R. A.* Nonstationary conditions in eclipsing binary systems with UV Leo solar-type components // *Izv. Engelhardt Obs.*—1978.—**43, 44**.—P. 170—184.
 19. *Burns J. F., Giunan E. F., Marshall J. J.* New apsidal motion determination of the eccentric eclipsing binary V1143 CYGNI // *IBVS*.—1996.—N 4363.
 20. *Cakirli O., Ibanoglu C., Frasca A.* A spectroscopic study of the close eclipsing binary HS Herculis // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**474**.—P. 579—584.
 21. *Casey B. W., Mathieu R. D., Suntzeff N. B., Walter F. M.* The pre-main-sequence triple TY CrA: Spectroscopic detection of the secondary and tertiary components // *Astron. J.*—1995.—**109**.—P. 2156—2168.
 22. *Chandrasekhar S.* The equilibrium of distorted polytropes. III. The double star problem // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1933.—**93**.—P. 462—471.

23. *Chauvin G., Lagrange A. M., Beust H., et al.* VLT/NACO adaptive optics imaging of the TY CrA system. A fourth stellar component candidate detected // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**406**.—P. 51—54.
24. *Chun-Hwey Kim, Il-Seong Nha, Kreiner J.* A possible detection of a second light-time orbit for the massive, early-type eclipsing binary star AH Cephei // *Astron. J.*—2005.—**129**.—P. 990—1000.
25. *Claret A.* New grids of stellar models including tidal-evolution constants up to carbon burning. I. From 0.8 to 125 M_{\odot} at $Z = 0.02$ // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**424**.—P. 919—925.
26. *Claret A., Gimenez A., Martin E. L.* A test case of stellar evolution: the eclipsing binary EK Cephei. A system with accurate dimensions, apsidal motion rate and lithium depletion level // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**302**.—P. 741—744.
27. *Clausen J. V.* V539 Arae: first accurate dimensions of a slowly pulsating B star // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**308**.—P. 151—169.
28. *Clausen J. V.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. XIX: BW Aquarii — A late F-type indicator of overshooting // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**246**.—P. 397—406.
29. *Clausen J. V., Gronbech B.* Four-colour photometry of eclipsing binaries. VIII. CV Velorum, light curves, photometric elements and absolute dimensions // *Astron. and Astrophys.*—1977.—**58**.—P. 131—137.
30. *Clausen J. V., Nordstrom B.* Four-colour photometry of eclipsing binary, XA — Photometric elements, absolute dimensions and helium abundance of Chi-2 Hydrae // *Astron. and Astrophys.*—1978.—**67**.—P. 15—22.
31. *Cowling T. G.* On the motion of the apsidal line in close binary systems // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1938.—**98**.—P. 734—743.
32. *Degirmenci O. L.* Photometry and analysis of the eclipsing binary IQ Persei // *Astrophys. and Space Sci.*—1997.—**253**.—P. 237—252.
33. *De Mey K., Aerts C., Waelkens C., Van Winckel H.* The early-type multiple system ζ Orionis. II. Line profile variations in component Ab // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**310**.—P. 164—172.
34. *Demircan O., Derman E.* 1988 light curves of RX Herculis // *IBVS*.—1989.—N 3403.
35. *Drozd M.* CCD observations of DN UMa // *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication*.—1997.—**67**.—P. 30—33.
36. *Drozd M., Krzesinski J., Pajdosz G.* Apsidal motion of IQ Persei // *IBVS*.—1990.—N 3494.
37. *Dryomova G. N., Svechnikov M. A.* Methods of age estimation for detached binary systems // *Astrophys. and Space Sci.*—2003.—**283**.—P. 309—336.
38. *Fekel F. C.* Chromospherically active stars. IV. HD 178450 = V478 Lyr: an early-type BY Draconis type binary // *Astron. J.*—1988.—**95**.—P. 215—219.
39. *Garcia J. M., Gimenez A.* Photometric elements of the eclipsing binary DN UMa = HR 4560 // *Astrophys. and Space Sci.*—1986.—**125**.—P. 181—188.
40. *Gimenez A., Clausen J. V.* AG Persei: Absolute dimensions and membership of Perseus OB2 // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**291**.—P. 795—804.
41. *Gimenez A., Clausen J. V., Andersen J.* Four-colour photometry of eclipsing binaries. XXIA Photometric analysis and apsidal motion study of V346 Centauri // *Astron. and Astrophys.*—1986.—**160**.—P. 310—320.
42. *Gimenez A., Clausen J. V., Jensen K.* Four-colour photometry of eclipsing binaries. XXIV. Apsidal motion of QX Carinae, Phoenicis and NO Puppis // *Astron. and Astrophys.*—1986.—**159**.—P. 157—165.

43. *Gimenez A., Quintana J. M.* Apsidal motion and revised photometric elements of the eccentric eclipsing binary V 477 Cygni // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**260**.—P. 227—236.
44. *Giuricin G., Mardirossian F.* Revised photometric elements of five eclipsing binaries // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1981.—**45**.—P. 499—505.
45. *Giuricin G., Mardirossian F., Mezzetti M.* AN And — A detached eclipsing binary system with an AM primary member // *Astron. and Astrophys.*—1982.—**114**.—P. 74—76.
46. *Gorda S. Yu.* Identification of the variable component of ADS 8347 (DN UMa) // *Astron. Lett.*—1994.—**20**.—P. 446—448.
47. *Guinan E. F., Marshal J. J., Maloney F. P.* A new apsidal motion determination for DI Herculis // *IBVS*.—1994.—N 4101.
48. *Guinan E. F., Ribas I., Fitzpatrick E. L., et al.* Eclipsing binaries as astrophysical laboratories: Internal structure, core convection, and evolution of the B-star components of V380 Cygni // *Astrophys. J.*—2000.—**544**.—P. 409—422.
49. *Haefner R., Skillen I., de Groot M.* Absolute parameters of the early-type double-lined eclipsing binary AL Sculptoris (HD 224113) // *Astron. and Astrophys.*—1987.—**179**.—P. 141—156.
50. *Hill G., Hilditch R. W., Aikman G. C. L., Khalessheh B.* Studies of early-type variable stars. 8. The massive binary system CC Cassiopeiae // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**282**.—P. 455—466.
51. *Holmgren D. E., Hadrava P., Harmanec P., et al.* Search for forced oscillations in binaries. III. Improved elements and the detection of line-profile variability of the B4V + A6V: system AR Cassiopeiae // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**345**.—P. 855—868.
52. *Holmgren D. E., Hill G., Scarfe C. D.* New apsidal-motion parameters for Y Cygni // *Observatory*.—1995.—**115**.—P. 188—192.
53. *Holmgren D. E., Scarfe C. D., Hill G., Fisher W. A.* Absolute dimensions of early-type eclipsing binary stars. I. NY Cephei // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**231**.—P. 89—94.
54. *Hube D. P., Couch J. S.* DE Draconis — Spectroscopic orbit, rotation effect and physical model // *Astrophys. and Space Sci.*—1982.—**81**.—P. 357—368.
55. *Hube D. P., Martin B. E.* The eclipsing binary HD 174853. II. Photometric analysis and model // *Astron. J.*—1991.—**102**.—P. 1777—1783.
56. *Imbert M.* Photoelectric radial velocities of eclipsing binaries. III — Orbital elements of AN Cam // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1987.—**67**.—P. 161—167.
57. *Jeffreys K. W.* A photometric study of the eclipsing binary RX Hercules // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1980.—**42**.—P. 285—288.
58. *Kandpal C. D.* Photoelectric elements of the binary system AO Monocerotis // *Astrophys. and Space Sci.*—1976.—**40**.—P. 3—14.
59. *Kandpal C. D., Srivastava J. B.* Photoelectric elements of the eclipsing binary ZZ Cephei // *Bull. Astron. Inst. Czech.*—1967.—**18**.—P. 265—269.
60. *Khaliullin Kh. F., Khaliullina A. I.* The third body in the eclipsing system RR Lyn // *Astron. Reports*.—2002.—**46**.—P. 119—126.
61. *Khaliullin Kh. F., Khaliullina A. I.* Apsidal motion and the third-body problem in the binary HS Her // *Astron. Reports*.—2006.—**50**.—P. 814—822.
62. *Khaliullin Kh. F., Kozyreva V. S.* Apsidal motion in the eclipsing binary AS Cam // *Astrophys. and Space Sci.*—1983.—**94**.—P. 115—122.
63. *Khaliullin Kh. F., Kozyreva V. S.* Photometric light curves and physical parameters of

- the eclipsing binary systems IT Cas, CO Cep, AI Hya with possible apsidal motions // *Astrophys. and Space Sci.*—1989.—**155**.—P. 53—69.
64. *Kholtygin A. F., Burlakova T. E., Fabrika S. N., Valyavin G. G.* Binary stars as critical tools and tests in contemporary astrophysics // *Internat. Astron. Union, Symp. N 240*, 22—25 August 2006, Prague, Czech. Republic. — Prague, 2006.—P. 391.
65. *Koch R. H., Hrivnak B. J.* A photometric study of the close binary Delta Orionis A // *Astrophys. J.*—1981.—**248**.—P. 249—255.
66. *Kopal Z.* Close binary systems. — London: Chapman and Hall, 1959.—497 p.
67. *Kopal Z.* Dynamics of close binary systems. — Dordrecht: Reidel, 1978.—524 p.
68. *Krylov A. V., Mossakovskaya L. V., Khaliullin Kh. F., Khaliullina A. I.* Apsidal motion and physical parameters of the eclipsing binary system AR Cas // *Astron. Reports.*—2003.—**47**.—P. 551—561.
69. *Lacy C. H.* Absolute dimensions and masses of eclipsing binaries. II. YZ Cassiopeiae // *Astrophys. J.*—1981.—**251**.—P. 591—596.
70. *Lacy C. H.* Absolute dimensions and masses of eclipsing binaries. II. CW Canis Majoris // *Astrophys. J.*—1982.—**261**.—P. 612—616.
71. *Lacy C. H.* Absolute dimensions and masses of AD Bootis // *Astron. J.*—1997.—**113**.—P. 1406—1410.
72. *Lacy C. H., Frueh M. L.* Properties of the main-sequence eclipsing binary V442 Cygni // *Astron. J.*—1987.—**94**.—P. 712—722.
73. *Lacy C. H., Gulmen O., Gudur N., Sezer C.* Properties of the main-sequence eclipsing binary UZ Draconis // *Astron. J.*—1989.—**97**.—P. 822—835.
74. *Lampens P.* Observational aspects of two Delta Scuti variables in binaries or multiple stars: Theta 2 Tau and RS Cha // *ASP Conf. Proc.*—2002.—**256**.—P. 149—155.— (Observational Aspects of Pulsing B and A Stars)
75. *Latham D. W., Nordstrom B., Andersen J., et al.* Accurate mass determination for double-lined spectroscopic binaries by digital cross-correlation spectroscopy: DM Virginis revisited // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**314**.—P. 864—870.
76. *Lehmann H., Harmanec P., Aerts C., et al.* A new analysis of the radial velocity variations of the eclipsing and spectroscopic binary EN Lacertae // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**367**.—P. 236—249.
77. *Linnell A. P., Etzel P. B., Hubeny I., Olson E. C.* A photometric and spectrophotometric study of MR Cygni // *Astrophys. J.*—1998.—**494**.—P. 773—782.
78. *Lorenz R. D., Mayer P., Drechsel H.* SZ Camelopardalis — an early-type eclipsing binary embedded in a multiple system // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**332**.—P. 909—927.
79. *Maloney F. P., Guinan E. F., Barge L., Mardling R.* Revisiting the anomalous apsidal motion of the eccentric eclipsing binary DI Herculis // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—2003.—**35**.—P. 1224.
80. *Maloney F. P., Guinan E. F., Boyd P.* Eclipsing binary stars as tests of gravity theories — The apsidal motion of AS Camelopardalis // *Astron. J.*—1989.—**98**.—P. 1800—1813.
81. *Martin B., Hube D., Lyder D.* The ellipsoidal variable 42 Persei — Observations and model // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1990.—**102**.—P. 1153—1160.
82. *Martynov D. Ya., Khaliullin Kh. F.* On the relativistic motion of the periastron in the eclipsing binary system DI Herculis // *Astrophys. and Space Sci.*—1980.—**71**.—P. 147—170.
83. *Mashev K., Nikolov A.* The motion of the line of apsides of Zeta Phoenicis // *Astrophys. and Space Sci.*—1989.—**154**.—P. 281—285.

84. Mayer P., Hadrava P., Harmanec P., Chohol D. New data on the eclipsing binary V1765 CYG (HR 7551) and improved orbital and light-curve solutions // Bull. Astron. Inst. Czech.—1991.—**42**.—P. 230—240.
85. Mayer P., Lorenz R., Drechsel H. Spectroscopy of four early-type eclipsing binaries // Astron. and Astrophys.—2002.—**388**.—P. 268—278.
86. Metcalfe T. S., Mathieu T. D., Latham D. W., Torres G. The low-mass double-lined eclipsing binary CM Draconis: A test of the primordial helium abundance and the mass-radius relation near the bottom of the main sequence // Astrophys. J.—1996.—**456**.—P. 356—364.
87. Mofflat J. W. New theory of gravitation // Phys. Rev. D.—1979.—**19**.—P. 3554—3558.
88. Mofflat J. W. The orbital motion of DI Herculis as a test of a theory of gravitation // Astrophys. J. Lett.—1984.—**287**, part 2.—P. 77—79.
89. Mofflat J. W. Cosmions in the nonsymmetric gravitational theory // Phys. Rev. D.—1989.—**39**.—P. 474—484.
90. Monet D. G. A discussion of apsidal motion detected in selected spectroscopic binary systems // Astrophys. J.—1980.—**237**.—P. 513—528.
91. Mossakovskaya L. V., Khaliullin Kh. F. Apsidal motion in the system V478 Cyg // Astron. Lett.—1996.—**22**.—P. 132—134.
92. Nordstrom B., Johansen K. T. Radii and masses for young star AR Aurigae // Astron. and Astrophys.—1994.—**282**.—P. 787—800.
93. Nordstrom B., Johansen K. T. Radii and masses for beta Aurigae // Astron. and Astrophys.—1994.—**291**.—P. 777—785.
94. Panchatsaram T., Abhyankar K. D. On the orbital periods of the eclipsing binaries CM Lacertae, AB Andromedae and YY Eridani // Astron. Soc. India Bull.—1981.—**9**.—P. 243—248.
95. Popper D. M. Rediscussion of eclipsing binaries. VII. WZ Ophiuchi and other solar-type stars // Astrophys. J.—1965.—**141**.—P. 126—144.
96. Popper D. M. Rediscussion of eclipsing binaries. XII. V805 Aquilae and EE Pegasi, two main-sequence systems with unequal components // Astrophys. J.—1981.—**244**.—P. 541—545.
97. Popper D. M. HD 208095 — disappearance of the last of the overmassive detached binaries // Publs Astron. Soc. Pacif.—1982.—**94**.—P. 76—79.
98. Popper D. M. The F-type eclipsing binaries ZZ Bootis, CW Eridani, and BK Pegasi // Astron. J.—1983.—**88**.—P. 1242—1256.
99. Popper D. M. Rediscussion of eclipsing binaries. XI. The bright AM system V624 Herculis // Astron. J.—1984.—**89**.—P. 1057—1062.
100. Popper D. M. Spectroscopic orbits of two early A-type eclipsing binaries EG Serpentis and DN Ursae Majoris // Publs Astron. Soc. Pacif.—1986.—**98**.—P. 1312—1316.
101. Popper D. M. Rediscussion of eclipsing binaries. XVI. The detached early A type binaries PV Cassiopeiae and WX Cephei // Astron. J.—1987.—**93**.—P. 672—677.
102. Popper D. M. Rediscussion of eclipsing binaries. XVIII. Faint secondaries in the spectra of early B-type systems // Publs Astron. Soc. Pacif.—1993.—**105**.—P. 721—730.
103. Popper D. M., Andersen J., Clausen J. V., Nordstrom B. Absolute dimensions of eclipsing binaries. IX — The early AM system GZ Canis Majoris // Astron. J.—1985.—**90**.—P. 1324—1333.
104. Popper D. M., Etzel P. B. Photometric orbits of seven detached eclipsing binaries//

- Astron. J.—1981.—**86**.—P. 102—120.
105. *Popper D. M., Lacy C. H., Frueh M. L., Turner A. E.* Properties of main-sequence eclipsing binaries — Into the G stars with HS Aurigae, FL Lyrae, and EW Orionis // Astron. J.—1986.—**91**.—P. 383—404.
106. *Ribas I., Jordi C., Torra J.* CD Tau: a detached eclipsing binary with a solar-mass companion // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1999.—**309**.—P. 199—207.
107. *Russell H. N.* On the advance of periastron in eclipsing binaries // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1928.—**88**.—P. 641—643.
108. *Sanyal A., Mahra H. S., Sanwal N. B.* Photoelectric observations of the eclipsing variable IM Monocerotis // Bull. Astron. Inst. Czech.—1965.—**16**.—P. 209—212.
109. *Schiller S. J., Milone E. F.* Photometric analysis of the Hyades eclipsing binary HD 27130 // Astron. J.—1987.—**93**.—P. 1471—1483.
110. *Schneller H.* Lichtelektrische Beobachtungen und Systemkonstanten des Bedeckungsveränderlichen EO Aurigae // Astron. Nachr.—1963.—**287**.—P. 49—53.
111. *Shobbrook R. R., Lomb N. R., Herbison-Evans D.* The short period light and velocity variations in Alpha Virginis // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1972.—**156**.—P. 165—180.
112. *Southworth J., Maxted P. F. L., Smalley B.* Eclipsing binaries in open clusters. II. V453 Cyg in NGC 6871 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2004.—**351**.—P. 1277—1289.
113. *Southworth J., Smalley B., Maxted P. F. L., et al.* Absolute dimensions of detached eclipsing binaries. I. The metallic-lined system WW Aurigae // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2005.—**363**.—P. 529—542.
114. *Srivastava R. K.* A new period and period changes in VZ Hydrae // Astrophys. and Space Sci.—1987.—**133**.—P. 71—79.
115. *Srivastava R. K.* An analysis of the light changes of the eclipsing binary XY Ceti in the frequency-domain // Astrophys. and Space Sci.—1987.—**138**.—P. 197—2007.
116. *Srivastava J. B., Kandpal C. D.* Photoelectric elements of the eclipsing binary TX Leo // Bull. Astron. Inst. Czech.—1968.—**19**.—P. 381—389.
117. *Sterne T. E.* Apsidal motion in binary stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1939.—**99**.—P. 451—462.
118. *Stickland D. J., Koch R. H., Pfeiffer R. J.* Spectroscopic binary orbits from ultraviolet radial velocities. X. CW Cephei (HD 218066) // Observatory.—1992.—**112**.—P. 277—281.
119. *Svechnikov M. A., Istomin L. F., Grekhova O. A.* Elaboration and application of prime criteria for mass classification of the eclipsing binaries. II. Classifications of eclipsing variables from the General Catalogue of Variable Stars, III edition and its applications // Variable Stars.—1980.—**21**, N 3.—P. 413—443.
120. *Svechnikov M. A., Perevozkina E. L.* Catalogue of orbital elements, masses and luminosities of variable stars of DMS-type and some results of its statistical treatment. — Yekaterinburg: Ural State Univ. press, 1999.—P. 1—5.— (<ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/V/121>).
121. *Terrell D., Munari U., Siviero A.* Observational studies of early-type binary stars: VV Orionis // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2007.—**374**.—P. 530—534.
122. *Tomkin J.* Secondaries of eclipsing binaries. V. EK Cephei // Astrophys. J.—1983.—**271**.—P. 717—724.
123. *Tomkin J., Popper D. M.* Rediscussion of eclipsing binaries. XV-Alpha Coronae Borealis, a main-sequence system with components of types A and G // Astron. J.—1986.—**91**.—P. 1428—1437.

124. *Torres G., Andersen J., Nordstrom B., Latham D. W.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. XXIII. The F-type system EI Cephei // *Astron. J.*—2000.—**119**.—P. 1942—1955.
125. *Torres G., Stefanik R. P., Andersen J., et al.* The absolute dimensions of eclipsing binaries. XXII. The unevolved F-type system HS Hydrae // *Astron. J.*—1997.—**114**.—P. 2764—2777.
126. *Trudel J.-L., Fernie J. D., Mochnecki S.* The eclipsing binary EG Serpentis // *Astron. J.*—1993.—**105**.—P. 2291—2298.
127. *Van Hamme W. V.* Period changes in detached close binary systems due to anisotropic ejection of mass // *Astron. and Astrophys.*—1982.—**107**.—P. 397—401.
128. *Van Hamme W. V., Hall D. S., Hargrove A. W., et al.* The two variables in the triple system HR 6469 = V819 Her: One eclipsing, one spotted // *Astron. J.*—1994.—**107**.—P. 1521—1528.
129. *Vaz L. P. R., Andersen J.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. IV. PV Puppis, a detached late A-type system with equal, intrinsically variable components // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**132**.—P. 219—228.
130. *Vaz L. P. R., Andersen J., Claret A.* Absolute dimensions of eclipsing binaries. XXV. U Ophiuchi and the evolution and composition of 5 Mo stars // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**469**.—P. 285—296.
131. *Volgenau N. H., Guinan E. F., Etzel P. B., et al.* Eclipsing binaries as astrophysical laboratories: Probing the internal structure of the moderate mass stars of CO Lacertae // *BAAS*.—1995.—**27**.—P. 878.—(American Astronomical Society, 186th AAS Meeting).
132. *Volkov I. M.* The discovery of apsidal motion in the binary system alpha CrB // *IBVS*.—1993.—N 3876.
133. *Williams D. B., Baldwin M. E., Kaiser D. H.* Photometry of the new eclipsing binary DHK 16 = SAO 80992 // *IBVS*.—1990.—N 3514.
134. *Wolf M.* Apsidal motion in southern eccentric eclipsing binaries: YY Sgr, V523 Sgr, V1647 Sgr, V2283 Sgr and V760 Sco // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**356**.—P. 134—140.
135. *Wolf M., Diethelm R., Hornoch K.* Apsidal motion in eccentric eclipsing binaries: TV Ceti and V451 Ophiuchi // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**374**.—P. 243—249.
136. *Wolf M., Diethelm R., Sarounova L.* Apsidal motion and light-time effect in the eclipsing binaries RU Monocerotis and DR Vulpeculae // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**345**.—P. 553—558.
137. *Wolf M., Harmanec P., Diethelm R., et al.* Apsidal motion and light-time effect in eclipsing binaries HS Herculis and U Ophiuchi // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**383**.—P. 533—539.
138. *Wolf M., Kuskova H., Kolasa M., et al.* Apsidal motion in eccentric eclipsing binaries: CW Cephei, V478 Cygni, AG Persei, and IQ Persei // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**456**.—P. 1077—1083.
139. *Wolf M., Sarounova L., Kozyreva V. S., Pogrocheva T.* Eccentric eclipsing binary stars as test of general relativity: the case of EW Orionis // *IBVS*.—1997.—N 4542.
140. *Wolf M., Zejda M.* Apsidal motion in southern eccentric eclipsing binaries: V539 Ara, GG Lup, V526 Sgr and AO Vel // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**437**.—P. 545—551.
141. *Yakut K., Aerts C., Morel T.* The early-type close binary CV Velorum revisited // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**467**.—P. 647—655.
142. *Young A.* A Spectroscopic orbit for the AM eclipsing system AN Andromedae // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1974.—**86**.—P. 63—66.

143. *Zahn J.-P.* Les marées dans une étoile double serrée // *Ann. Astrophys.*—1966.—**29**.—P. 313—330, 489—506, 565—591.
144. *Zahn J.-P.* Forced oscillations in close binaries. The adiabatic approximation // *Astron. and Astrophys.*—1970.—**4**.—P. 452—461.
145. *Zahn J.-P.* The dynamical tide in close binaries // *Astron. and Astrophys.*—1975.—**41**.—P. 329—344.
146. *Zahn J.-P.* Tidal friction in close binary stars // *Astron. and Astrophys.*—1977.—**57**.—P. 383—394.
147. *Zahn J.-P.* Tidal effects in close binary stars // *Proc. IAU Symp. 105, Observational tests of the stellar evolutionary theory / Ed. by A. Maeder, A. Renzini. — Dordrecht: Reidel, 1984.*—P. 379—389.
148. *Zahn J.-P.* Tidal evolution of close binary stars. I. Revisiting the theory of the equilibrium tide // *Astron. and Astrophys.*—1989.—**220**.—P. 112—116.
149. *Zasche P., Wolf M.* Combining astrometry with the light-time effect: The case of VW Cep, Phe and HT Vir // *Astron. Nachr.*—2007.—**328**.—P. 928—937.
150. *Ziznovsky J.* Noncircular orbit of TU Cam // *IBVS.*—1982.—N 2251.

Поступила в редакцию 22.07.09