

УДК 524.38

Г. Н. Дремова, М. А. Свечников

Уральский государственный университет им. А. М. Горького  
620000, Россия, Свердловская обл., г. Екатеринбург, пр. Ленина, 53

### Оценка шкал перехода разделенных двойных систем в контактные типа $\sim KW$ и $KW$

*Оцениваются временные шкалы перехода разделенных двойных систем в пределах главной последовательности (РГП-систем) в контактные двойные системы типов  $\sim KW$ ,  $KW$ . Характерные времена, необходимые для переходов вида РГП  $\rightarrow \sim KW$ , РГП  $\rightarrow KW$  и  $\sim KW \rightarrow KW$ , рассчитаны в шкале потери орбитального углового момента из-за торможения звездным тепловым магнитным ветром в предположении синхронизации осевого вращения и орбитального обращения, приводящего к сближению компонентов двойной системы. На основе полученной статистики составлены уравнения, описывающие взаимные изменения численностей участвовавших в переходах систем. Сделана оценка относительной скорости звездообразования РГП-систем.*

*ОЦІНКА ШКАЛ ПЕРЕХОДУ РАЗДІЛЕНИХ ПОДВІЙНИХ СИСТЕМ В КОНТАКТНІ ТИПУ  $\sim KW$  ТА  $KW$ , Дремова Г. Н., Свечников М. А. — Оцінюються шкали часу переходу розділених подвійних систем у межах головної послідовності (РГП-систем) в контактні подвійні системи типів  $\sim KW$ ,  $KW$ . Характерний час, необхідний для переходів виду РГП  $\rightarrow \sim KW$ , РГП  $\rightarrow KW$  та  $\sim KW \rightarrow KW$  розраховано в шкалі втрат орбітального кутового моменту через гальмування зоряним тепловим магнітним вітром при умові синхронізації осьового і орбітального обертання, що призводить до наближення компонентів подвійної системи. На основі отриманої статистики складено рівняння, в яких описуються взаємні зміни кількості систем, що брали участь у переходах. Зроблено оцінку відносної швидкості зореутворення РГП-систем.*

*ESTIMATION OF THE TIME SCALES FOR THE TRANSITION FROM DETACHED TO CONTACT CLOSE BINARIES, by Dryomova G. N., Svecnikov M. A. — The time scales for the transition of the detached binary systems located on the main sequence into the contact systems of  $DW$ - and  $KW$ -types were estimated. The characteristic times needed for the  $DMS \rightarrow DW$  and  $DMS \rightarrow KW$  transitions were estimated on the scale of the orbital angular momentum loss due to the induced rotation of dynamo action in the outer convective zone and by subsequent braking via a magnetized wind; taken into*

*account the synchronization of the orbital angular momentum with the spin rotation leading to the approaching of the components was taken into account. The statistics describing the evolutionary transitions of DMS → DW and DW → KW-types were used to build the equations for showing the mutual changes in the populations of these systems. The star formation rate of the DMS-systems was estimated.*

## ВВЕДЕНИЕ

Учет потери орбитального углового момента важен для понимания природы контактных систем. Данные наблюдений о скоростях вращения звезд в скоплениях убедительно свидетельствуют о замедлении темпа вращения звезд солнечного типа [4]. Если предположить, что это поведение обусловлено наведенным вращением динамо во внешней конвективной зоне и последующим торможением тепловым магнитным ветром, и учесть синхронизацию осевого вращения и орбитального обращения, приводящего к сближению компонентов, можно вывести формулу, описывающую потерю углового орбитального момента, как это подробно показано в работе [16]:

$$\frac{dw}{dt} = 1.8 \cdot 10^{-8} k^2 (R_1^2 M_1 + R_2^2 M_2) q^{-1} (q + 1)^2 w^{7/3} e^{-1.3/w} G^{-2/3} M_{\text{tot}}^{-5/3}. \quad (1)$$

Здесь  $M_1$  и  $M_2$  — массы главного и вторичного компонентов двойной системы,  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы компонентов,  $q$  — отношение масс  $M_1/M_2$ ,  $w$  — угловая скорость,  $k^2 = 0.1$ .

Формула (1) позволяет рассчитать характерное время, необходимое для перехода двойной системы с массой главного компонента  $M_1 < 1.5M_{\odot}$  из разделенного состояния в контактное. Такое ограничение на  $M_1$  позволяет выделить класс тесных двойных систем с развитыми конвективными оболочками, способными поддерживать мощный звездный ветер, который при наличии магнитного поля может приводить к значительной потере орбитального углового момента системой при сравнительно небольшой потере массы [3].

Поэтому основным механизмом потери орбитального углового момента мы будем считать магнитное торможение, которое возникает в результате взаимодействия звездного ветра с поверхностным магнитным полем. Подобный механизм, обеспечивающий интенсивную потерю углового момента, приводящую к сближению компонентов, позволяет объяснить положение маломассивных двойных систем с  $M_1 < 1.5M_{\odot}$  в «запрещенной» области на диаграмме «большая полуось —  $M_1$ » [5].

Вопрос о происхождении контактных систем определяется их большой распространенностью [17]. Идея об эволюции контактных систем из разделенных благодаря потере углового момента выдвигалась еще в 1960-е годы [10, 13] и подтверждается в современных работах [2, 14, 16, 18].

Объектами нашего исследования являются маломассивные короткопериодические РГП-системы с массой главного компонента  $M_1 \leq 1.5M_{\odot}$ , ~KW- и KW-системы из «Каталога приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменно-переменных звезд» [9]. Эти сокращения приняты согласно классификации [8]:

РГП — разделенные системы главной последовательности — ТДС с обоими компонентами, расположенными в пределах ГП.

~KW — системы, подобные KW, — маломассивные системы спектральных типов F—K, не являющиеся контактными, но более тесные, чем РГП-системы с такими же массами и обладающие по многим характеристикам сходством с системами типа KW.

Таблица 1. Временные шкалы достижения контакта для маломассивных РГП-систем, взятых из каталога [9]

РГП-системы с $M_1 \leq 1.5M_{\odot}$ из каталога приближенных элементов	P, сут	Возраст, определенный для системы по изохронам (M - R), млн лет	Временная шка- ла достижения стадии ~KW-сис- тем, млн лет	Временная шка- ла достижения контактной фазы, млн лет	Период систе- мы на мо- мент контакт- ной фазы, сут
1 AP And	1.587	3450	1800 ( $P = 1.0^d$ )	2580	0.628
2 BW Aqr	6.72	3890	—	4480	6.3451
3 KP Aql	3.367	3790	—	3940	2.214
4 V871 Aql	2.953	5300	—	4740	1.657
5 V623 Ara	1.719	ZMS	—	—	—
6 HP Aur	1.423	5270	1740 ( $P = 1.0^d$ )	2580	0.68
7 HS Aur	9.815	5740	—	11740	9.67
8 ZZ Boo	4.992	4120	—	1360	4.662
9 AN Cam	20.999	7980	—	400	20.987
10 GR Car	17.14	4130	—	4380	17.100
11 HV Car	2.584	3270	—	2880	1.705
12 QS Car	9.321	3540	—	4380	9.13
13 IT Cas	3.897	3740	—	4640	3.074
14 V636 Cen	4.284	5290	—	4740	3.676
15 V687 Cen	1.896	4570	3040 ( $P = 1.0^d$ )	3440	0.802
16 V692 Cen	1.724	3270	2240 ( $P = 1.0^d$ )	2860	0.698
17 CY Cep:	1.646	3280	1800 ( $P = 1.0^d$ )	2120	0.831
18 EI Cep	8.439	4870	—	600	8.376
19 EX Cep	1.675	9900	—	1120	1.193
20 TV Cet	9.103	3890	—	3900	8.9
21 VX Cet	2.721	4150	—	4240	1.668
22 RZ Cha	2.832	7020	—	740	2.342
23 V442 Cyg	2.386	4900	—	1260	1.879
24 V809 Cyg	1.964	4800	3580 ( $P = 1.0^d$ )	3660	0.963
25 V1061 Cyg	2.347	4240	—	4420	1.265
26 V1143 Cyg	7.64	4570	—	3780	7.385
27 V1161 Cyg	3.195	4490	—	4460	2.312
28 RX Dra	3.786	8010	—	500	3.56~
29 UZ Dra	3.261	7760	—	1160	2.819~
30 BS Dra	3.364	4170	—	4300	2.188
31 BU Dra	3.828	4170	—	4440	2.956
32 CM Dra	1.268	out	—	—	—
33 CO Eri	5.783	4170	—	4340	5.351
34 CW Eri	2.728	4760	—	1280	2.237
35 CU Gem	3.03	3260	—	3320	1.712
36 EL Gem	1.428	4190	1400 ( $P = 1.0^d$ )	2380	0.583
37 GU: Her	4.343	7980	—	940	4.095
38 V678 Her	1.389	5290	1580 ( $P = 1.0^d$ )	2820	0.56~
39 VZ Hya	2.904	4570	—	3800	1.945
40 AI Hya:	8.289	5580	—	620	8.2
41 GK Hya	3.587	10330	—	960	3.068
42 GN Hya	2.249	4180	—	4200	1.067
43 HS Hya	1.568	3550	1680 ( $P = 1.0^d$ )	2400	0.65
44 RW Las	10.369	6310	—	1480	10.269
45 FL Lyr	2.178	4180	—	4200	1.063
46 UX Men	4.181	4570	—	4340	3.428
47 FS Mon	1.906	3890	2640 ( $P = 1.0^d$ )	2980	0.805
48 HY Mon:	1.566	4550	1940 ( $P = 1.0^d$ )	2840	0.595
49 WZ Oph	4.183	4550	—	4360	3.349
50 V549 Oph	1.344	5290	560 ( $P = 1.0^d$ )	2460	0.528
51 V920 Oph	1.550	4180	1820 ( $P = 1.0^d$ )	2720	0.599
52 EW Ori	6.937	5290	—	4720	6.618
53 V530 Ori	6.11	8740	—	1280	5.9
54 BK Peg	5.49	7310	—	1200	5.21
55 NP Per	4.457	7400	—	5060	3.687
56 AI Phe:	24.5920	7790	—	960	24.59
57 DD Pup	13.743	5270	—	4740	13.6749
58 LT Pup	1.643	5270	2640 ( $P = 1.0^d$ )	3500	0.664
59 TY Pyx	3.198	8740	—	1280	2.678
60 V523 Sqr	2.324	4910	—	1240	1.66
61 V782 Sqr:	2.53	3260	—	2880	1.584
62 V1561 Sqr	1.483	3260	1160 ( $P = 1.0^d$ )	1600	0.749
63 V457 Sco	2	3890	2820 ( $P = 1.0^d$ )	4100	0.838

Окончание табл. 1

РГП-системы с $M_1 \leq 1.5M_{\odot}$ из каталога приближенных элементов			P, сут	Возраст, определенный для системы по изохронам (M - R), млн лет	Временная шка- ла достижения стадии ~KW-сис- тем, млн лет	Временная шка- ла достижения контактной фазы, млн лет	Период систе- мы на мо- мент контакт- ной фазы, сут
64	V566	Sco	6.915	3260		2940	6.65
65	V585	Sco	1.978	5290	3900 ( $P = 1.0^d$ )	4160	0.865
66	V923	Sco	34.827	3580		3240	34.825
67	CD	Tau	3.435	6310		1480	2.785
68	CF	Tau	2.756	7930		820	2.396
69	ZZ	UMa	2.299	3570		4840	1.087
70	DM	Vir	4.669	6310		1480	4.21
71	V808	Aql:	1.574	3260	1600 ( $P = 1.0^d$ )	2020	0.789

Таблица 2. Временные шкалы достижения контакта для ~KW-систем, взятых из каталога [9]

Каталог приближенных элементов ~KW		Период системы, сут	Возраст, определенный для системы по изохронам (M - R), млн лет	Временная шкала достижения контактной фазы, млн лет	Период системы на момент контактной фазы, сут
1	RT And	0.629	4195	320	0.475
2	WZ And	0.695	3280	340	0.498
3	BX And	0.610	3880	65	0.541
4	DS And	1.010	5580	100	0.948
5	HT Aps:	0.400	3190	240	0.326
6	DX Aqr	0.472	6290	100	0.42
7	V609 Aql	0.796	4800	770	0.526
8	V640 Aql	0.561	5690	220	0.488
9	V724 Aql	0.518	5290	40	0.5
10	V999 Aql	0.433	3190	340	0.33
11	V421 Aql	0.572	6910	440	0.415
12	V783 Aql	0.464	3180	440	0.332
13	EI Aur	1.227	5270	2120	0.514
14	KO Aur	1.318	5480	2260	0.571
15	SV Cam	0.593	5270	420	0.446
16	AZ Cam	1.319	5580	400	1.057
17	VY Cnc:	0.719	8736	already contact	
18	WX Cnc	1.224	3280	1840	0.57
19	WY Cnc	0.829	7400	1180	0.432
20	VV CVn	0.533	5690	280	0.432
21	VZ CVn	0.842	3880	620	0.576
22	DE CMa	0.695	4130	420	0.519
23	TW CMi	1.079	5690	1740	0.486
24	UZ CMi	0.762	4560	700	0.482
25	YY CMi	1.094	7970	200	0.968
26	AC CMi	0.789	4130	700	0.525
27	DS Car	1.099	5690	1900	0.505
28	NT Cas	1.122	5740	2500	0.422
29	OR Cas	1.246	3540	1780	0.605
30	V366 Cas	0.729	6880	500	0.514
31	ST Cen	1.223	8700	300	1.019
32	BD Cen	1.201	7340	120	1.126
33	OX Cen	0.467	5740	300	0.364
34	V585 Cen	0.614	4480	440	0.457
35	NR Cep	0.949	6920	1500	0.451
36	OT Cep	0.962	4570	1240	0.507
37	RS Col	0.672	5270	580	0.450
38	RV Crt	1.170	4260	2100	0.525
39	WW Cru	1.148	5290	2100	0.506
40	BF Cru	0.499	5270	180	0.432
41	CG Cyg	0.631	4700	900	0.362
42	CV Cyg	0.983	7990	80	0.927
43	OU Cyg	0.560	3540	120	0.509
44	V466 Cyg	1.392	4170	2000	0.631
45	V488 Cyg	0.560	5270	340	0.439
46	V490 Cyg	1.140	7800	500	0.89
47	V505 Cyg	0.668	3280	180	0.582

## ОЦЕНКА ШКАЛ ПЕРЕХОДА РАЗДЕЛЕННЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Продолжение табл. 2

Каталог приближенных элементов ~KW	Период системы, сут	Возраст, определенный для системы по изохронам (M - R), млн лет	Временная шкала достижения контактной фазы, млн лет	Период системы на момент контактной фазы, сут
48 V706 Cyg	0.466	6930	160	0.406
49 V426 Cyg	0.498	4480	120	0.452
50 V736 Cyg:	0.654	5690	620	0.439
51 V753 Cyg	0.476	4560	60	0.453
52 V807 Cyg	0.799	3260	400	0.606
53 V871 Cyg	1.119	5800	400	0.857
54 V880 Cyg	1.060	4480	1740	0.512
55 V884 Cyg:	0.480	6920	180	0.412
56 V1045 Cyg	0.448	5740	240	0.365
57 V1314 Cyg:	0.629	7380	600	0.416
58 V1321 Cyg	0.728	5270	720	0.458
59 V1401 Cyg	1.183	5580	240	0.99
60 V1457 Cyg:	0.684	5690	700	0.444
61 FI Del	0.416	НГП	480	0.29
62 GG Del	0.563	4180	240	0.472
63 ZZ Eri	0.452	5740	240	0.371
64 AN Eri:	0.428	5740	180	0.366
65 BZ Eri	0.664	3870	280	0.542
66 YY Gem	0.814	out	—	—
67 GX Gem	1.35	11080	560	1.042
68 KQ Gem:	0.408	3200	260	0.327
69 MT Her:	0.488	3081	already contact	—
70 V772 Her:	0.880	5700	1280	0.465
71 EU Hya:	0.778	3880	540	0.558
72 IP Lac	0.852	4480	960	0.487
73 TY Leo	1.185	7400	2220	0.491
74 UV Leo	0.6	5270	400	0.448
75 UX Leo	1.007	3280	1360	0.53
76 WX Lib	0.46	out	—	—
77 IP Lyr	0.473	5740	300	0.371
78 OT Lyr:	0.471	3200	460	0.334
79 V376 Lyr	0.767	5880	940	0.453
80 HM Mon	0.408	6240	100	0.371
81 NS Mon	0.939	5270	1300	0.477
82 V380 Mon	0.996	3020	920	0.584
83 V457 Mon	0.951	3560	740	0.611
84 V515 Mon	0.874	3880	680	0.575
85 EV Mus:	0.756	4560	600	0.526
86 WW Nor	1.271	5270	2500	0.525
87 BG Nor:	0.494	4700	440	0.354
88 IW Nor	0.333	2850	40	0.32
89 LU Nor:	0.476	2850	500	0.330
90 V506 Oph	1.060	4500	460	0.780
91 V527 Oph	0.775	3180	600	0.535
92 V537 Oph	1.147	3260	1000	0.669
93 V868 Oph	0.443	3200	380	0.328
94 V924 Oph:	0.360	out	already contact	—
95 V941 Oph	1.197	3200	3400	0.382
96 V343 Ori:	0.809	5320	140	0.721
97 V641 Ori:	0.451	6520	140	0.399
98 V647 Ori	0.978	7800	240	0.849
99 EL Pav:	1.144	5270	2100	0.504
100 KR Pav	0.484	out	already contact	—
101 CZ Peg	0.562	6260	380	0.427
102 DV Peg	0.946	7060	180	0.823
103 FL Peg:	0.474	6920	180	0.407
104 V449 Per	0.949	out	—	—
105 WW Phe	0.720	3740	620	0.493
106 RV Psc	0.554	4800	200	0.467
107 UV Psc	0.861	5680	1220	0.466
108 AV Pup	0.556	4480	240	0.461
109 GX Pup	0.608	6920	540	0.417
110 CU Sge	0.792	6780	200	0.688
111 CW Sge	0.660	4120	320	0.517
112 DR Sge	0.845	2840	1940	0.346
113 FP Sge:	0.642	out	—	—

Окончание табл. 2

Каталог приближенных элементов ~KW	Период системы, сут	Возраст, определенный для системы по изохронам (M - R), млн лет	Временная шкала достижения контактной фазы, млн лет	Период системы на момент контактной фазы, сут
114 GO Sge:	0.400	out	—	
115 V768 Sgr:	1.156	6300	620	0.821
116 V1240 Sgr	0.546	6920	360	0.416
117 V1276 Sgr	0.348	out	already contact	
118 V1487 Sgr	1.186	4180	2020	0.542
119 V562 Sco	1.055	4440	500	0.761
120 V581 Sco:	0.511	5270	200	0.437
121 V586 Sco:	0.956	2840	2420	0.351
122 V612 Sco	1.063	5270	1840	0.492
123 V616 Sco	0.844	4480	1000	0.483
124 V627 Sco	0.832	7380	1180	0.437
125 V628 Sco	1.170	4440	720	0.781
126 V633 Sco:	0.493	6060	140	0.44
127 V642 Sco:	0.863	4800	1080	0.498
128 V710 Sco:	0.442	2840	400	0.323
129 V837 Sco	0.879	4120	940	0.532
130 RS Sct	0.664	4300	260	0.554
131 EY Sct	1.166	4120	1580	0.573
132 V356 Sct	1.061	4800	1540	0.52
133 RS Ser	0.598	4800	320	0.468
134 TY Tau:	1.077	3200	2880	0.37
135 AP Tau	0.972	out	—	
136 EN Tau:	1.239	5270	2400	0.519
137 PR Tel	0.591	4120	180	0.51
138 ST Tri	0.754	5270	120	0.435
139 EL TrA	0.546	5270	300	0.437
140 GN TrA	0.615	5270	480	0.447
141 HV TrA	0.591	4480	360	0.461
142 XY UMa	0.479	5700	140	0.426
143 BS UMa	0.437	out	—	
144 BC Vel	1.174	7980	360	0.931
145 BI Vel	0.419	out	—	
146 BW Vel	0.491	4800	80	0.459
147 DL Vel	0.564	5270	340	0.442
148 BH Vir	0.817	5270	1040	0.461
149 CX Vir	0.746	7300	80	0.704
150 BT Vul	1.141	4800	1760	0.533
151 BU Vul	0.569	5270	360	0.44
152 ER Vul	0.698	5270	700	0.454
153 GI Vul	0.481	5270	180	0.416

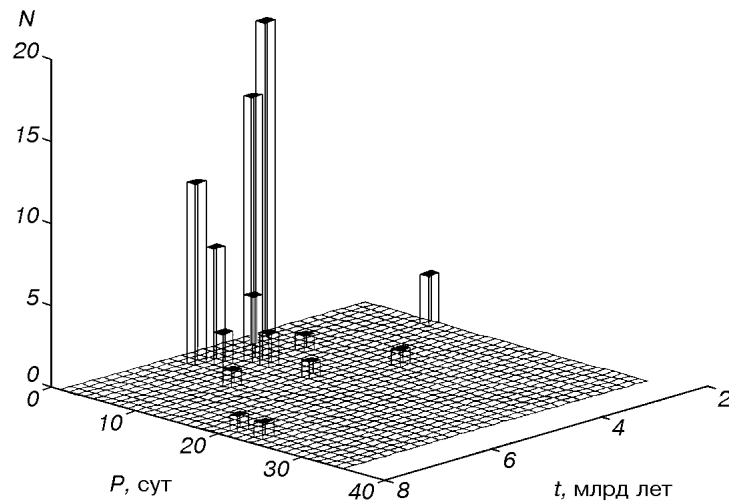
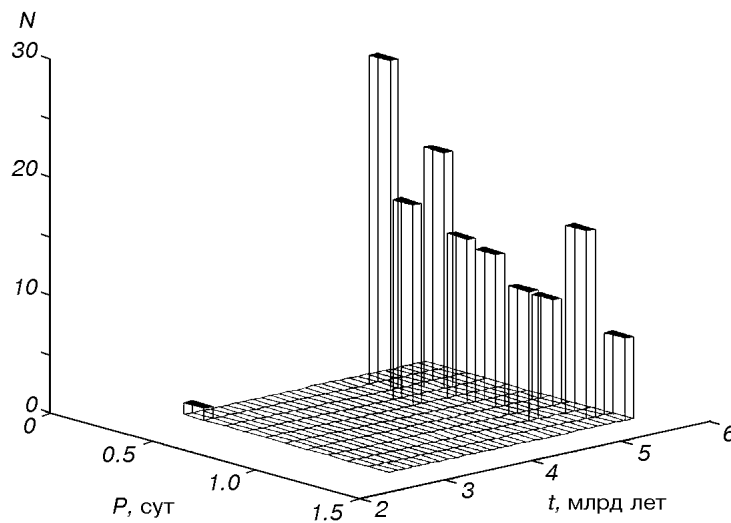
KW — контактные системы типа W UMa — с обоими компонентами, сравнительно близкими к соответствующим внутренним критическим поверхностям (ВКП), с периодами  $P \leq 0.5^d$  и спектрами главных компонентов  $S_{p_1}$ , более поздними, чем  $\approx F0$ .

Численность маломассивных РГП-систем оказалась 71, а ~KW-систем — 153. В табл. 1, 2 приведены названия этих систем по каталогу и их орбитальные периоды.

#### ПОСТРОЕНИЕ ШКАЛ ДЛЯ ПЕРЕХОДА ИЗ РГП- В ~KW- И ИЗ ~KW- В KW-СИСТЕМЫ

Расчет шкал для эволюции разделенных систем в контактные зависит от их начальных периодов. Но для вновь сформированных двойных систем мало известно об орбитальных периодах.

Первоначально мы вычислили возрасты, которые содержатся в третьей графе табл. 1, для исследуемых РГП-систем методом изохрон. Этот метод

Рис. 1. Распределение РГП-систем с  $M_1 \leq 1.5M_\odot$  по орбитальным периодам и возрастамРис. 2. Распределение  $\sim$ KW-систем по орбитальным периодам и возрастам

развит в работе [1] на основе эволюционных звездных моделей [12] с учетом конвективного проникновения и потери массы компонентами. На гистограмме рис. 1 видно, что большинство РГП-систем с  $M_1 \leq 1.5M_\odot$  сосредоточены в диапазоне орбитальных периодов  $1.3\text{--}3.8^d$  с возрастными 3—6 гигаlet. С этого момента, однозначно определяемого положением РГП-систем на главной последовательности, мы рассчитывали их дальнейшую эволюцию в шкале потери углового момента с использованием уравнения (1).

Аналогично для  $\sim$ KW-систем вычисляются возрасты методом изохрон (третья графа табл. 2). На гистограмме рис. 2 видно, что  $\sim$ KW-системы, независимо от своего орбитального периода ( $0.5\text{--}1.3^d$ ), имеют возраст около 5 гигаlet. Считая класс  $\sim$ KW-систем промежуточным в эволюционном развитии между маломассивными короткопериодическими разделенными двойными типа РГП и контактными типа KW, можно оценить время из того

же уравнения (1), за которое  $\sim$ KW-системы станут контактными в шкале потери углового момента.

В формуле (1) нет свободных параметров, хотя сюда входят эмпирические величины. Эта формула выведена [16] из соотношений, полученных для одиночной вращающейся звезды, для которой потеря собственного углового момента путем теплового магнитного звездного ветра эквивалентна угловому моменту, выносимому веществом звездного ветра, строго совращающимся с альвеновской поверхностью.

Рассматриваются радиальная и дипольная геометрии магнитного поля в предположении скорости теплового магнитного звездного ветра, равной скорости звука и постоянного темпа потери массы компонентами.

Напряженность магнитного поля, зависящая лишь от спектрального типа, а не от скорости вращения для звезд ГП [15] и фактор наполнения, который указывает процент звездной поверхности, покрытый магнитным полем, определяются из измерений, что объясняет эмпирический характер формулы.

Приведем некоторые базовые формулы из работы [16]. Орбитальный угловой момент двойной системы равен

$$H_{\text{orb}} = w_{\text{orb}}(M_1 a_1^2 + M_2 a_2^2), \quad (2)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — большие полуоси главной и вторичной составляющих соответственно.

Учитывая, что  $q = M_1/M_2$  и  $M_{\text{tot}} = M_1 + M_2$ , получим

$$H_{\text{orb}} = G^{2/3} M_{\text{tot}}^{5/3} w_{\text{orb}}^{-1/3} q(1+q)^{-2}. \quad (3)$$

Собственный угловой момент обоих компонентов записывается в виде

$$H_{\text{spin}}^{\text{bin}} = k_1^2 R_1^2 M_1 w_1 + k_2^2 R_2^2 M_2 w_2, \quad (4)$$

где  $k_1 R_1$  и  $k_2 R_2$  являются радиусами вращения компонентов.

Полный угловой момент равен сумме собственного и орбитального угловых моментов двойной системы  $H_w = H_{\text{spin}}^{\text{bin}} + H_{\text{orb}}$ . С другой стороны, собственный угловой момент двойной системы по своей величине на два порядка меньше, чем орбитальный угловой момент этой системы. Следовательно, полный угловой момент можно грубо считать равным орбитальному угловому моменту  $H_w \approx H_{\text{orb}}$ .

Если полагать, что изменение орбитального углового момента полностью синхронизировано с изменением собственного углового момента (условие полной синхронизации означает, что  $w_1 = w_2 = w_{\text{orb}}$  и  $k_1 = k_2 = k$ ), то согласно [16]

$$\frac{dH_{\text{orb}}}{dt} = \frac{dH_{\text{spin}}^{\text{bin}}}{dt}. \quad (5)$$

Пренебрегая изменением масс компонентов со временем, можно получить из (3)

$$\frac{dH_{\text{orb}}}{dt} = -\frac{1}{3} G^{2/3} M_{\text{tot}}^{5/3} q(1+q)^{-2} w_{\text{orb}}^{-4/3} \frac{dw_{\text{orb}}}{dt}. \quad (6)$$

Дифференцируя по времени  $H_{\text{spin}}^{\text{bin}}$  в предположении постоянства масс и радиусов компонентов, получаем:

$$\frac{dH_{\text{spin}}^{\text{bin}}}{dt} = -6 \cdot 10^{-9} k^2 (R_1^2 M_1 + R_2^2 M_2) w e^{-1.3/w}. \quad (7)$$

Поэтому из равенства (5) можно получить формулу (1).



Уравнение (1) мы интегрировали методом Рунге—Кутты 4-го порядка с шагом по времени 5 млн лет, пересчитывая при этом по эволюционным трекам [12] массы и радиусы компонентов, размеры полостей Роша, отражающие изменения орбиты в результате уменьшения углового момента, и орбитальный период системы. Для каждой из 71 РГП-системы и 153  $\sim$ KW-систем мы составляли подобное уравнение, результаты вычислений приведены в табл. 1 и 2.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

В четвертой графе табл. 1 приведены шкалы в миллионах лет, требующиеся для перехода РГП-систем в  $\sim$ KW-системы. Эти системы еще далеки от контакта, но их физические характеристики во многом подобны KW-системам (в литературе такие системы часто называются короткопериодическими RS CVn). В частности, характерный период для  $\sim$ KW-систем составляет  $1^d$ . Поэтому мы считали уменьшение орбитального периода РГП-систем по

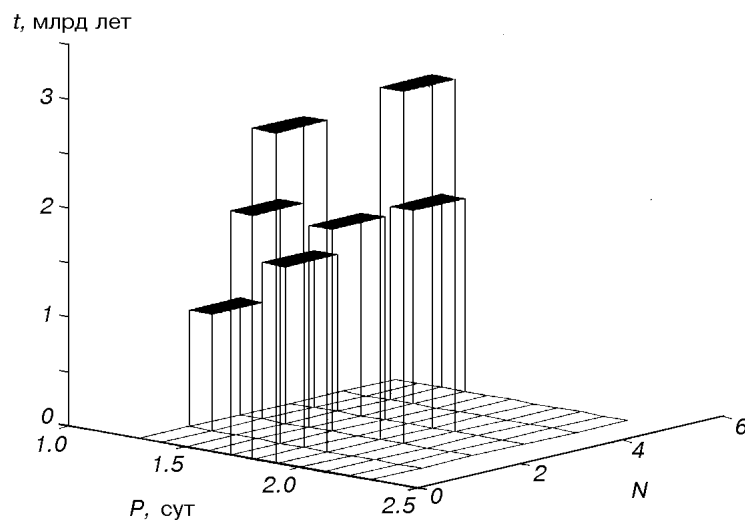


Рис. 3. Распределение РГП-систем с  $M_1 \leq 1.5M_{\odot}$  по орбитальным периодам и временным шкалам, необходимыми для перехода РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW

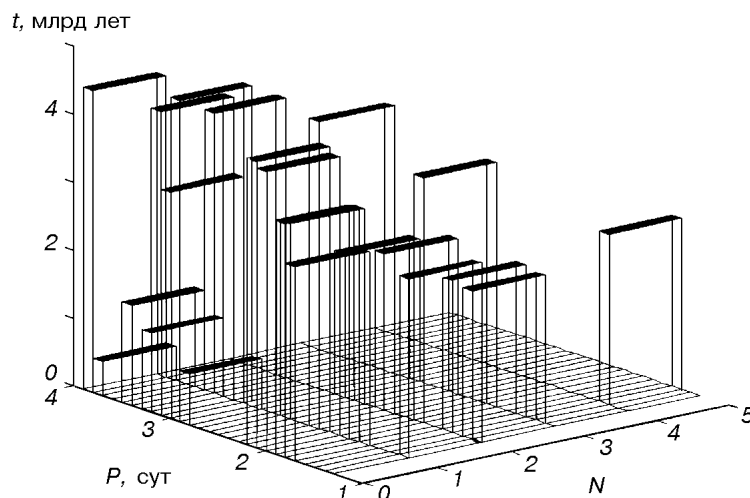


Рис. 4. Распределение РГП-систем с  $M_1 \leq 1.5M_{\odot}$  по орбитальным периодам и временным шкалам, необходимыми для перехода РГП  $\rightarrow$  KW

формуле (1) до этого граничного значения. Гистограмма на рис. 3 отражает тенденцию увеличения временных шкал для перехода РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW с увеличением орбитальных периодов РГП-систем.

Следует отметить, что не все маломассивные РГП-системы в своем переходе в  $\sim$ KW-системы, смогли удовлетворить критерию  $\sim$ KW-систем. Еще до того, как их период стал равен  $1^d$ , главный компонент уже заполнил свою полость Роша. Этот момент мы считали началом контакта. Такое предположение допустимо в силу того, что продолжительность фазы заполнения полости Роша веществом, перетекающего с главного компонента при темпе потери массы  $10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$  для маломассивной РГП-системы в изотермической шкале составляет приблизительно  $10^7$  лет. Поэтому мы разделили маломассивные РГП-системы на системы  $N_{1\text{РГП}}$ , которые превратились сначала в  $\sim$ KW-, а потом в KW-системы, и системы  $N_{2\text{РГП}}$ , которые превратились сразу в KW-системы.

В пятой графе табл. 1 содержатся временные шкалы для перехода РГП-систем в KW-системы. Этот класс контактных систем имеет характерные периоды  $0.35\text{--}0.4^d$ . Мы также проводили расчет до заполнения полости Роша главным компонентом.

На гистограмме рис. 4 распределение числа РГП-систем сохраняет ту же тенденцию, что и в случае перехода РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW. В интервалах изменения орбитального периода  $2.8\text{--}2.9^d$ ,  $3.2\text{--}3.3^d$  и  $3.7\text{--}3.8^d$  содержится

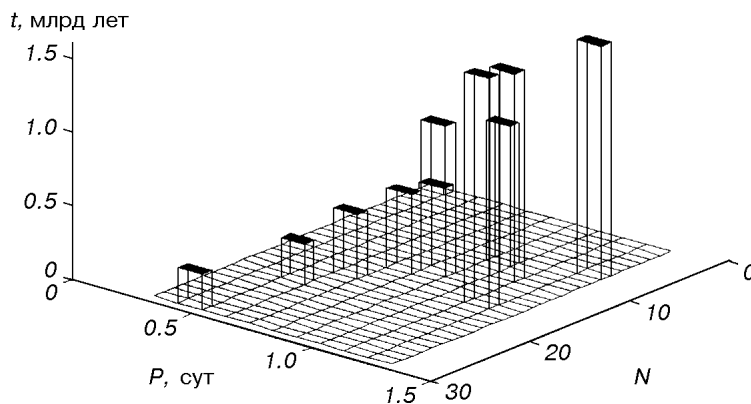


Рис. 5. Распределение  $\sim$ KW-систем по орбитальным периодам и временным шкалам, необходимым для перехода  $\sim$ KW  $\rightarrow$  KW

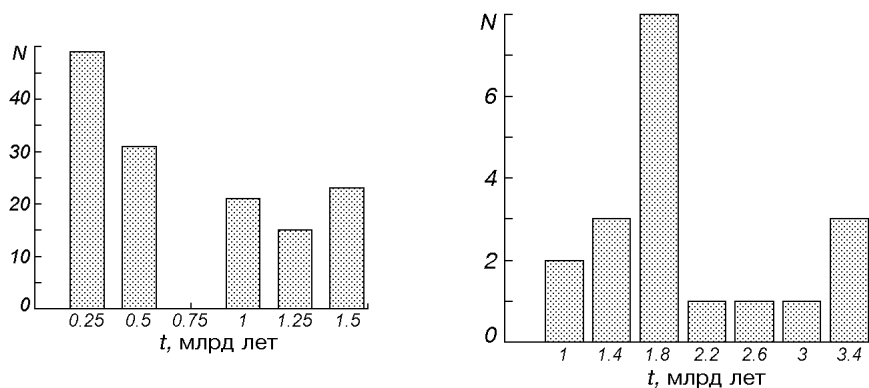


Рис. 6. Распределение  $\sim$ KW-систем по временным шкалам, необходимым для перехода  $\sim$ KW  $\rightarrow$  KW

Рис. 7. Распределение РГП-систем по временным шкалам, необходимым для перехода РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW

по одной РГП-системе, возраст которых 7 гигаlet. Возможно, они уже долго находятся в стадии перехода в KW-системы.

В четвертой графе табл. 2 приведены временные шкалы для эволюционного перехода  $\sim$ KW-систем в контактные типа KW. На гистограмме рис. 5 четко прослеживается увеличение временной шкалы перехода  $\sim$ KW  $\rightarrow$  KW с увеличением орбитального периода. Максимум в распределении  $\sim$ KW-систем попадает в интервал периодов  $0.4\text{--}0.5^d$  и соответствует временной шкале перехода  $\sim$ KW  $\rightarrow$  KW 250 миллионов лет (рис. 6), тогда как в распределении РГП-систем шкала для перехода РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW в максимуме распределения составляет 1.8 гигаlet (рис. 7).

Следующая часть работы затрагивала вопрос сравнения статистики РГП- и  $\sim$ KW-систем, исправленной за вероятность открытия. Полная вероятность открытия для РГП- и  $\sim$ KW-систем как затменно-переменных звезд строилась как функция  $W(M_1, A, q, i)$  от массы главного компонента  $M_1$ , большой полуоси орбиты системы  $A$ , отношения масс  $q$ , угла наклона орбиты  $i$ . Для каждой системы типа РГП (их общее число 18), участвовавшей в переходе РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW, для каждой  $\sim$ KW-системы с  $P \approx 1.2^d$ , взятой из каталога (22 системы), и для каждой KW-системы индивидуально вычислялись вероятности  $W^*$  их открытия.

Расчет проводился путем последовательной линейной интерполяции между известными табличными вероятностями, взятыми из работ [6, 7] при фиксированных значениях  $M_1, A, q, i$  на конкретное значение массы главного компонента, большой полуоси, отношения масс, угла наклона орбиты данной звезды. Просуммировав по заданным интервалам изменения орбитального периода до значения  $1.2^d$  и массы главного компонента до  $1.5M_\odot$ , получилось, что  $N_{1\text{РГП}} = 2320$  и  $N_{\sim\text{KW}} = 3570$  для перехода РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW и  $N_{2\text{РГП}} = 3970$  и  $N_{\text{KW}} = 2850$  для перехода РГП  $\rightarrow$  KW (в каталоге содержится 227 KW-систем,  $M_1 \leq 1.5M_\odot, P = 0.2\text{--}0.5^d, q \geq 0.3, i \geq 65^\circ$ ).

Подобная оценка эволюционных переходов воспроизводит сопоставимые по численности классы разделенных и контактных систем  $N_{1\text{РГП}} + N_{2\text{РГП}} \approx N_{\sim\text{KW}} + N_{\text{KW}}$ . Из рассматриваемой выборки РГП-систем (71 по каталогу) больше половины (40 систем) реализовались в эволюционных переходах РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW и РГП  $\rightarrow$  KW. Остальные системы, имея период  $P \geq 4^d$ , не достигли состояния контакта.

На основе полученной статистики по эволюционным переходам РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW и РГП  $\rightarrow$  KW были составлены уравнения, описывающие взаимные изменения численностей, участвовавших в переходах систем:

$$\frac{dN_{\text{РГП}}}{dt} = -N_{\text{РГП}} k_1 + X, \quad (8)$$

$$\frac{dN_{\sim\text{KW}}}{dt} = -N_{\sim\text{KW}} k_2 + N_{\text{РГП}} k_3, \quad (9)$$

$$\frac{dN_{\text{KW}}}{dt} = N_{\text{РГП}} k_4 + N_{\sim\text{KW}} k_2 - Y, \quad (10)$$

где  $X$  — функция звездообразования РГП-систем,  $Y$  — функция, описывающая дальнейшее эволюционное превращение KW-систем.

Для нахождения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  были исследованы зависимости числа систем данного типа, исправленного за вероятность открытия, от времени  $t$ . Аппроксимируя полиномами третьей степени зависимости  $N_{\text{РГП}}(t)$  и  $N_{\sim\text{KW}}(t)$  и вычислив производные по времени от них на момент  $t = 0$ , можно оценить темп изменения численности этих систем, участвовавших в эволюционных переходах РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW и  $\sim$ KW  $\rightarrow$  KW. Отсюда легко

определить коэффициенты  $k_1 = 1.413 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$  и  $k_2 = 2.28 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$ .

Определим вероятность эволюционных переходов РГП  $\rightarrow \sim\text{KW}$  и  $\sim\text{KW} \rightarrow \text{KW}$  как  $W_1 = \frac{N_{1\text{РГП}}}{N_{1\text{РГП}} + N_{2\text{РГП}}} = 0.3688$  и  $W_2 = \frac{N_{2\text{РГП}}}{N_{1\text{РГП}} + N_{2\text{РГП}}} = 0.6312$ , тогда  $k_3 = 5.211 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$  и  $k_4 = 8.918 \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$  легко находятся как  $k_1 W_1$  и  $k_1 W_2$ . Полагая процесс звездообразования РГП-систем стационарным, функция звездообразования однозначно вычисляется как  $k_1 N_{\text{РГП}}$ . Вид функции  $Y$  остается неизвестным, поскольку мы не отслеживали дальнейшую эволюцию KW-систем и считали, что в контакте они пребывают очень долго.

Относительная скорость звездообразования РГП-систем, выполненная безотносительно к галактическому объему и оцениваемая как  $\left(-\frac{dN_{\text{РГП}}}{dt}\right)_{t=0}$  из (8) составляет 0.889 систем за миллион лет. Другой способ, позволяющий оценить относительную скорость звездообразования РГП-систем, основан на зависимости числа РГП-систем, возраст которых не превышает некоторое граничное значение, от этого граничного значения  $t_{\text{age}}^{\text{bd}}$ . Определяя среднее значение производной на линейном участке кривой  $N_{\text{РГП}}(t_{\text{age}}^{\text{bd}})$ , можно получить оценку  $\left(\frac{dN_{\text{РГП}}}{d(t_{\text{age}}^{\text{bd}})}\right)_{t_{\text{age}}^{\text{bd}}=5\text{Gyr}} = 1.089$  систем за миллион лет, что неплохо согласуется с предыдущей оценкой. Эти две независимые оценки относительной скорости звездообразования РГП-систем сделаны исключительно на материале каталога [9].

#### СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценка шкал для перехода из РГП- в  $\sim\text{KW}$ -системы показала, что максимальная длительность таких процессов составляет 3.9 гигаlet при исходном периоде  $P = 1.98^{\text{d}}$  РГП-системы (табл. 1, номер 65, V585 Sco), возраст которой 5.3 гигаlet. Минимальная шкала в подобном переходе иллюстрируется на примере РГП-системы (табл. 1, номер 62, V1561 Sqr) с периодом  $1.48^{\text{d}}$  и возрастом 3.26 гигаlet и равна 1.16 гигаlet. Характерное время для эволюционного перехода РГП- в  $\sim\text{KW}$ -системы оценивается порядка 1.8 гигаlet (рис. 7).

Для анализа переходов РГП-систем в KW-системы можно привести аналогичные временные масштабы для сравнения. Максимальная шкала достигает 4.8 гигаlet (табл. 1, 69, ZZ UMa,  $P = 2.3^{\text{d}}$ , возраст 3.5 гигаlet), минимальная шкала составляет 1.24 гигаlet (табл. 1, 60, V523 Sqr,  $P = 2.32^{\text{d}}$ , возраст 4.9 гигаlet). Системы 19 EX Cep, 22 RZ Cha, 28 RX Dra, 29 UZ Dra, 68 CF Tau нельзя рассматривать в качестве примеров, иллюстрирующих минимальные шкалы для достижения контактного состояния, потому что возраст этих систем порядка 7—10 гигаlet. Вероятно, они уже долго пребывают в контактной стадии. Характерное время для переходов РГП- в KW-системы из расчетов получилось порядка 4 гигаlet.

Эти результаты согласуются с выводами [16], где сравнение наблюдаемой и предсказанной частоты встречаемости контактных звезд среди звезд поля требует длительности контактной фазы несколько гигаlet, от 2 до 6 гигаlet.

Наибольший период, при котором тесная двойная система становится контактной за время жизни галактического диска, принятого 12 гигаlet, составляет  $5^{\text{d}}$ , поэтому РГП-системы с периодами больше  $5^{\text{d}}$  в расчет контакта не попали.

Если временная шкала, типичная для переходов вида РГП  $\rightarrow$   $\sim$ KW и РГП  $\rightarrow$  KW составляет 1.8—4 гигаlet, то совсем другие масштабы получаются при переходах  $\sim$ KW  $\rightarrow$  KW. Характерная шкала такого процесса оценивается в 250 млн лет (рис. 6).

По результатам вычислений, сделанных в работе [16], оказалось, что минимальная шкала достижения контактного состояния составляет 1 гигаlet при начальном периоде  $1^d$ . Если начальный период равен  $2^d$ , то соответствующая шкала составит 2.5 гигаlet. Двойная система при  $2^d < P \leq 2.7^d$  сможет превратиться в контактную за период 4 гигаlet, а при  $P = 3.4^d$  потребуется около 6 гигаlet.

Число контактных систем существенно увеличивается за период 4-5 гигаlet, что согласуется с наблюдениями. В обзоре о членстве контактных двойных систем в рассеянных скоплениях [11] показано, что все скопления, возраст которых превышает 4 гигаlet, содержат много контактных систем, в то время как их численность резко сокращается в молодых скоплениях.

1. Дремова Г. Н., Свечников М. А. // Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей затменно-переменных звезд типа РГП и некоторые результаты его статистической обработки. — Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 1999.—С. 31—60.
2. Дремова Г. Н., Свечников М. А. Исследование эволюционной связи разделенных и контактных двойных систем // Астрон. журн.—2001.—78, № 3.—С. 248—252.
3. Попова Е. И., Тутуков А. В., Юнгельсон Л. Р. ( $a, M_1$ ) — диаграмма для спектроскопических двойных // Письма в Астрон. журн.—1982.—8, № 5.—С. 297—301.
4. Пустыльник И. Б. Тесные двойные системы: эффекты взаимодействия // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия.—1989.—36.—С. 43—46.
5. Свечников М. А. Статистические исследования тесных двойных звезд // Исследование эффектов взаимодействия в тесных двойных системах с нерелятивистскими компонентами. — Таллин: Валгус, 1990.—С. 26—90.
6. Свечников М. А., Еретнова О. В. Оценка вероятности открытия контактных тесных двойных звезд как затменных переменных // Астрономо-геодезические исследования. Переменные звезды и звездные системы. — Екатеринбург, 1995.—С. 115—125.
7. Свечников М. А., Еретнова О. В., Ольнева М. Н., Тайдакова Т. А. Учет наблюдательной селекции и распределение тесных двойных систем типов РГП и ПР в пространстве // Науч. информ. Астросовета АН СССР.—1989.—Вып. 67.—С. 15—40.
8. Свечников М. А., Истомин Л. Ф., Грехова О. А. Разработка и применение простых критериев для массовой классификации затменных переменных звезд // Переменные звезды.—1980.—21, № 3.—С. 399—412.
9. Свечников М. А., Кузнецова Э. Ф. Каталог приближенных фотометрических и абсолютных элементов затменных переменных звезд. — Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 1990.—Т. 1.—224 с.; Т. 2.—229 с.
10. Huang S. S. Models of mass ejection by binary stars and its affection on their orbital periods // Astrophys. J.—1963.—138, N 2.—P. 471—480.
11. Kaluzny J., Rucinski S. M. Contact binaries in open clusters // ASP Conf. Ser. / Ed. R. A. Saffer.—1993.—3, Blue Stragglers, Astron. Soc. Pac., San Francisco, P. 164—171.
12. Maeder A., Meynet G. Tables of evolutionary star models from 0.85 to  $120M_{\odot}$  with overshooting and mass loss // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1988.—76.—P. 411—425.
13. Mestel L. Magnetic breaking by a stellar wind // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1968.—138.—P. 359—391.
14. Rahunen T. Evolution of W UMa system and angular momentum loss // Astron. and Astrophys.—1981.—102, N 1.—P. 81—90.
15. Saar S. H. Magnetic Fields on solar-like stars: the First Decade // Solar Photosphere: Structure, Convection and Magnetic Fields: IAU Symp. / Ed. J. D. Stenflo. — Dordrecht: Kluwer, 1990.—138.—P. 427—441.
16. Stepien K. Loss of angular momentum of cool close binaries and formation of contact systems // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1995.—273.—P. 1019—1028.
17. Van't Veer F. The age of the W Ursae Majoris stars // Astron. and Astrophys.—1975.—44.—P. 437—443.
18. Vilhu O. Detached  $\rightarrow$  Contact Scenario for the Origin of W UMa stars // Astron. and Astrophys.—1982.—109, N 1.—P. 17—22.