

УДК: 524.38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТОВ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД НА ГП ПО ЭВОЛЮЦИОННЫМ ЗВЕЗДНЫМ МОДЕЛЯМ КЛАРЕТА И ГИМЕНЕЦА

Г.Н.ДРЕМОВА, М.А.СВЕЧНИКОВ

Поступила 6 января 2002

Принята к печати 8 мая 2002

В данной работе на основе звездных моделей Кларета и Гименеца с учетом конвективного проникновения и потери массы компонентами рассчитана сетка изохрон, покрывающая широкий диапазон звездных возрастов от Главной последовательности нулевого возраста (НГП) до 10 миллиардов лет. Рассчитаны возрасты 88 затменных переменных звезд ГП из каталога Андерсена и 100 хромосферно-активных звезд из каталога Штрассмейера с описанием метода оптимальной интерполяции. Приведены сравнения с результатами определения возрастов, полученными другими авторами; установлено хорошее согласие.

1. *Введение.* В данной работе для оценки значений возрастов тесных двойных систем (ТДС) предлагаются два способа - метод изохрон и метод треков, основанные на идее оптимальной интерполяции, на базе эволюционных теоретических звездных моделей, вычисленных Кларетом и Гименецом [1].

Используемые модели рассчитаны для начального химического состава $(X, Y, Z) = 0.70, 0.28, 0.02$ для звезд Населения I, с учетом конвективного проникновения и потери массы компонентами на базе новых непрозрачностей Роджерса и Иглесиаса [2]. Модели [1] включают измененные константы внутренней структуры в результате улучшенной обработки уравнения состояния. Для низких температур ≤ 6000 К и температур выше 10^8 К таблицы Роджерса и Иглесиаса [2] не дают значений непрозрачностей, поэтому в звездные модели введены дополнительно непрозрачности Александра [3] и непрозрачности из Лос-Аламосской библиотеки непрозрачностей [4].

Теоретические модели [1], охватывающие интервал масс от $40 M_{\odot}$ до $1 M_{\odot}$ и вычисленные от НГП до первой фазы воспламенения углерода, представляют собой основу для построения сетки изохрон на диаграмме $L - T_{\text{эф}}$. Это изолинии, вдоль которых время постоянно и по которым, зная светимость и эффективную температуру каждого из компонентов, можно определить возраст ТДС.

Из каталога Андерсена [5] были протестированы 88 компонентов 44 затменно-двойных систем. Каждый из 88 компонентов хорошо изучен, как отмечено в [5], и удовлетворяет критерию, что средние ошибки $< 2\%$

как по массе, так и по радиусу. Эти ТДС являются разделенными и охватывают диапазон спектральных классов от O_1 до M_1 на ГП.

Другую выборку составили 100 хромосферно-активных звезд из

Таблица 1

НАЧАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ РАЗДЕЛЕННЫХ ТДС ИЗ КАТАЛОГА АНДЕРСЕНА

№	Обозначение	$\log L_1$	$\log L_2$	$\log T_{\text{eff}1}$	$\log T_{\text{eff}2}$
1	EM Car (HD97484)	5.02	4.92	4.531	4.531
2	V478 Cyg (HD193611)	4.63	4.63	4.484	4.485
3	CW Cep (HD218066)	4.27	4.15	4.452	4.442
4	QX Car (HD86118)	3.72	3.58	4.377	4.354
5	V539 Ara (HD161783)	3.29	3.02	4.260	4.230
6	CV Vel (HD77464)	3.19	3.15	4.253	4.250
7	U Oph (HD156247)	2.91	2.70	4.220	4.199
8	DI Her (HD175227)	2.73	2.46	4.230	4.179
9	V760 Sco (HD147683)	2.82	2.63	4.228	4.210
10	GG Lup (HD135876)	2.36	1.59	4.164	4.041
11	ξ Phe (HD6882)	2.51	1.79	4.163	4.076
12	χ^2 Hya (HD96314)	2.50	1.79	4.066	4.041
13	IQ Per (HD24909)	2.09	0.85	4.090	3.885
14	PV Cas (HD240208)	1.65	1.67	4.000	4.000
15	V451 Oph (HD170470)	1.93	1.53	4.033	3.991
16	WX Cep (HD213631)	1.80	1.62	3.911	3.949
17	TZ Men (HD39780)	1.63	0.69	4.017	3.857
18	V1031 Ori (HD38735)	1.80	1.60	3.895	3.924
19	β Aur (HD40183)	1.59	1.54	3.954	3.954
20	SZ Cen (HD120359)	1.77	1.64	3.875	3.892
21	YZ Cas (HD4161)	1.62	0.52	3.964	3.826
22	V624 Her (HD161321)	1.56	1.24	3.911	3.900
23	GZ CMa (HD56429)	1.53	1.33	3.945	3.931
24	V1647 Sgr (HD163708)	1.41	1.23	3.982	3.959
25	EE Peg (HD206135)	1.35	0.43	3.940	3.810
26	AI Hya +0°2259	1.44	1.24	3.826	3.851
27	VV Pyx (HD71581)	1.54	1.54	3.978	3.978
28	TZ For (HD20301)	1.59	1.36	3.699	3.803
29	EK Cep (HD206821)	1.17	0.21	3.954	3.756
30	WW Aur (HD46052)	1.14	1.06	3.910	3.890
31	KW Hya (HD79193)	1.22	0.65	3.903	3.839
32	RS Cha (HD75747)	1.24	1.24	3.906	3.886
33	MY Cyg (HD193637)	1.03	1.01	3.848	3.845
34	PV Pup (HD62863)	0.69	0.67	3.840	3.841
35	V442 Cyg (HD334426)	0.94	0.72	3.839	3.833
36	RZ Cha (HD93486)	0.90	0.90	3.810	3.810
37	BW Aqr -16°6074	0.79	0.70	3.803	3.810
38	DM Vir (HD123423)	0.67	0.67	3.806	3.806
39	V1143Cyg (HD185912)	0.45	0.42	3.810	3.806
40	UX Men (HD37513)	0.38	0.32	3.792	3.789
41	AI Phe (HD6980)	0.69	0.67	3.700	3.800
42	FL Lyr (HD179890)	0.32	-0.18	3.789	3.724
43	EW Ori (HD287727)	0.17	0.12	3.776	3.762
44	HS Aur +32°1582	-0.13	-0.30	3.728	3.716

каталога Штрассмейера и др. [6], которые можно разделить по массе главного компонента на три группы согласно [7]:

1) принадлежащие ГП звезды, с массами $1.1 M_{\odot}$ и эволюционирующие вниз по ГП;

2) эволюционно продвинутые звезды с массами $1.4 M_{\odot}$, которые, в свою очередь, могут быть разделены на три подкласса:

а) субгиганты, сходящие с ГП;

б) субгиганты, восходящие по ветви красных гигантов;

в) собственно красные гиганты;

3) эволюционно продвинутые звезды-гиганты с массами $2.5 - 5 M_{\odot}$.

Исходные данные приведены в табл.1,2, составленных на основе каталогов [5,6]. Описание таблиц: в первом столбце дан номер системы

Таблица 2

НАЧАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ХРОМОСФЕРНО-АКТИВНЫХ ТДС ИЗ КАТАЛОГА ШТРАССМЕЙЕРА

№	Обозначение	L_1	L_2	T_{eff1}	T_{eff2}
1	ς And	1.83	-	3.655	-
2	CF Tuc	0.53	0.52	3.633	3.780
3	AY Cet	2.11	-	3.700	-
4	UV Psc	0.09	-0.16	3.742	3.740
5	LX Per	0.72	0.48	3.699	3.774
6	V711 Tau	0.88	0.13	3.685	3.737
7	RZ Eri	1.15	1.44	3.822	3.699
8	α Aur	1.98	1.92	3.707	3.772
9	CQ Aur	1.54	0.46	3.677	3.736
10	SV Cam	0.11	-	3.767	-
11	VV Mon	1.72	0.16	3.803	3.680
12	SS Cam	1.26	0.86	3.672	3.806
13	AR Mon	1.78	1.80	3.690	3.634
14	54 Cam	1.08	0.93	3.782	3.782
15	GK Hya	0.92	0.49	3.725	3.794
16	RU Cnc	1.06	0.76	3.681	3.812
17	RZ Cnc	1.62	-	3.663	-
18	TY Pyx	0.32	0.34	3.740	3.734
19	WY Cnc	0.00	-	3.761	-
20	XY UMa	0.00	-	3.766	-
21	DH Leo	-0.19	-	3.720	-
22	RW UMa	0.88	0.87	3.800	3.665
23	IL Com	0.21	0.21	3.792	3.792
24	UX Com	0.44	0.03	3.672	3.769
25	RS CVn	0.96	0.86	3.702	3.826

и ее наименование по ОКПЗ IV или HD-каталогу [8]; во втором и третьем столбцах - светимости (взяты в долях светимости Солнца $L_{\odot}$) и эффективные температуры, выраженные в десятичных логарифмах, соответственно.

Таблица 2 (окончание)

1	2	3	4	5	6
26	BH Dra	1.29	0.66	3.838	3.699
27	BH Vir	0.11	0.28	3.768	3.792
28	SS Boo	0.28	0.72	3.774	3.681
29	RT CrB	0.56	0.85	3.663	3.767
30	σ^2 CrB	0.24	0.34	3.780	3.803
31	WW Dra	0.69	0.89	3.772	3.688
32	ϵ UMi	1.96	0.84	3.712	3.857
33	V792 Her	1.79	1.04	3.667	3.816
34	HR 6469	2.12	-	3.749	-
35	Z Her	0.76	0.62	3.819	3.699
36	MM Her	0.74	0.37	3.719	3.752
37	V772 Her	0.11	-	3.788	-
38	PW Her	0.87	0.37	3.690	3.781
39	AW Her	0.69	0.55	3.682	3.708
40	HR 7428	3.12	-	3.645	-
41	V1764 Cyg	2.40	-	3.663	-
42	HR 7578	-0.51	-0.51	3.681	3.681
43	ER Vul	0.14	0.06	3.780	3.761
44	HR 8170	0.22	-	3.792	-
45	FF Aqr	1.32	-	3.699	-
46	RT Lac	0.76	1.04	3.685	3.709
47	AR Lac	0.62	0.33	3.699	3.752
48	RT And	0.26	-0.15	3.792	3.761
49	SZ Psc	1.11	0.47	3.685	3.791
50	KT Peg	-0.06	-	3.761	-

2. *Метод изохрон.* Звездные модели Кларета и Гименеца [1] позволяют построить эволюционные треки в координатах $L-T_{\text{eff}}$, выраженных в десятичных логарифмах и затабулированных для дискретного набора масс от $40 M_{\odot}$ до $1 M_{\odot}$. Для каждого эволюционного трека индивидуально подбирались интерполяционные функции $L = L(t)$ и $T_{\text{eff}} = T_{\text{eff}}(t)$, где t - возраст в миллионах лет. Эти функции сшиты из кусков-ветвей, составленных из точек на треках, которые соответствуют определенному статусу звезды. Поэтому интерполяция возможна лишь между однотипными ветками эволюционных треков, а не целыми треками.

Поскольку каждая эволюционная ветвь описывалась своими собственными интерполяционными функциями (если ветвь содержит более трех точек, то применяется кубический сплайн, для трех точек вводится квадратичная функция, а для двух используется линейная интерполяция), то имеет смысл ввести термин "оптимальная интерполяция".

Для построения сетки изохрон потребовались дополнительные треки (пунктирные линии на рис.1а), которые были рассчитаны путем нелинейной интерполяции между известными треками (сплошные линии на рис.1а) [1]. Чтобы избежать возможных наложений дополнительных

треков, целесообразно монотонизировать исходные эволюционные треки. В результате, между каждой парой табличных эволюционных треков путем нелинейной интерполяции по начальным массам с индивидуальным шагом, было рассчитано по 100 дополнительных эволюционных треков. Для примера отметим, что между табличными начальными массами $40 M_{\odot}$ и $31.62 M_{\odot}$ шаг для дополнительных треков составляет $0.084 M_{\odot}$.

На такой уже качественно мелкой сетке треков, отображающей табличные модели, можно гораздо точнее "прописать" геометрическую форму изохрон для заданных времен (рис.1b).

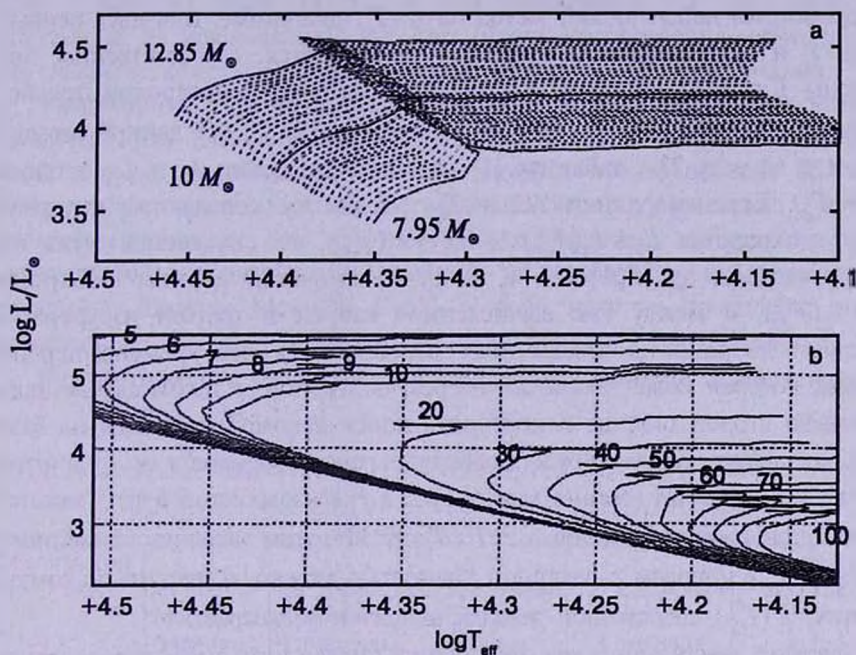


Рис.1. а) Сетка треков. Модельные треки для начальных масс 12.85, 10 и $7.95 M_{\odot}$ изображены сплошными линиями, дополнительно построенные - пунктирными. б) Фрагмент сетки изохрон. Диапазон от 5 до 100 миллионов лет.

На диаграмме $L - T_{\text{eff}}$ определим изохрону как кривую $L = L(T_{\text{eff}})$, вдоль которой возраст звезд не меняется. Это значит, что на заданное время t на всех треках - базовых и дополнительно построенных - интерполируются новые значения L и T_{eff} , линейно или нелинейно, в зависимости от интерполяционного полинома. Если трек содержит такое t , то он игнорируется; максимальное число точек, определяющее изохрону, - 2300.

Таким образом, по таблицам эволюционных моделей Кларета и Гименеса [1] рассчитаны различные семейства изохрон для широкого диапазона возрастов от 1 миллиона до 10 миллиардов лет. На этой сетке изохрон достаточно применять линейную интерполяцию между соседними изохронами для оценок возрастов ТДС.

3. *Метод треков.* Второй вариант вычисления возрастов использует

информацию лишь оригинальных 23-х моделей-треков [1], что и дало название - "метод треков". При этом математическая обработка исходных треков осталась прежней: эволюционные треки разбивались на аналогичные ветви с участками линейного и нелинейного интерполирования, характеризующие эволюционный статус звезды. Суть метода треков состоит в аппроксимации возраста звезды функцией двух переменных $t = t(L, T_{\text{eff}})$ для $L - T_{\text{eff}}$ диаграммы. Численно эта процедура реализуется путем нелинейной интерполяции на базе двумерных таблиц, в которых попарно перебираются времена всех табличных моделей.

Рассмотрим детально этот метод на $L - T_{\text{eff}}$ диаграмме. Для двух первых времен t_1 и t_2 из первой таблицы [1] вычисляются, соответственно, две изохроны $L_1 = L_1(T_{\text{eff}})$ и $L_2 = L_2(T_{\text{eff}})$, между которыми, предположительно, находится изохрона $L^* = L^*(T_{\text{eff}}^*)$ на искомое время t^* для данной звезды. На t_1 и t_2 во всех 23-х таблицах [1] находятся значения L_1 и L_2 , а также $T_{\text{eff}1}$ и $T_{\text{eff}2}$. Если координаты L^* и T_{eff}^* звезды не попадают в интервал между изохронами $L_1 = L_1(T_{\text{eff}1})$ и $L_2 = L_2(T_{\text{eff}2})$, то спускаемся вниз по первой таблице на времена t_2 и t_3 . Аналогично строим изохрону $L_3 = L_3(T_{\text{eff}3})$, и между уже вычисленной второй и третьей изохронами проверяем координаты звезды. Так перебираются все времена первой таблицы, которая может оказаться не результативной, в таком случае надо перейти ко второй таблице и повторить поиск искомой изохроны на базе уже 22-х таблиц. Когда-нибудь подберутся такие времена t_i и t_{i+1} в n -ой таблице, при которых именно между i -ой и $i+1$ изохронами будет "зажата" звезда со своими координатами (L^*, T_{eff}^*) . Методом деления временного отрезка $[t_i, t_{i+1}]$ пополам с заданной точностью можно вычислить искомую изохрону $L^*(T_{\text{eff}}^*)$ для данной звезды, значит и ее возраст.

В данной реализации для получения численного значения возраста звезды нет необходимости строить подробную сетку изохрон, и поэтому в метод треков не вносятся численные ошибки, связанные с построением большого числа дополнительных эволюционных треков, но с помощью которых точнее прописывается геометрическая форма изохроны.

4. Вычисление возрастов ТДС из каталога Андерсена. Поскольку возраст звезд определяется по изохронам и трекам, построенным на диаграмме $L - T_{\text{eff}}$, важно остановиться на значениях их светимостей и эффективных температур.

Из [5] следует, что эффективные температуры 88 звезд далеко не однородны и фундаментальны, как массы и радиусы. Это вызвано разнообразием наблюдаемых фотометрических и спектроскопических показателей температуры, возможностью применения той или иной степени покраснения и/или поправки к металличности, доступностью масштабных калибровок в различных температурных диапазонах. Особенно для горячих

звезд большинство T_{eff} в значительной мере неопределенны. То же касается и очень слабых вторичных компонентов в системах с высоким отношением светимостей L_1/L_2 . Фактически T_{eff} составляет сейчас основную неопределенность в использовании данных. Определения светимостей также страдают неточностями и неопределенностями, поскольку они выводятся из закона Стефана, куда входит T_{eff} , поэтому средние ошибки светимостей превосходят средние ошибки эффективных температур.

С учетом этих неопределенностей в начальных данных понятно, почему 6 звезд из 88 оказались за пределами нулевой изохроны. Это спутники GG Lyr, ξ Phe, TZ Men, FL Lyr и оба компонента HS Aur. Всем этим спутникам, за исключением HS Aur, приписаны возрасты, определенные по главному компоненту; в табл.3 эти возрасты отмечены знаком "...".

Рассмотрим структуру табл.3: в первой колонке приведены названия звезд из [5] по данным ОКПЗ-IV, а также по HD- или BD-каталогам. В 3-ей и 5-ой колонках приведены оценки возрастов для 88 звезд, вычисленные на базе теоретических моделей Кларета и Гименеца [1] методом изохрон и треков. Во 2-ой и 4-ой колонках содержатся значения возрастов, определенные аналогичными методами, но на базе других теоретических моделей - Мэдера, Мейнета [9,51]. В 6-ой колонке приведены оценки возрастов других авторов со ссылками на использованные статьи.

Важно отметить сходство результатов двух методов вычисления, как

Таблица 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВОЗРАСТОВ РГП СИСТЕМ ИЗ КАТАЛОГА АНДЕРСЕНА, $L - T_{\text{eff}}$ ДИАГРАММА

Обозначение	t_1 t_2 по трекам Мэдера и Мейнета	t_1 t_2 по трекам Кларета и Гименеца	t_1 t_2 по изохронам Мэдера и Мейнета	t_1 t_2 по изохронам Кларета и Гименеца	Возрасты звезд по данным других авторов
1	2	3	4	5	6
1 EM Car (HD97484)	4.77±1.10 4.65±1.26	5.05±3.45 4.86±3.54	4.76±1.13 4.59±1.20	4.88±1.03 4.76±1.22	~ 4.5 - 5 [10]
2 V478 Cyg (HD193611)	6.59±0.76 6.51±0.76	7.05±4.49 6.98±4.49	6.36±0.85 6.28±1.53	6.84±0.93 6.77±0.93	10 [11] 2.6 [12]
3 CW Cep (HD218066)	6.62±1.56 5.95±1.79	7.64±5.81 7.14±4.36	6.85±1.53 6.03±1.69	7.50±1.39 7.02±1.56	9-11 [13] очень молодая [12]
4 QX Car (HD86118)	9.49±1.42 11.41±2.33	10.38±5.93 12.78±7.51	9.42±1.52 11.82±2.28	10.3±1.32 12.2±2.11	6-10 [14]
5 V539 Ara (HD161783)	39.4±17.8 47.4±15.2	37.7±8.26 52.5±29.0	39.3±9.63 49.8±16.6	43.2±9.67 50.6±17.3	38 [12]
6 CV Vel (HD77464)	40.9±5.44 41.5±5.32	45.2±15.2 45.4±18.9	40.8±4.70 41.5±5.06	43.5±4.43 43.7±4.72	~ 30 [15] ~ 30 [16] 26 [12]
7 U Oph (HD156247)	47.4±12.0 51.9±14.9	54.2±34.6 53.2±23.7	52.8±12.5 54.4±16.5	53±13.8 52±16.3	< 68 [17] ~ 30 [18] 43 [12] 40 [19]

Таблица 3 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
8 DI Her (HD175227)	13.3±8.39 27.6±15.4	9.06±5.39 20.2±17.2	13.3±8.83 27.9±14.9	7.71±10.4 19.9±17.4	17 [12]
9 V760 Sco (HD147683)	32.8±8.69 18.9±5.29	33.5±15.9 14.9±22.5	32.8±9.04 19.5±5.64	31.6±8.42 14.0±6.26	16-39 [20]
10 GG Lup (HD135876)	26.6±19.3 26.6:	14.6±7.48 14.6:	26.4±23.6 26.4:	14.6±23.6 14.6:	- 20 [21]
11 ξ Phe (HD6882)	77.6±12.2 77.6:	74.6±15.4 74.6:	79.0±10.5 79.0:	71.7±8.76 71.7:	80 [22] 110 [12]
12 χ ² Her (HD96314)	174±0.10 243±42.2	187±92.4 153±70.8	184±16.3 242±45.9	192±11.1 162±23.6	170 [15] 180 [23] 180 [12] 110 [24] 140: [12]
13 IQ Per (HD24909)	149±19.6 149:	124±40.4 138±66.8	148±20.6 148:	119±14.1 91.6±0.33	
14 PV Cas (HD240208)	490±74.1 494±71	317±238 327±238	478±55.7 486±53.9	302±30.9 316±28.6	
15 V451 Oph (HD170470)	333±113 398±161	264±66.4 264±154	342±126 452±164	274±89.6 246±83.0	250 [25] 300 [12]
16 WX Cep (HD213631)	742±6.99 735±31.2	594±191 552±242	856±51.9 786±60.5	522±99.4 617±55.8	660 [12]
17 TZ Men (HD39780)	264±113 264:	155±65.7 155:	261±101 261:	153±47.9 153:	380: [12] - 100 [26] - 700 [27]
18 V1031 Ori (HD38735)	735±8.86 736±18.3	640±316 640±172	879±105 896±253	655±289 639±126	
19 β Aur (HD40183)	734±51.4 735±45.2	533±180 529±210	756±136 783±163	520±80.7 508±85.4	300 [28] 570: [12]
20 SZ Cen (HD40183)	749±0.78 752±10.2	645±513 645±203	942±54.7 970±102	712±271 736±92.8	- 500 [15]
21 YZ Cas (HD4161)	695±69.4 1294±535	491±230 491:	692±95.5 1417±518	480±52.5 215±624	380 [29] 520 [12] 447 [30] 570: [12]
22 V624 Her (HD161321)	737±0.45 1520±79.9	645±320 865±632	993±128 1400±234	700±42.6 873±79.6	
23 GZ CMa (HD56429)	736±22.9 737±227	573±302 639±317	845±153 1044±98.1	560±82.2 574±121	- 450 [31]
24 V1647 Sgr (HD163708)	398±155 320±44.2	274±320 63.9±59.8	316±142 100±17.7	164±70.6 69.1±47.4	100-200 [32]
25 EE Peg (HD206135)	737±7.3 1611±472	559±317 952±813	964±82.6 1553±1275	502±61.5 956±1580	300 [33] 690 [12]
26 AI Hya (HD 0+2259)	1680±0.75 1690±0.89	1260±890 1260±890	2086±23.2 2028±378	1400±134 1600±228	
27 VV Pyx (HD71581)	598±56.6 598±56.6	365±198 365±198	604±65.1 604±65.1	354±29.5 354±29.5	
28 TZ For (HD20301)	1711±8 1706±14	1250±1885 1260±890	1000±367 2224±32.5	992±82.3 1624±56	
29 EK Cep (HD206821)	5.71: 5.71±0.15	НГП±2.85 НГП±983	1560±243 1041±502	НГП±6.11 НГП±3800	1 (до ГП) [34] 20 (до ГП) [35] 210 [12] 200-300 [36]
30 WW Aur (HD46052)	1170±249 1640±333	664±385 824±469	1177±207 1525±344	649±119 805±118	
31 KW Hya (HD79193)	1490±124 1845±471	828±554 621±550	1365±264 1890±658	823±114 590±422	

Таблица 3 (окончание)

1	2	3	4	5	6
32 RS Cha (HD75747)	1450±79.1 1680±156	800±913 985±369	1310±223 1584±359	800±93.7 900±71.8	= 800 [37] = 1000 [38] 900 [39] 1000: [12] 830 [12]
33 MY Cyg (HD193637)	2290±5.26 2075±57.2	1380±872 1420±854	2642±313 2766±296	1500±197 1527±208	
34 PV Pup (HD62863)	2199±695 1898±717	867±738 663±638	2210±937 1918±905	838±491 640±506	1000 [40]
35 V442 Cyg (HD334426)	3180±259 3027±127	1513±1383 1370±782	3180±234 3055±306	1537±243 1327±145	1300 [41]
36 RZ Cha (HD93486)	3300±1093 3300±1093	2038±354 2038±354	4026±542 4026±542	2033±421 2033±421	= 2000 [42] 2000 [38] 2600: [12] = 1700 [43] 2000 [44]
37 BW Aur (BD166074)	5100±1899 4790±602	2385±1382 2325±1369	5043±511 5068±509	2636±290 2318±290	
38 DM Vir (HD123423)	5090±776 5090±776	2460±1596 2460±1596	5243±742 5243±742	2480±440 2480±440	4000 [45]
39 V1143 Cyg (HD185912)	1960±353 1954±387	1315±362 1600±663	1975±365 1920±427	1249±632 1463±704	= 2000 [26] 2700 [12]
40 UX Men (HD37513)	5860±1101 5960±1069	3200±850 3210±937	3600±802 2839±1036	3084±718 3094±1085	6000 [46] 6200: [12]
41 AI Phe (HD6980)	8270±2811 5430±1451	4440±1698 2750±1519	8570±228 5670±652	3594±562 2750±370	= 4000 [47] 4650 [31]
42 FL Lyr (HD179890)	5426±1069 8000±606	3210±937 8740±4420	2839±1036 10400±512	3095±1085 3095:	2500 [48] 8000: [12]
43 EW Ori (HD287727)	2165±1209 6720±1990	4055±1413 6320±2176	1970±2216 7233±1751	3873±1565 8126±4063	
44 HS Aur (BD+47.1350)	8210±12.7 8215±12.7	8690±4369 8970±4551	10460±338 10080±1055	- -	

между собой, так и с возрастами, полученными другими авторами. Из табл.3 видно, что возрасты главного компонента и спутника ТДС получаются близкими по значению, что естественно, так как система физически связанная.

Ошибки, возникающие в процессе вычисления возраста звезды, приведены в табл.3 и оцениваются для каждого компонента 44 затменно-переменных систем по формуле: $\Delta_i = (\Delta t_i / t_i) \cdot 100\%$, где $\Delta t_i = (t_i(L + \Delta L, T_{\text{eff}} + \Delta T_{\text{eff}}) - t_i(L - \Delta L, T_{\text{eff}} - \Delta T_{\text{eff}})) / 2$.

Отмечается, что для массивных звезд с массами больше $\approx 2 M_{\odot}$ характерно сходство результатов оценки возрастов двумя способами вычисления (методом треков и методом изохрон) на диаграмме $L - T_{\text{eff}}$ как между собой, так и с возрастами, полученными другими авторами.

Для маломассивных звезд с массами $< 1.6 M_{\odot}$, в возрастном масштабе это соответствует времени пребывания на ГП больше 5 миллиардов лет, по-видимому, не нужно учитывать процесс конвективного проникновения.

Размеры конвективных ядер этих звезд очень малы и, предположительно, совсем исчезают вблизи массы $\approx 1.2 M_{\odot}$, хотя точно не известно, что на самом деле происходит с конвективными ядрами в переходной зоне $1.6 + 1.2 M_{\odot}$ [52].

Модели с учетом конвективного проникновения и без его учета сильно влияют на форму треков, а значит - и на форму изохрон. Таким образом, по-разному определенные изохроны дадут, соответственно, разные возрасты для исследуемых систем.

Так, например, из каталога [5] можно выделить 27 компонентов, чьи массы попадают в переходную зону $1.6 + 1.2 M_{\odot}$. Это - спутники систем TZ Men(17), YZ Cas(21), EE Peg(25), EK Cep(29), KW Hya(31) и системы PV Pup(34), V 442 Cyg(35), RZ Cha(36), BW Aqr(37), DM Vir(38), V 1143 Cyg(39), UX Men(40), AI Phe(41), FL Lup(42), EW Ori(43), HS Aur(44). Их численность составляет $\approx 30\%$ от полного числа систем в каталоге. Для таких систем отмечено заметное расхождение в оценке возрастов, полученных различными авторами.

В эволюционных моделях Мэдера и Мейнета [9], рассчитанных для начальных масс $120 + 1.15 M_{\odot}$, учитывается процесс переноса конвекцией, а для начальных масс $1 M_{\odot}$ и $0.85 M_{\odot}$ - нет; модели Кларета и Гименецца [1] на всем диапазоне начальных масс $40 + 1 M_{\odot}$ учитывают конвективное проникновение.

Интересно сравнить некоторые результаты проведенных здесь оценок возрастов ТДС, локализованных на ГП, с выводами, сделанными Ползом и др. в [53], где авторы, используя свой вычислительный код для построения звездных моделей как с эффектом усиленного конвективного перемешивания за пределы конвективного ядра, так и без его эффекта, тестировали ТДС из [5]. Авторы [53] суммировали, что для 80% систем из исследуемого каталога [5] оба набора моделей обеспечивают хорошее согласие между возрастными и металличностью обоих компонентов в пределах наблюдательной ошибки. Исключение составили системы AI Hya(26), WX Cep(16) и TZ For(28), для которых учет эффекта конвективного проникновения является предпочтительным. Также авторы [53] показали, что для интервала начальных масс $1.9 + 3 M_{\odot}$ предпочтительней использовать модели с конвективным перемешиванием, а для интервала $1.2 + 1.9 M_{\odot}$ оба варианта моделей дают одинаково хорошее соответствие.

Также следует отметить, что даже небольшие неопределенности в $2 + 3\%$ в начальных данных уже способны создать довольно высокие ошибки в определении возрастов, если компоненты системы сосредоточены в "хвостовой" части сетки изохрон - это самая узкая зона вычислительной диаграммы. Примерами являются - спутники YZ Cas(21), EE Peg(25), DI Her(8), GG Lup(10), TZ Men(17), EK Cep(29), PV Pup(34) и оба компонента в системе EW Ori(43) из [5].

В системах YZ Cas(21), V624 Her(22), EE Peg(25) возрасты главных компонентов и спутников расходятся приблизительно в два раза в наших расчетах, тогда как в системах FL Lyr(42) и EW Ori(43) - в 3.5 раза. Также необходимо подчеркнуть, что метод треков и метод изохрон, развитые на базе теоретических моделей Кларета и Гименеца [1], дают высокие ошибки, более 100%, в определении возрастов у спутников в системах YZ Cas(21), EE Peg(25).

Анализ причины расхождения возрастов показывает, что современные спектроскопические и фотометрические элементы звезд из каталога Андерсена [5] являются гораздо более точными, чем ранее использованные другими авторами в 1975-1987гг. элементы.

Также на расхождение результатов влияет и то, что разные авторы использовали другие способы определения возрастов у звезд, отличные от тех, что рассматриваются здесь. Ранние оценки возрастов звезд, выполненные Свечниковым и др. [12] по трекам Хейлесена [54] для систем V478 Cyg(2), YZ Cas(21), V624 Her(22), EE Peg(25), WW Aur(30), MY Cyg(33), RZ Cha(36), FL Lyr(42) расходятся приблизительно в два раза, а для EK Cep(29) в 4 раза по сравнению с новыми оценками возрастов. Для EK Cep(29) вообще характерна неопределенность в определении возраста: Г.Хилл, Е.Эббигхаузен [34] считают эту систему еще не вышедшей на ГП, Свечников и Кузнецова [12] оценивают ее возраст в районе ≈ 200 миллионов лет.

5. *Вычисление возрастов ТДС из каталога Штрассмейера.* В табл.4 представлены результаты расчетов возрастов для выборки хромосферно-активных звезд из каталога Штрассмейера [6]. В 1-ой колонке табл.4 даны названия звезд из [6], во 2-ой и 4-ой колонках для 100 звезд приведены оценки их возрастов на $L-T_{\text{eff}}$ диаграмме, вычисленные на основе моделей

Таблица 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ ВОЗРАСТОВ (В МЛН. ЛЕТ) ДЛЯ
ЗВЕЗД КАТАЛОГА ШТРАССМЕЙЕРА

Обозначение	t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2
	метод изохрон, модель Кларета, $L - T_{\text{eff}}$		по результатам Баррадо $M - R$		метод треков, модель Кларета $L - T_{\text{eff}}$		метод треков, модель Мэдера, $M - R$	
1 ς And	560	-	456	23604	650	-	580	-
2 CF Tuc	5730:	5730	6490	7800	-	4110	8650	9720
3 AY Cet	420	-	1040	-	1250	-	1520	-
4 UV Psc	out	out	1690	13552	6750	8690	980	≈ 10000
5 LX Per	3360	6150	4540	4480	5680	4560	8060	7050
6 V711 Tau	3160	3160:	3800	6950	5760	6720	7100	6710
7 RZ Eri	1970	1220	1750	2210	1250	1260	3260	≈ 3500
8 α Aur	500	550	464	538	650	-	690	750

Таблица 4 (окончание)

1		2		3		4		5	
9	CQ Aur	1200	8220	1161	1028	6310	6760	1780	2830
10	SV Cam	5520	-	9910	-	6310	-	10970	-
11	VV Mon	850	850:	2470	2800	2170	9190	= 6000	5000
12	SS Cam d.s.	2000	2430	1552	984	-	2170	2500	2430
13	AR Mon s-d.s.	590	570	496	23604	4380	-	580	-
14	54 Cam	2390	2990	2108	2018	1740	2440	3790	3880
15	GK Hya d.s.	2470	3250	3560	3550	2960	3260	7910	6010
16	RU Cnc	2340	2250	3104	3000	3750	2200	= 6000	4910
17	RZ Cnc	1000	-	316	-	-	-	3240	-
18	TY Pyx	12000	11560	5370	6250	6500	-	6980	7500
19	WY Cnc	3530	-	10715	-	8620	-	8900	-
20	XY UMa d.s.	570	-	8650	-	680	-	7300	-
21	DH Leo	out	-	20230	-	8770	-	= 10000	-
22	RW UMa	2790	2790:	2150	2880	2250	-	4180	= 6000
23	IL Com	НГП	НГП	11324	13213	НГП	НГП	= 13500	= 13500
24	UX Com	820:	820	6490	4720	9190	1050	8620	3680
25	RS CVn	1980	1740	2790	2570	3730	1780	6440	6080
26	BH Dra s-d.s.	1630	3960	1870	23174	1260	4420	5430	-
27	BH Vir	5080	1790	6240	6530	5840	1880	5545	8240
28	SS Boo	6700	5970	9420	11300	6950	6950	11360	13540
29	RT CrB	3370:	3370	3520	3690	-	2860	6730	7020
30	σ^2 CrB	4100	490	4450	4080	4120	500	4150	4930
31	WW Dra	4520	2730	3760	4426	4130	5780	7290	7950
32	ϵ UMi	510	970	449	3030	1250	990	510	6680
33	V792 Her	580	2190	2640	2920	650	1750	-	6860
34	HR 6469	420	-	870	-	340	-	1640	-
35	Z Her	1970	4280	1030	4730	2000	9000	2850	8090
36	MM Her	3370	9470	3970	5432	7040	8500	8240	7040
37	V772 Her	НГП	-	2917	-	НГП	НГП	2670	-
38	PW Her	2730	4260	2773	5309	5770	4400	5470	6160
39	AW Her	6280	5540	4470	5130	9020	8940	8010	8350
40	HR 7428	120	-	107	-	-	-	-	-
41	V1764 Cyg	270	-	1980	-	-	-	-	-
42	HR 7578	out	out	9250	9250	НГП	НГП	6080	6080
43	ER Vul	870	6310	3710	5600	1000	6500	2260	4370
44	HR 8170	НГП	-	1500	-	НГП	НГП	НГП	-
45	FF Aqr	1400	-	1145	-	1750	-	1760	-
46	RT Lac s-d.s.	4160	1880	2020	23334	6860	6940	3630	-
47	AR Lac	4330	10420	5180	4670	8990	8590	8280	6350
48	RT And	1230	1230:	841	1580	1290	1290:	НГП	НГП
49	SZ Psc	1980	3510	2240	3133	2500	3600	= 4000	5370
50	KT Peg	НГП	-	8433	-	НГП	НГП	7040	-

Кларета и Гименеца [1] по методу изохрон и треков, соответственно. В 3-ей колонке представлены результаты, полученные Баррадо и др. [7] на $M-R$ диаграмме при использовании теоретических эволюционных треков Шэрера и др. [49], между которыми авторы [7] последовательно интерполировали сначала по радиусу, затем по массе звезды. В 5-ой колонке таблицы приведены оценки возрастов, выполненные также на $M-R$ диаграмме

методом треков, построенным на базе моделей Мэдера и Мейнета [9].

Прочерки в табл.4 обозначают отсутствие значений эффективной температуры для некоторых компонентов как необходимой координаты для определения возраста. Аналогично, значком ":" отмечны возрасты тех компонентов, чьи координаты не попадают в расчетную область изохрон, поэтому для них возраст оценивается по соседнему, физически связанному компоненту. Такими звездами являются главные компоненты в системах CF Tuc(2), UX Com(24), RT CrB(29) и спутники в системах V711 Tau(6), VV Mon(11), RW UMa(22), в скобках указан номер системы в табл.4. Примечательны системы UV Psc(4), DH Leo(21) и HR 7578(42) тем, что у них оба компонента оказались за границами расчетной сетки изохрон, что условно обозначено символом "out".

Следует особо выделить главный компонент DH Leo(21), а также спутники ζ And(1), AR Mon(13), BH Dra(26), RT Lac(46), потому что полученные для них возрасты по Баррадо [7] завышают возраст Вселенной. Например, метод изохрон на базе моделей Кларета и Гименеца [1] для спутника AR Mon(13) дает возраст 570 миллионов лет, для спутника BH Dra(26) и метод изохрон, и метод треков дают близкие значения возраста - 3.96 и 4.42 миллиарда лет, соответственно. Иначе обстоит дело со спутником RT Lac(46): метод изохрон дает возраст 1.88 миллиарда лет, а метод треков - в 3.5 раза больше.

Необходимо выделить такие системы, как IL Com(23), V772 Her(37), HR7578(42), HR8170(44), KT Peg(50). Полученные для них возрасты, в зависимости от метода, сильно варьируют от возраста НТП до нескольких миллиардов лет. Объясняется это тем, что на вычислительной диаграмме - сетке изохрон или сетке треков - координаты звезды попадают в "хвостовую" часть диаграммы, которая слабо разрешается в данных методах вычисления.

В целом, сравнение возрастов главных и вторичных компонентов показывает хорошее согласие для большинства систем, исключение составляют лишь те компоненты, которые испытывают "неправильную" эволюцию с очень быстрым процессом переноса массы между звездами. В этом смысле Кларет и Гименец [50] показали, что определение некоторых параметров хромосферно-активных звезд из стандартных фотометрических калибровок должно быть осторожным, так как могут быть реальные различия между атмосферами этого вида звезд и нормальных неактивных объектов. Поэтому неопределенности в эффективных температурах и светимостях вносятся в возрасты звезд. Этими "неправильными" системами являются UV Psc(4), AR Mon(13), BH Dra(26), ϵ UMi(32), Z Her(35), RT Lac(46) - все они полуразделенные системы, в которых один из компонентов уже заполнил полость Роша, поэтому так не согласованы вычисленные возрасты для обоих компонентов.

С другой стороны, системы ζ And(1), AY Cet(3), RZ Cnc(17), XY UMa(20), IL Com(23), FF Aqr(45) классифицируются как "аномальные".

Их спутники заполняют свои полости Роша, достигая контактной конфигурации в результате потери углового момента, что приводит к сближению компонентов и временному переносу массы от более массивного компонента к спутнику. Все эти системы подчеркнуты в табл.4.

6. *Заключение.* Предложенный расчет возрастов методами треков и изохрон со встроенной оптимальной интерполяцией на основе базовых эволюционных теоретических моделей с учетом умеренного темпа переноса вещества от конвективного ядра [1] можно считать надежным для ТДС, принадлежащих к ГП, для которых достигнуто хорошее согласие с расчетами других авторов.

Сравнение теоретических звездных моделей Кларета, Гименеца [1] и Мэдера, Мейнета [9] показывает, что на сетке треков второй модели звезды к стадии воспламенения Не оказываются моложе, чем на первой, рис.2. Для диапазона начальных масс $25 - 15 M_{\odot}$ и $5 - 1.5 M_{\odot}$, сетки Кларета и Гименеца [1] показывают, что остывание звезд после выгорания в центре водорода длится дольше, чем на треках Мэдера, в интервале $1.5 - 1 M_{\odot}$ - наоборот, так как в расчетах Мэдера треки с $M = 1.15 - 0.85$ вычислялись без конвективного проникновения. А на участке $15 + 5 M_{\odot}$ - темпы эволюции не отличаются. Также начальная последовательность у Мэдера и Мейнета [9] смещена в голубую часть спектра по сравнению с НПП в моделях Кларета и Гименеца [1]. Заложенные различия в моделях проявляются в дальнейшем при вычислении возрастов звезд.

Задача определения возрастов для затменных - двойных звезд обеспечивает

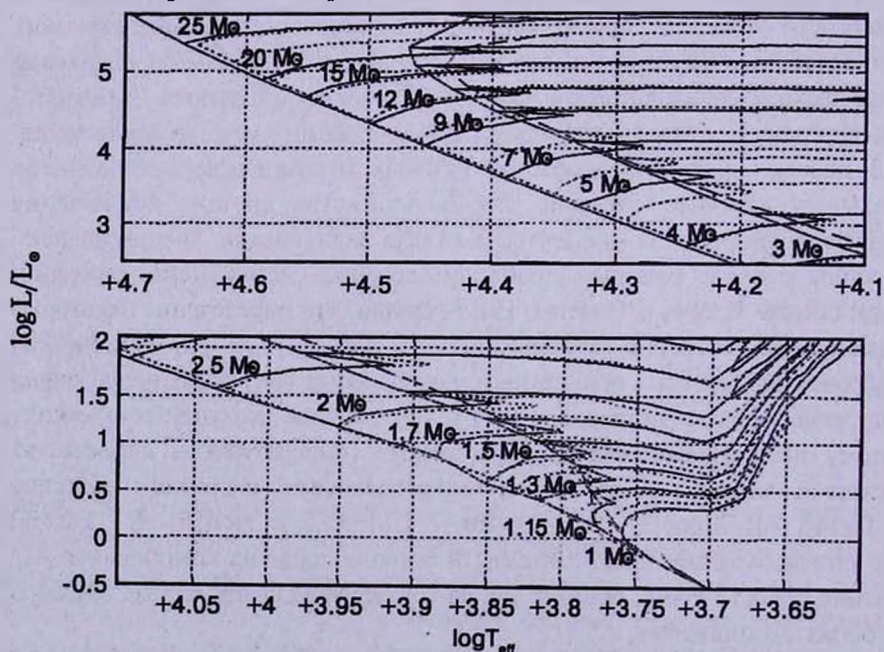


Рис.2. Сравнение сеток треков (начальные массы указаны цифрами) в моделях Мэдера, Мейнета (сплошные линии) и Кларета, Гименеца (пунктирные линии).

серьезную проверку для теоретических моделей. Условие одинаковых возрастов у обоих компонентов ТДС делает их лучшими доступными тестами звездной эволюционной теории и теории звездообразования.

Уральский государственный университет, им. М.Горького,
Екатеринбург, Россия, e-mail: g.n.dryomova@mail.ru

AGE ESTIMATION FOR MAIN SEQUENCE CLOSE BINARIES WITH THE EVOLUTIONARY MODELS BY CLARET AND GIMENEZ

G.N.DRYOMOVA, M.A.SVECHNIKOV

The grid of the isochrones covering wide age interval from ZAMS to 10 billion years have been calculated on the basis of the theoretical evolutionary stellar models by Claret and Gimenez taking into account overshooting and mass loss processes. Ages have been evaluated for 88 eclipsing variable systems belonging to Main Sequence from catalogue by Andersen and for 100 systems from Catalogue of Chromospherically Active Binaries by Strassmeier. The idea of optimum interpolation is used. The comparisons with results obtained by various authors have been discussed.

Key words: *stars:binaries:close - stars:main sequence - stars:evolution*

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Claret, A.Gimenez, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 96, 255, 1992.
2. F.J.Rogers, C.A.Iglesias, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 79, 507, 1992.
3. D.R.Alexander, частное сообщение, 1992.
4. A.Weiss, J.J.Keady, N.H.Magee, Atomic and Nucl. Data Tables, 45, 209, 1990.
5. J.Andersen, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 3, №2, 91, 1991.
6. K.G.Strassmeier, D.S.Hall, F.C.Fekel, M.Scheck, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., CABS, 100, 173, 1993.
7. D.Barrado, M.J.Fernandez-Figueroa, B.Montesinos, E. De Castro, Astron. Astrophys., 290, 137, 1994.
8. Общий каталог переменных звезд, 4 изд., ред. П.Н.Холопов, Наука, М., 1985.
9. A.Maeder, G.Meynet, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 76, 411, 1988.
10. J.Andersen, J.V.Clausen, Astron. Astrophys., 213, 183, 1989.
11. Н.Закиров, Кинематика и физика небесных тел, 9, 47, 1993.
12. М.Свечников, Э.Кузнецова, Астрономо-геодез. исслед., Сб. науч. тр.

УрГУ, Екатеринбург, 1986, стр.28.

13. *J.V.Clausen, A.Gimenez*, Astron. Astrophys., **241**, 98, 1991.
14. *J.Andersen, J.V.Clausen, B.Nordstrom*, Astron. Astrophys., **121**, 271, 1983.
15. *J.Andersen*, Astron. Astrophys., **44**, 453, 1975.
16. *J.V.Clausen, B.Gronbech*, Astron. Astrophys., **58**, 131, 1977.
17. *R.H.Koch, C.A.Koegler*, Astrophys. J., **214**, 423, 1977.
18. *B.C.Kamper*, Astrophys., Space Sci., **120**, 167, 1986.
19. *D.E.Holmgren, G.Hill, W.Fisher*, Astron. Astrophys., **248**, 129, 1991.
20. *J.Andersen, J.V.Clausen, B.Nordstrom, D.M.Popper*, Astron. Astrophys., **151**, 329, 1985.
21. *J.Andersen, J.V.Clausen, A.Gimenez*, Astron. Astrophys., **277**, 439, 1993.
22. *J.V.Clausen, K.Guldenkerne, B.Gronbech*, Astron. Astrophys., **46**, 205, 1976.
23. *J.V.Clausen, B.Nordstrom*, Astron. Astrophys., **67**, 15, 1978.
24. *C.H.Lacy, M.L.Frueh*, Astrophys. J., **295**, 569, 1985.
25. *J.V.Clausen, A.Gimenez, C.Scarfe*, Astron. Astrophys., **167**, 287, 1986.
26. *J.Andersen, J.V.Clausen, B.Nordstrom*, Astron. Astrophys., **175**, 60, 1987.
27. *J.Andersen, J.V.Clausen, B.Nordstrom*, Astron. Astrophys., **228**, 365, 1990.
28. *K.T.Johansen*, Astron. Astrophys., **12**, 165, 1971.
29. *C.H.Lacy*, Astrophys. J., **251**, 591, 1981.
30. *J.R.W.Heintse*, Space Sci. Rev., **50**, 257, 1989.
31. *D.M.Popper, J.Andersen, J.V.Clausen, B.Nordstrom*, Astrophys. J., **90**, 1324, 1985.
32. *J.Andersen, A.Gimenez*, Astron. Astrophys., **145**, 206, 1985.
33. *C.H.Lacy, D.M.Popper*, Astrophys. J., **281**, 268, 1984.
34. *G.Hill, E.Ebbighauzen*, Astron. J., **89**, 1256, 1984.
35. *D.M.Popper*, Astron. J., **313**, 181, 1987.
36. *M.Kitamura, T.-H.Kim, M.Kiyokawa*, Ann. Tokyo, Astron. Observ. ser. II, **16**, N1, 22, 1976.
37. *J.V.Clausen, B.Nordstrom*, Astron. Astrophys., **83**, 339, 1980.
38. *G.Giuricin, F.Mardirossian, M.Mezzetti, F.Predolin*, Astron. Astrophys., **85**, 259, 1980.
39. *J.Andersen*, Astron. Astrophys., **83**, 339, 1980.
40. *L.P.R.Vaz, J.Andersen*, Astron. Astrophys., **132**, 219, 1984.
41. *C.H.Lacy, M.L.Frueh*, Astrophys. J., **94**, 712, 1987.
42. *J.Andersen, H.Gjerloff, M.Imbert*, Astron. Astrophys., **44**, 349, 1975.
43. *H.E.Jorgensen*, Astron. Astrophys., **72**, 356, 1979.
44. *Kh.F.Khaliullin, V.S.Kozureva*, Astrophys. Space Sci., **120**, 9, 1986.
45. *J.Andersen, J.V.Clausen, B.Nordstrom*, Astron. Astrophys., **137**, 281, 1984.
46. *J.V.Clausen, B.Gronbech*, Astron. Astrophys., **48**, 49, 1976.
47. *B.Y.Grivnak, E.F.Milone*, Astrophys. J., **282**, 748, 1984.
48. *D.M.Popper, C.H.Lacy, M.L.Frueh, A.E.Turner*, Astrophys. J., **91**, 383, 1986.
49. *D.Schaerer, C.Charbonnel, G.Meynet, A.Maeder, G.Schaller*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **102**, 339, 1993.
50. *A.Claret, A.Gimenez*, Astron. Astrophys., **244**, 319, 1991.
51. *Г.Н.Дремова, М.А.Свечников*, Кинемат. и физ. небесн. тел, **16**, 169, 2000.
52. *A.Maeder, G.Meynet*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **89**, 451, 1991.
53. *O.R.Pols, C.A.Tout, K.-P.Schroder, P.P.Eggleton, J.Manners*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **289**, 869, 1997.
54. *P.M.Hejlesen*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **39**, 347, 1980.