

УДК 524.332+524.6-36

## О МАССАХ ЗВЕЗД ТИПА RR LYRAE ГАЛАКТИЧЕСКОГО ПОЛЯ С РАЗНЫМ ХИМИЧЕСКИМ СОСТАВОМ

© 2019 г. В. А. Марсаков<sup>1\*</sup>, М. Л. Гожа<sup>1\*\*</sup>, В. В. Коваль<sup>1\*\*\*</sup><sup>1</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.; принята в печать 13.09.2018 г.

К опубликованному ранее авторскому компилятивному каталогу, содержащему, в частности, относительные содержания нескольких химических элементов в 100 лиридах поля, добавлены ускорения силы тяжести и эффективные температуры. По этим параметрам атмосфер с помощью эволюционных треков Дартмутской базы данных определены массы звезд, и проведен сравнительный анализ свойств лирид с разным химическим составом. Найдено, что массы богатых металлами ( $[Fe/H] > -0.5$ ) лирид с кинематикой тонкого диска заключены в интервале  $(0.51-0.60) M_{\odot}$ . За время существования этой подсистемы дойти до горизонтальной ветви может лишь звезда с начальной массой более  $1 M_{\odot}$ . Чтобы стать лиридой, она должна сбросить на стадии красного гиганта примерно половину своей массы. Возможной причиной появления таких молодых, богатых металлами лирид могут оказаться высокие начальные содержания гелия в их предшественниках. Действительно, согласно Дартмутским эволюционным трекам, при  $Y = 0.4$  звезда уже с начальной массой  $0.8 M_{\odot}$  успеет за это время проэволюционировать и стать переменной звездой типа RR Lyrae. Такие звезды должны потерять на стадии красного гиганта  $(0.2-0.3) M_{\odot}$ , и такая потеря представляется вполне реальной. Населения красных гигантов и лирид с такими содержаниями гелия уже обнаружены в балдже, и часть из них вполне может быть вынесена в околосолнечные окрестности возмущениями, вызываемыми неоднородностями гравитационного потенциала Галактики.

DOI: 10.1134/S0004629919020063

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением исследования звезд типа RR Lyrae (лирид) галактического поля, начатого в [1–3]. В них приведено описание созданного компилятивного каталога, содержащего положения, скорости и металличности для 415 лирид поля, а также относительные содержания  $[el/Fe]$  12 химических элементов, в том числе четырех  $\alpha$ -элементов (Mg, Ca, Si и Ti), для 100 лирид. На основе этого каталога исследованы связи между химическими и пространственно-кинематическими свойствами лирид поля. В частности, было показано, что, несмотря на обычно декларируемый большой возраст этих звезд, среди них есть представители самой молодой подсистемы Галактики — тонкого диска, и обращено внимание на проблему существования металлических лирид с  $[Fe/H] > -0.5$ . Действительно, согласно теоретическим расчетам, чтобы попасть на горизонтальную ветвь, начальные массы этих звезд должны быть довольно малы,  $(0.55-0.8) M_{\odot}$  [4], а такие

звезды эволюционируют более 10 млрд. лет, т.е. дольше времени существования в Галактике подсистемы тонкого диска. Более массивные металлические звезды попадают в область красного сгущения, находящуюся в стороне от полосы нестабильности, и переменными быть не могут. Однако кинематика и химический состав этих звезд в нашем исследовании с высокой вероятностью свидетельствуют об их принадлежности именно тонкому диску и об их более молодом возрасте. Еще 70 лет назад Кукаркин [5] обратил внимание на “особенные” лириды поля (тогда их называли короткопериодическими цефеидами) с периодами менее 0.43 дня, которые отсутствовали в шаровых скоплениях и сильнее концентрировались к галактической плоскости, чем лириды с более длинными периодами. Впоследствии выяснилось, что большинство из них оказались богаты металлами. Несмотря на длинную историю их изучения, природа металлических лирид до сих пор остается непонятной. В работе [6] было предложено полуэмпирическое объяснение образования богатых металлами сравнительно молодых лирид в результате потери значительной доли массы ( $\sim 0.5 M_{\odot}$ ) на стадии эволюции красного гиганта. Версия не стала популярной, хотя и не бы-

\*E-mail: marsakov@sfnu.ru

\*\*E-mail: gozha\_marina@mail.ru

\*\*\*E-mail: vvkoval@sfnu.ru

ла опровергнута. Оказалось также, что и физические процессы, происходящие в богатых и бедных металлами лиридах, различаются. Так, в работе [7] подробно исследованы процессы, происходящие при пульсации этих переменных, и обнаружены существенные различия в кинематике оболочек богатых ( $[Fe/H] > -1.0$ ) и бедных металлами лирид. В итоге сделан вывод, что хотя все звезды типа RRab являются звездами горизонтальной ветви, богатые металлами лириды имеют специфическую природу “*sui generis*”.

В работе [8] высказано предположение, что наиболее металличная и долгопериодическая лирида из нашего списка (КР Суг) скорее всего является классической цефеидой с ультракоротким периодом. Возможно, что все или часть из металлических лирид на самом деле могут также оказаться цефеидами, пульсирующими в обортонах с периодами менее суток. Такие цефеиды уже открыты в Большом и Малом Магеллановых Облаках в рамках проекта OGLE. Поэтому в работах [1, 3] мы предположили, что причину кинематической и химической молодости богатых металлами лирид следует искать в их классификации как переменных. Но при этом их массы должны быть даже выше, чем у лирид с меньшей температурой, что противоречит общей тенденции увеличения масс звезд горизонтальной ветви с уменьшением температуры. Действительно, в работе [7] найдено, что у богатых металлами лирид эффективная температура и ускорение силы тяжести выше, чем у бедных металлами. Между тем, согласно теоретическим расчетам, с увеличением ускорения силы тяжести на поверхности звезды ( $\lg g$ ) массы звезд горизонтальной ветви увеличиваются, но с увеличением металличности они, наоборот, уменьшаются. В итоге априори трудно что-либо сказать о массе конкретной лириды.

Поэтому данная работа посвящена определению масс лирид поля с опубликованными содержаниями химических элементов и параметрами атмосфер по теоретическим эволюционным трекам и проведению сравнительного анализа свойств металлических лирид с целью приблизиться к пониманию их природы.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Значения эффективных температур  $T_{\text{эфф}}$  и ускорений силы тяжести  $\lg g$  для всех 100 переменных типа RR Lyr нашего каталога получены из тех же 25 статей 1995–2017 гг., которые послужили нам ранее источниками информации для нахождения содержания химических элементов в атмосферах этих звезд [1]. Ссылки на эти статьи можно найти в on-line каталоге.

В лиридах, периодически пульсирующих переменных, параметры атмосферы зависят от фазы пульсации. Считается, что наиболее точные параметры атмосферы получают в фазе минимума блеска ( $\phi \sim 0.8$ ), когда атмосфера звезды практически не подвержена влиянию пульсаций (см., напр., [9, 10]). Фундаментальные параметры звездных атмосфер  $T_{\text{эфф}}$  и  $\lg g$  можно определить как спектроскопическими, так и фотометрическими методами. В некоторых работах авторы сами рекомендовали более предпочтительные значения параметров из полученных ими различными методами. В случае отсутствия авторского предпочтения, мы вычисляли средние значения параметров как по фазам, так и по методам. При этом учет значений только для фаз, близких к фазе минимума блеска, не привел к сколько-нибудь существенному изменению средних величин  $T_{\text{эфф}}$  и  $\lg g$ .

В большинстве работ авторы оценивали ошибки параметров. Так, спектроскопические определения  $T_{\text{эфф}}$  и  $\lg g$  дают разброс неопределенности от 40 до 300 К и от 0.1 до 0.5 dex соответственно при средних  $\varepsilon(T_{\text{эфф}}) = 115$  К и  $\varepsilon(\lg g) = 0.24$ . Ошибки  $T_{\text{эфф}}$  и  $\lg g$ , определенные фотометрическими методами, варьируются от 100 до 250 К и от 0.1 до 0.3 dex соответственно; средние авторские ошибки в этом методе  $\varepsilon(T_{\text{эфф}}) = 170$  К и  $\varepsilon(\lg g) = 0.18$ . Моды оцененных авторами ошибок при определении параметров любыми методами примерно равны для эффективной температуры 200 К, для ускорения силы тяжести 0.3 dex. Поэтому при отсутствии в статьях указаний на неопределенности измерения рассматриваемых параметров мы принимали именно такие величины ошибок.

Эффективные температуры и ускорения силы тяжести для 40 переменных типа RR Lyr были определены в двух и более работах. Для этих звезд мы вычислили средневзвешенные значения параметров с весовыми коэффициентами, обратно пропорциональными неопределенностям, указанным авторами работ. По этим же лиридам мы построили распределения отклонений всех определений обоих параметров от соответствующих средневзвешенных. Оказалось, что все распределения хорошо описываются гауссианами, что свидетельствует о случайности различия величин параметров, полученных разными авторами. Средние значения их дисперсий дают оценки внешних сходимостей параметров, определенных разными авторами, которые получились равными:  $\varepsilon(T_{\text{эфф}}) = 226 \pm 15$  К и  $\varepsilon(\lg g) = 0.25 \pm 0.02$ . Как можно увидеть, величины внешних сходимостей оказались одного порядка с усредненными по всем методам авторскими ошибками.

В табл. 1 приведены параметры атмосфер для 100 лирид с известными содержаниями химических

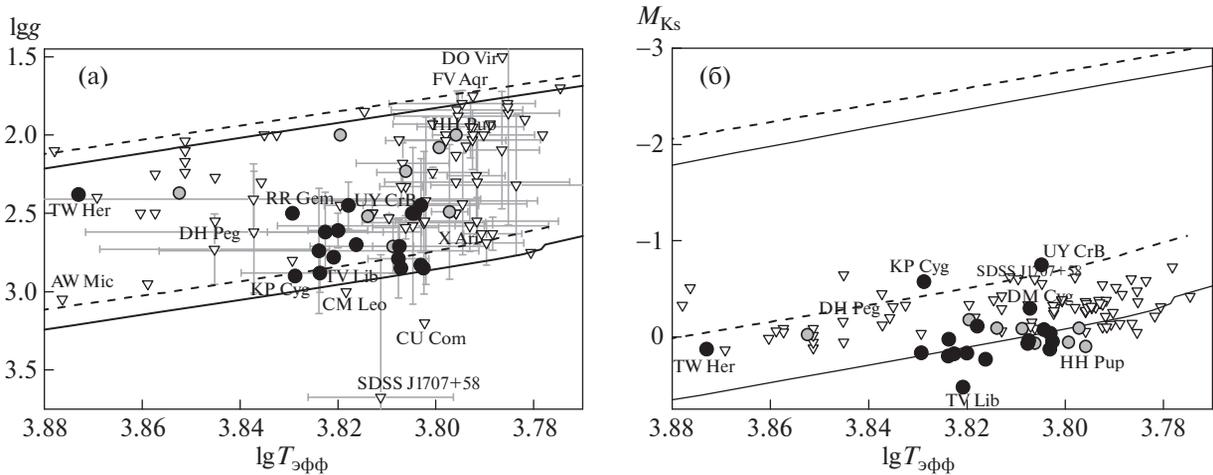
Таблица 1. Астрофизические параметры лирид

Звезда	Содержание, dex		$T_{\text{эфф}}$ , К			lg $g$ , dex			Масса, $M_{\odot}$
	[Fe/H]	[ $\alpha$ /Fe]	HP	min	max	HP	min	max	
SW And	-0.22	0.00	6419	6184	6735	2.71	2.50	2.85	0.53
CI And	-0.43	0.07	6373			2.50			0.54
DR And	-1.37	0.40	6170	6000	6300	2.00			0.53
WY Ant	-1.88	0.34	6319	6150	6487	2.24	2.20	2.27	0.54
XZ Aps	-1.79	0.45	6319	6200	6438	1.93	1.90	1.95	0.53
BS Aps	-1.48	0.40	6202	6000	6404	2.03	1.80	2.18	0.54
AA Aql	-0.32	0.18	6550			2.70			0.56
SW Aqr	-1.38	0.28	6200			1.95			0.52
BR Aqr	-0.69	0.26	6515			2.52			0.53
DN Aqr	-1.76	0.34	6100			1.80			0.53
FV Aqr	-2.59	0.41	6200			1.75			<0.54
X Ari	-2.51	0.46	6378	6109	6950	2.58	2.10	3.10	0.68
ASAS J085254-0300.3	-1.53	0.31	7400			2.40			0.53
ASAS J162158+0244.5	-1.84	0.31	7200			2.25			0.53
RS Boo	-0.21	0.03	6666	6233	7275	2.74	2.40	3.20	0.53
ST Boo	-1.73	0.41	6143	6081	6250	2.63	2.50	2.71	0.64
TW Boo	-1.47	0.37	6250			2.13			0.53
BPS CS 22881-039	-2.72	0.40	6117	5950	6170	2.10	1.85	2.60	0.56
BPS CS 22940-070	-1.41	0.38	6191	6130	6300	2.26	1.85	2.40	0.55
BPS CS 30317-056	-2.85	0.41	6000			2.00			0.55
BPS CS 30339-046	-2.70	0.01	7000			2.55			0.60
W CVn	-1.22	0.42	6250			2.50			0.56
UZ CVn	-2.21	0.73	6400			2.33			0.57
YZ Cap	-1.50	0.40	7100			2.24			0.52
RZ Cep	-2.10	0.57	6500			2.50			0.60
RR Cet	-1.48	0.41	6339	5966	6650	2.42	1.70	2.77	0.57
RX Cet	-1.38	0.45	6800			2.00			0.51
UU Cet	-1.36	0.36	6210	6165	6250	2.58	2.38	2.71	0.62
U Com	-1.41	0.44	7000			2.27			0.53
CU Com	-2.38	0.38	6343			3.20			—
UY CrB	-0.45		6380			2.50			0.54
W Crt	-0.75	0.17	6400			2.23			0.52
XZ Cyg	-1.50	0.24	6175			2.63			0.64
DM Cyg	0.03	-0.06	6415			2.85			0.54
KP Cyg	0.15	-0.02	6742			2.90			0.53
DX Del	-0.31	-0.02	6354	6150	6500	2.45	2.13	2.73	0.54
SU Dra	-1.87	0.38	6161	6083	6300	2.69	2.50	2.78	0.80
SW Dra	-1.27	0.39	6033			2.75			0.65
XZ Dra	-0.77	0.21	6438	6375	6500	2.71	2.50	2.85	0.60
AE Dra	-1.46	0.51	6525			1.85			0.51
SV Eri	-1.99	0.27	6450	6400	6500	2.53	2.50	2.55	0.62
BK Eri	-1.72	0.36	6840			2.00			0.51
CS Eri	-1.70	0.35	6750			2.80			0.63
SX For	-1.80	0.33	5950			1.70			0.52
RR Gem	0.01	-0.20	6750			2.50			0.51
SZ Gem	-1.65	0.42	6050			1.90			0.52
TY Gru	-1.88	0.37	6250			2.30			0.57
BO Gru	-1.83	0.37	7100			2.04			0.52
TW Her	-0.35	-0.01	7465			2.38			0.52
VX Her	-1.46	0.36	6188	5975	6525	2.30	2.05	2.72	0.56
VZ Her	-1.30	0.60	6250			2.50			0.59

Таблица 1. Окончание

Звезда	Содержание, dex		$T_{\text{эфф}}$ , К			$\lg g$ , dex			Масса, $M_{\odot}$
	[Fe/H]	[ $\alpha$ /Fe]	HP	min	max	HP	min	max	
DH Hya	-1.53	0.39	6280			2.00			0.52
DT Hya	-1.23	0.42	6280	6100	6460	2.04	2.00	2.10	0.52
V Ind	-1.45	0.35	6409	6267	6550	2.18	2.03	2.29	0.53
RR Leo	-1.39	0.50	6400	6300	6500	2.59	2.50	2.65	0.60
SS Leo	-1.75	0.37	6875	6100	7650	2.41	2.05	2.50	0.55
ST Leo	-1.31	0.29	6150			1.93			0.52
CM Leo	-1.93	0.42	6582			3.00			>1.5
TV Lib	-0.43	0.29	6620			2.78			0.54
TT Lyn	-1.47	0.24	6189	6016	6500	2.55	2.45	2.75	0.62
RR Lyr	-1.49	0.29	6345	6125	6500	2.56	2.13	3.04	0.60
CN Lyr	-0.04	-0.01	6355			2.83			0.54
IO Lyr	-1.35	0.35	6420			2.03			0.54
KX Lyr	-0.42	0.09	6663	6495	7000	2.88	2.75	3.00	0.58
MACHO 176.18833.411	-0.90	0.26	6600			2.00			0.51
Z Mic	-1.51	0.45	6098	5950	6246	1.86	0.60	2.03	0.52
AW Mic	-2.16	0.39	7522			3.05			0.69
RV Oct	-1.64	0.46	6247	6050	6443	1.84	1.70	1.94	0.51
UV Oct	-1.75	0.35	6243	6050	6435	1.88	1.70	2.00	0.52
V 413 Oph	-0.75	0.30	7120			2.37			0.52
V 445 Oph	0.11	-0.05	6647	6450	6818	2.62	2.43	2.94	0.52
AO Peg	-1.26	0.39	6342			2.55			0.60
AV Peg	-0.19	-0.11	6607	6513	6700	2.61	2.48	2.70	0.52
BH Peg	-1.17	0.40	6500			2.50			0.55
DH Peg	-1.31	0.44	7002	6500	7278	2.73	2.50	2.95	0.59
AR Per	-0.29	0.02	6422	6315	6500	2.79	2.50	3.00	0.57
RU Psc	-2.04	0.51	6500			2.50			0.60
HH Pup	-0.93	-0.08	6250			2.00			0.52
V 701 Pup	-2.90	0.48	7200			2.50			0.57
VW Scl	-1.22	0.35	6850			2.30			0.52
SDSS J170733.93+585059.7	-2.79	0.89	6475	6250	6700	3.68	2.38	4.20	—
VY Ser	-1.78	0.35	6075	5900	6400	2.32	1.85	2.75	0.59
AN Ser	0.00	-0.20	6575	6500	6650	2.45	2.30	2.60	0.51
V 456 Ser	-2.64	0.32	6600			2.45			0.60
T Sex	-1.55	0.26	7225			2.95			0.63
V 440 Sgr	-1.16	0.36	6874	6269	7400	2.62	2.15	2.93	0.55
V 1645 Sgr	-1.94	0.39	6200			2.00			0.54
W Tuc	-1.76	0.32	6100			1.82			0.53
BK Tuc	-1.65	0.38	6220			2.07			0.53
TYC 4887-622-1	-1.79	0.31	7100			2.10			0.53
TYC 6644-1306-1	-1.78	0.33	7250			2.50			0.56
TYC 8776-1214-1	-2.72	0.44	7100			2.17			0.54
RV UMa	-1.25	0.35	6413	6370	6500	2.33	2.27	2.50	0.54
TU UMa	-1.41	0.32	6231	6116	6500	2.44	2.10	2.75	0.58
CD Vel	-1.67	0.38	6208	6050	6366	1.95	1.70	2.10	0.52
ST Vir	-0.85	0.13	6300			2.08			0.52
UU Vir	-0.86	0.30	6269	6225	6333	2.49	1.97	2.83	0.56
UV Vir	-1.10	0.42	7550			2.10			0.51
AS Vir	-1.68	0.41	6232	6000	6436	1.80	1.70	1.87	0.51
DO Vir	-1.57	0.33	6115			1.50			<0.50

Примечание. В столбцах “HP” приведены параметры, использованные в настоящей работе.



**Рис. 1.** Связь эффективной температуры  $\lg T_{\text{эфф}}$  с ускорением силы тяжести  $\lg g$  (а) и абсолютной звездной величиной ( $M_{K_s}$ ) (б) для звезд типа RR Лярае нашей выборки. Черными кружками выделены звезды с  $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.5$ , серыми кружками — с  $-0.5 > [\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$ , а белыми треугольниками — самые малометаллические звезды с  $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ . Для лирид, у которых параметры атмосфер определены в нескольких работах, бары показывают максимальные и минимальные значения параметров данной лириды. На обеих панелях проведены по два одинаковых эволюционных трека для звезд солнечного химического состава с массами  $0.49$  и  $0.54 M_{\odot}$  (верхняя и нижняя сплошные линии соответственно). Штриховыми линиями показаны эволюционные треки для звезд массами  $0.52$  и  $0.75 M_{\odot}$ , у которых металличность в сто раз меньше солнечной, а относительные содержания  $\alpha$ -элементов составляют  $[\alpha/\text{Fe}] = 0.4$ . Указаны названия лирид, которые на разных диаграммах (в том числе в [1–3]) далеко отходят от наибольшей концентрации точек.

элементов. Во втором столбце дана металличность из каталога [1], в третьем столбце — относительное содержание  $\alpha$ -элементов  $[\alpha/\text{Fe}]$  (см. далее). В столбцах с четвертого по шестой представлены данные об эффективной температуре: принятые нами значения (НР), а также наибольшее и наименьшее значения  $T_{\text{эфф}}$  из рекомендованных авторами статей или усредненных нами по фазам и методам, если  $T_{\text{эфф}}$  определялась в двух или более работах. Следующие три столбца содержат аналогичные параметры для ускорения силы тяжести  $\lg g$  на поверхности звезды. В последнем столбце указана масса звезды, определенная нами с помощью эволюционных треков (см. далее).

На рис. 1а приведена диаграмма “эффективная температура ( $\lg T_{\text{эфф}}$ )—ускорение силы тяжести ( $\lg g$ )” для 100 лирид нашей выборки. Черными кружками обозначены самые богатые металлами звезды, серыми кружками — с металличностью  $-0.5 > [\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$ , а белыми треугольниками — самые малометаллические. Указанные выше ошибки температур и ускорений силы тяжести приводят к неопределенности найденных нами значений масс  $\varepsilon(M/M_{\odot}) \cong 0.015$ . Из диаграммы можно увидеть, что положение металлических лирид на ней несколько противоречит выводу работы [7], в которой утверждается, что металлические лириды имеют, в основном, более высокие значения как  $\lg g$ , так и  $\lg T_{\text{эфф}}$ , чем менее металлические звезды, поскольку,

в отличие от данных [7], в нашей выборке появилось заметное количество малометаллических лирид с более высокими температурами, чем у металлических. Однако большая часть малометаллических лирид, образующих сгущение на диаграмме, все же более холодные. Заметим, что все малометаллические лириды сгущения (кроме НН Руп) по кинематике принадлежит гало или толстому диску, т.е. имеют большой возраст, позволяющий даже изначально маломассивным звездам добраться до горизонтальной ветви.

Напомним, что в нашей выборке лирид [1] использовались пространственно-кинематические данные из каталога Дамбиса и др. [11], в котором звездная величина в инфракрасном фильтре  $K_S$  использовалась для исправления за межзвездное покраснение и калибровки расстояний до лирид. Подчеркнем, что переменные типа RR Лиры по-прежнему остаются одними из немногих объектов, легко идентифицируемых на значительных расстояниях, для которых невозможны непосредственные измерения параллакса даже современными инструментами. Поэтому интересно посмотреть, насколько абсолютные звездные величины, полученные по калибровке, соответствуют теоретическим. Заменяя в формуле из [11] металличности на наши спектроскопические данные, мы вычислили абсолютные звездные величины по периодам переменности лирид из того же каталога:  $M_{K_s} = -0.769 + 0.088 \cdot [\text{Fe}/\text{H}]_{Sp} - 2.33 \lg P_F$ , где

$[\text{Fe}/\text{H}]_{Sp}$  — спектроскопические металличности, а  $P_F$  — фундаментальный период пульсаций лириды.

На рис. 1б для тех же звезд построена диаграмма “эффективная температура—абсолютная звездная величина ( $M_{K_s}$ )”. Для удобства сопоставления на обеих диаграммах нанесены эволюционные треки разных масс с одинаковыми входными параметрами. Из сравнения диаграмм видно, что в целом распределения звезд разной металличности на них примерно одинаковые, однако у отдельных звезд величины ускорения силы тяжести и вычисленные абсолютные величины противоречат друг другу. В частности, лириды SDSS J1707+58 и KP Cyg имеют большие величины  $\lg g$ , но светимости получились высокими. И, наоборот, у HH Pup довольно маленькая величина  $\lg g$ , тогда как светимость низкая. В данной работе мы не будем выяснять причины расхождения для каждой лириды, поскольку для этого необходимы дополнительные исследования. Имена звезд с наибольшими расхождениями нанесены на диаграммах; в частности, для лириды FV Aqr, DO Vir и CM Leo удалось указать лишь верхний или нижний предел массы, а для CU Com, SDSS J1707+58 определить массу не представляется возможным, поскольку величины их  $\lg g$  выходят за пределы диапазона, ограниченного пределами используемой сетки моделей для звезд горизонтальной ветви.

Отметим общие закономерности на панелях рис. 1. Обращает на себя внимание, что звезды на диаграмме “ $\lg T_{\text{эфф}} - M_{K_s}$ ” вытягиваются практически параллельно оси абсцисс, тогда как на диаграмме “ $\lg T_{\text{эфф}} - \lg g$ ” они лежат параллельно теоретическим линиям равных масс. Две из наиболее металличных лирид (KP Cyg и UY CrB) на диаграмме “ $\lg T_{\text{эфф}} - M_{K_s}$ ” оказались самыми яркими, хотя остальные металличные лириды имеют самые низкие светимости. Менее металличные лириды ( $-1.0 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.5$ ) также лежат вблизи нижней границы на диаграмме, тогда как на диаграмме “ $\lg T_{\text{эфф}} - \lg g$ ” они лежат заметно выше наиболее металличных, и лишь немногим более яркими получились самые малометаллические лириды. По-видимому, определенные по спектрам параметры атмосфер являются более корректными, чем расстояния и абсолютные звездные величины, полученные по калибровочным зависимостям. Кроме того, эти параметры надежнее рассчитываются и теоретически в моделях атмосфер. Поэтому мы предпочли массы определять именно по ним.

### 3. МАССЫ ЛИРИД

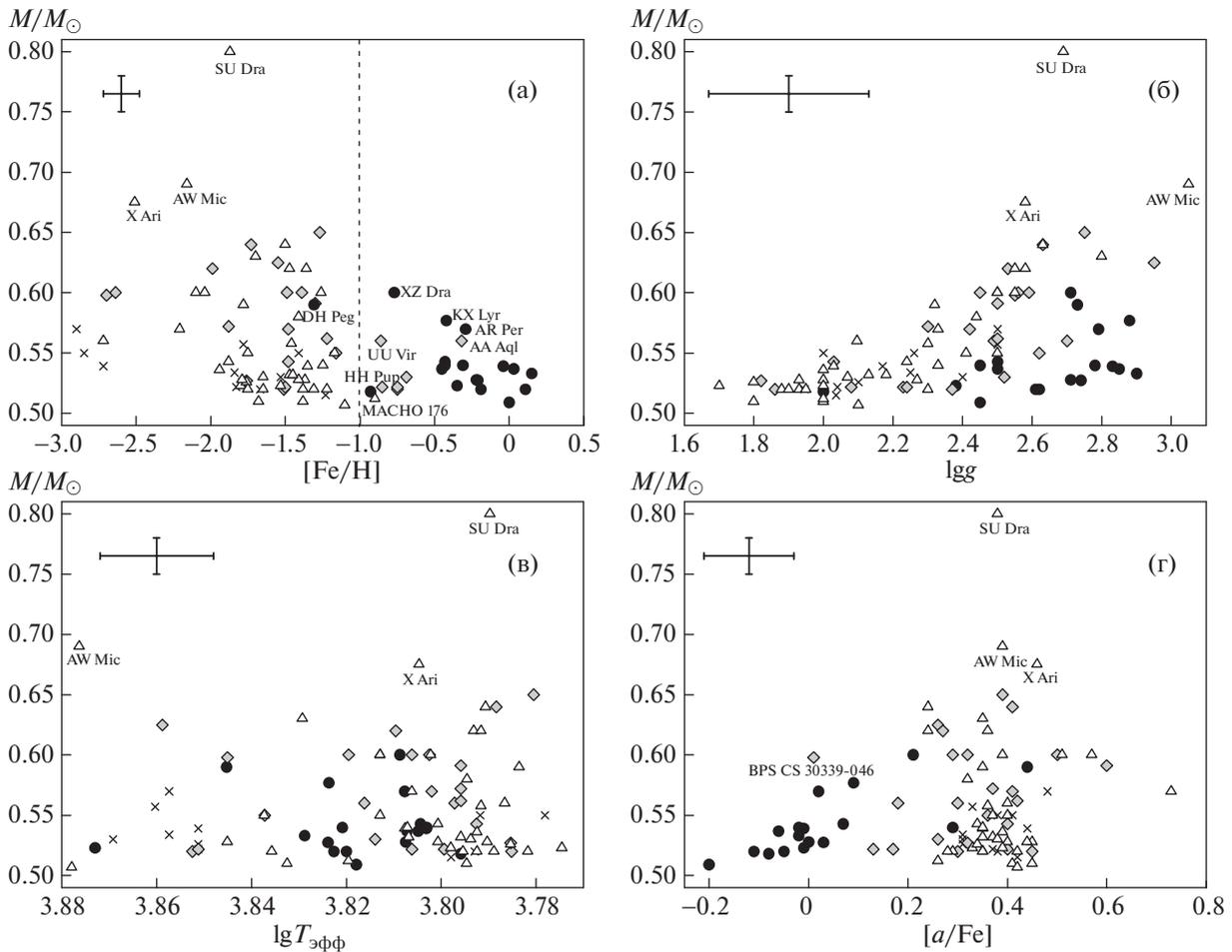
Для определения масс лирид нашей выборки мы использовали эволюционные треки Дартмутской базы данных [12]. В этих теоретических расчетах

предусмотрена возможность учитывать не только общее содержание тяжелых элементов  $[\text{Fe}/\text{H}]$  в звездах, но и относительные содержания в них  $\alpha$ -элементов  $[\alpha/\text{Fe}]$ , при этом содержание гелия  $Y$  изменяется пропорционально металличности. Но есть еще возможность задать увеличенные содержания гелия. Поскольку эволюционные треки для дискретных масс приведены по  $[\text{Fe}/\text{H}]$  с шагом 0.5 dex, а по  $[\alpha/\text{Fe}]$  с шагом 0.2 dex, мы массу каждой лириды находили путем интерполяции между всеми этими параметрами. Для определения значения  $[\alpha/\text{Fe}]$  мы усредняли относительные содержания магния, кальция, кремния и титана, приведенные в нашем каталоге [1]. При этом обилия всех четырех элементов известны для большинства звезд нашей выборки. В случае отсутствия информации о каком-либо из перечисленных выше химических элементов среднее получали по остальным известным  $\alpha$ -элементам (соответствующие величины  $[\alpha/\text{Fe}]$  приведены в табл. 1). И только для одной звезды (UY CrB) в нашем каталоге нет содержаний  $\alpha$ -элементов. Для поиска массы этой лириды использовалось обилие  $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0$ , типичное для звезд с солнечной металличностью, близкую к которой имеет UY CrB<sup>1</sup>. Результат определения масс лирид представлен в последнем столбце табл. 1.

На рис. 1а для примера приведены по два эволюционных трека разных масс для солнечного химического состава и для в 100 раз менее металличного с характерно увеличенными относительными содержаниями  $\alpha$ -элементов ( $[\alpha/\text{Fe}] = 0.4$ ), примерно ограничивающие сверху и снизу лириды нашей выборки на диаграмме. Эволюционные треки меньших масс при любой металличности появляются в верхней части диаграммы, как правило, при более высокой температуре, тогда как треки больших масс не доходят до полосы неустойчивости в нижней части диаграммы и полностью лежат за пределами ее низкотемпературной границы. В итоге, у звезд горизонтальной ветви с одинаковыми параметрами атмосфер массы у менее металличных будут больше. В сторону больших масс немного смещает и уменьшение относительных содержаний  $\alpha$ -элементов. Из диаграммы “ $\lg T_{\text{эфф}} - \lg g$ ” можно увидеть, что разброс фундаментальных параметров атмосфер и диапазон масс у лирид с высокой металличностью значительно уже, а сами массы в среднем меньше, чем у малометаллических лирид.

Продолжая сравнение с абсолютными звездными величинами, полученными в результате калибровки, мы провели те же эволюционные треки и на рис. 1б. Из диаграммы “ $\lg T_{\text{эфф}} - M_{K_s}$ ” видно,

<sup>1</sup> Увеличение  $[\alpha/\text{Fe}]$  не приводит к существенному изменению полученной по трекам массы этой звезды.



**Рис. 2.** Зависимость массы лирид нашей выборки от металличности (а), ускорения силы тяжести (б), эффективной температуры (в) и относительного содержания  $\alpha$ -элементов (г). Черными кружками обозначены лириды, принадлежащие по кинематическому критерию тонкому диску, серыми ромбами — толстому диску, белыми треугольниками — гало; косыми крестами обозначены нестратифицированные лириды. Вертикальная штриховая линия проведена через  $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0$ .

что при использовании абсолютных величин  $M_{K_s}$  диапазон найденных масс для наших лирид заметно сместился в сторону больших масс, оставив незаполненной верхнюю, маломассивную область на диаграмме и несколько опустив нижнюю границу. В итоге, самые нижние лириды на этой диаграмме попадают в область, куда не доходят эволюционные треки больших масс используемых теоретических расчетов. То есть значения найденных по периодам переменности и металличности абсолютных звездных величин лирид не согласуются с теоретическими положениями звезд горизонтальной ветви, и для многих из них определение масс по этим данным становится невозможным. По-видимому, калибровка из работы [11] требует некоторой корректировки.

На панелях рис. 2 приведены зависимости полученных значений масс лирид от их параметров атмосфер и химического состава. Разными значками обозначены звезды, попавшие в разные под-

системы Галактики. Для стратификации по подсистемам мы воспользовались кинематическим критерием из работы [13], в котором по компонентам пространственных скоростей вычисляются вероятности принадлежности лирид подсистемам тонкого диска, толстого диска и гало (подробнее см. [1]). При этом подразумевается, что компоненты пространственных скоростей звезд в каждой подсистеме подчиняются нормальным распределениям.

На рис. 2а приведена зависимость масс от металличности. Видим, что нижний предел масс остается постоянным при любой металличности, тогда как верхний предел масс демонстрирует линейный рост во всем диапазоне металличности. Однако в диапазоне  $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$  наблюдается скачкообразно более резкая концентрация звезд к нижней границе массы, чем в менее металличном диапазоне. Причем такая закономерность никак не связана с принадлежностью звезды по

кинематике к той или иной подсистеме, т.е. с их пространственными скоростями, а только с металличностью: все металлические лириды и толстого диска, и гало имеют малые массы. Напомним, что при переходе через пограничное значение  $[Fe/H] = -1.0$  происходит и скачкообразное увеличение разброса удалений от галактической плоскости, а также увеличение дисперсии пространственных скоростей у наших лирид (см. [1, рис. 1]). Такое поведение дисперсии скоростей спровоцировало традиционное использование разделения лирид этим значением металличности по принадлежности к подсистемам толстого диска и гало, несмотря на то, что именно кинематика определяет пространственное распределение звезд в подсистемах. Тем не менее мы полагаем, что скачок масс коррелирует со скачком скорости только из-за того, что оба параметра связаны через металличность, но физически масса от скорости не зависит. Заметим, что и шаровые звездные скопления также обнаруживают резкое различие пространственно-кинематических свойств при переходе через то же значение металличности (см., напр., [14]).

Вполне ожидаемые экспоненциальные зависимости получились для лирид каждой подсистемы на диаграмме  $\lg g - M/M_{\odot}$  (см. рис. 2б). Видно, что последовательности лирид тонкого диска и гало практически не пересекаются, поскольку металличности звезд этих подсистем, как видно из диаграммы  $[Fe/H] - M/M_{\odot}$ , также не пересекаются. К тому же при данной величине  $\lg g$  массы богатых металлами лирид всегда меньше, чем у бедных металлами. Зато полоса толстого диска частично внедряется в последовательности обеих подсистем из-за очень широкого в ней диапазона металличности. Далее, из диаграммы  $\lg T_{\text{эфф}} - M/M_{\odot}$  на рис. 2в) видно, какие массы имеют лириды разных подсистем при разной температуре. Можно лишь отметить, что независимо от принадлежности по кинематике к той или иной подсистеме, с уменьшением температуры верхний предел масс у лирид увеличивается, тогда как нижний предел не зависит от температуры. На последней диаграмме  $[\alpha/Fe] - M/M_{\odot}$  на рис. 2г) также налицо увеличение массы с ростом относительных содержаний  $\alpha$ -элементов. Причем из-за отсутствия лирид с  $[\alpha/Fe] \sim 0.15$  можно говорить о скачкообразном увеличении средней массы при переходе через это пограничное значение. Получилось это из-за того, что у большинства лирид тонкого диска относительные содержания  $\alpha$ -элементов близки к солнечным. Тогда как при переходе к менее металличным звездам они скачком увеличиваются.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе показано, что практически все найденные в литературе величины эффективных тем-

ператур ( $T_{\text{эфф}}$ ) и ускорений силы тяжести ( $\lg g$ ) для переменных типа RR Лиры поля попадают по обоим параметрам атмосфер в полосу неустойчивости соответствующих теоретических эволюционных треков звезд горизонтальной ветви, что позволяет найти их массы. Мы полагаем это одним из свидетельств корректности определенных параметров их атмосфер. С другой стороны отмечается, что для абсолютных звездных величин  $M_{K_s}$ , полученных для этих звезд по калибровочным зависимостям от периодов переменности и металличности, такого согласия не наблюдается. В результате на диаграмме  $\lg T_{\text{эфф}} - M_{K_s}$  большая часть выделенного теоретического пространства для переменных звезд осталась незаполненной, и значительная доля наших лирид попала в область, куда согласно теоретическим расчетам они попасть не могут.

Как показала наша проверка, величины  $M_{K_s}$  и  $\lg g$  совершенно не коррелируют. Это свидетельствует о некоторой некорректности калибровки абсолютных величин лирид по периодам переменности и металличности. Поэтому массы мы находили исключительно по параметрам атмосфер, определенным из спектров. В результате установлено, что нижние пределы масс богатых и бедных металлами лирид совпадают и равны примерно половине солнечной массы. Зато верхний предел масс быстро уменьшается с увеличением металличности. Причем малометаллические лириды с малой массой принадлежат в основном подсистеме гало и в меньшей степени толстому диску, то есть это очень старые звезды, и с ними проблем нет. Тогда как при традиционном предположении, согласно которому потеря массы звездой на стадии красного гиганта и последующей гелиевой вспышки порядка  $(0.1-0.2) M_{\odot}$  (см. [6] и ссылки в ней), начальные массы большинства металлических звезд получаются слишком малыми, чтобы достичь горизонтальной ветви за время меньше времени существования подсистемы тонкого диска.

Анализ содержаний химических элементов в близких звездах показывает, что и в толстом диске имеются старые звезды с солнечной металличностью и низкими относительными содержаниями  $\alpha$ -элементов, но с возрастными более 10 млрд. лет (см., напр., [15]). Однако лириды с солнечным химическим составом демонстрируют еще и очень “молодую” кинематику, что нехарактерно для звезд этой подсистемы, а справедливо только для тонкого диска. Если предположить, что это более массивные звезды — цефеиды — пульсируют в обертоне, то есть с более коротким периодом, то тогда они должны были бы демонстрировать и систематически более низкие значения ускорения силы тяжести и более низкие температуры, типичные для цефеид. Но такого мы не наблюдаем.

Можно предположить и другое их происхождение. Действительно, по близким звездам с кинематикой тонкого диска обнаружено, что уже на самых начальных этапах формирования тонкого диска в нем появилось небольшое количество звезд с солнечным химическим составом (см. [16, рис. 8]). Это так называемые старые металличные звезды, которые, как полагают, родились близко к галактическому центру и мигрировали оттуда в результате возмущающего действия асимметричных гравитационных компонентов, таких как центральный бар или спиральные волны плотности [17]. Согласно Дартмутским эволюционным трекам звезда с первоначальной массой  $1.05 M_{\odot}$  и с солнечным химическим составом достигнет горизонтальной ветви через  $\sim 10$  млрд. лет, что соответствует обычно принимаемому возрасту тонкого диска. Но такие массивные звезды, чтобы попасть в полосу неустойчивости на горизонтальной ветви, должны на стадии красного гиганта потерять примерно половину своей массы, как это и предполагали авторы работы [6].

Еще уменьшить начальную массу звезды можно, предположив, что начальное содержание гелия в предшественниках металличных лирид было выше. Действительно, согласно Дартмутским теоретическим расчетам, звезда даже с массой  $0.8 M_{\odot}$  и начальным содержанием гелия  $Y = 0.4$  дойдет до горизонтальной ветви за  $\sim 9.3$  млрд. лет. Чтобы попасть в полосу неустойчивости такие звезды должны потерять на стадии красного гиганта и в момент гелиевой вспышки ( $0.2-0.3 M_{\odot}$ ), но такая потеря уже вполне реальна. Действительно, современные расчеты звездных моделей [18] показывают, что в результате звездного ветра к окончанию эволюции на ветви красных гигантов, то есть еще до потери массы после гелиевой вспышки, звезда с такой начальной массой может потерять даже более  $0.2 M_{\odot}$ , правда для этого в эмпирической формуле, вычисляющей потерю массы, следует предположить максимальное значение фактора интенсивности этого процесса. Кроме того, эти же расчеты показывают, что с увеличением содержания гелия в таких звездах они попадают в более высокотемпературную область горизонтальной ветви, как и наши металличные лириды на рис. 1. Звезды с повышенными содержаниями гелия уже обнаружены в балдже. Так, в недавней работе [19] оценены содержания гелия в населении звезд типа RRab по огромной выборке лирид из OGLE IV [20] с помощью метода, основанного на том, что согласно модели нелинейных конвективных пульсаций минимальный период в фундаментальной моде RRab сильно зависит от содержания в них гелия. В частности, в работе был сделан вывод, что авторы “не могут исключить наличия в балдже небольшой

фракции переобогащенных гелием RRab, подобной обнаруженной среди гигантов красного сгущения балджа со средними  $Y = 0.28-0.35$ ” [21]. Для проверки последнего предположения желательнее исследовать содержания гелия в переменных типа RR Лиры поля, находящихся в настоящее время в окрестностях Солнца.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимного рецензента за конструктивные замечания, которые позволили улучшить статью. М.В.А. и Г.М.Л. благодарят за поддержку Минобрнауки РФ (госзадание 3.5602.2017/БЧ), а К.В.В. благодарит за поддержку Минобрнауки РФ (госзадание 3.858.2017/4.6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. А. Марсаков, М. Л. Гожа, В. В. Коваль, *Астрон. журн.* **95** (1), 54 (2018).
2. M. L. Gozha, V. A. Marsakov, and V. V. Koval', *Astrophysics* **61** (1), 41 (2018).
3. V. A. Marsakov, M. L. Gozha, V. V. Koval', and E. I. Vorobyov, *Astrophysics* **61** (2), 171 (2018).
4. M. Marconi, G. Coppola, G. Bono, V. Braga, *et al.*, *Astrophys. J.* **808**, 50 (2015).
5. Б. В. Кукаркин, *Исследование строения и развития звездных систем на основе изучения переменных звезд* (Москва–Ленинград, Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1949).
6. R. E. Taam, R. P. Kraft, and N. Suntzeff, *Astrophys. J.* **207**, 201 (1976).
7. M. Chadid, C. Sneden, and G. W. Preston, *Astrophys. J.* **835**, 187 (2017).
8. S. M. Andrievsky, V. V. Kovtyukh, G. Wallerstein, S. A. Korotin, and W. Huang, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122**, 877 (2010).
9. D. L. Lambert, J. E. Heath, M. Lemke, and J. Drake, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 183 (1996).
10. S. Liu, G. Zhao, Y.-Q. Chen, Y. Takeda, and S. Honda, *Res. Astron. and Astrophys.* **13**, 1307 (2013).
11. A. K. Dambis, L. N. Berdnikov, A. Y. Kniazev, V. V. Kravtsov, A. S. Rastorguev, R. Sefako, and O. V. Vozyakova, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **435** (4), 3206 (2013).
12. A. Dotter, B. Chaboyer, D. Jevremovic, V. Kostov, E. Baron, and J. W. Ferguson, *Astrophys. J. Suppl.* **178**, 89 (2008) (<http://stellar.dartmouth.edu/models/index.html>).

13. T. Bensby, S. Feldzing, and I. Lundstrom, *Astron. and Astrophys.* **410**, 527 (2003).
14. Т. В. Боркова, В. А. Марсаков, *Астрон. журн.* **77** (10), 750 (2000).
15. В. А. Марсаков, Т. В. Боркова, *Письма в Астрон. журн.* **31** (8), 577 (2005).
16. В. А. Марсаков, Т. В. Боркова, *Письма в Астрон. журн.* **32** (8), 419 (2006).
17. R. Schonrich and J. Binney, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **396**, 203 (2009).
18. X. Fu, A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, J. Montalbán, Y. Chen, and A. Nanni, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **476**, 496 (2018).
19. M. Marconi and D. Minniti, *Astrophys. J.* **853**, 20 (2018).
20. P. Pietrukowicz, S. Kozowski, J. Skowron, I. Soszynski, *et al.*, *Astrophys. J.* **811**, 113 (2015).
21. Y.-W. Lee and S. Jang, *Astrophys. J.* **833**, 236 (2016).