

О НАДЕЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕР ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД ТИПА RR LYRAE ПОЛЯ

М.Л.ГОЖА, В.А.МАРСАКОВ, В.В.КОВАЛЬ

Поступила 23 декабря 2018

Принята к печати 29 мая 2019

По опубликованным данным из 25 статей с 1995 по 2017гг. найдены эффективные температуры и поверхностные ускорения силы тяжести для 100 переменных звезд типа RR Лиры галактического поля с известным химическим составом. Атмосферные характеристики почти половины звезд из нашего списка определены в двух и более работах. Для этих звезд вычислены средневзвешенные значения параметров. Значения $T_{\text{эфф}}$ и $\log g$ практически всех исследуемых звезд попадают в теоретически рассчитанный диапазон, в котором далеко проэволюционировавшие звезды оказываются переменными. Мы проанализировали сходимости определений соответствующих параметров, полученных разными авторами. Сделан вывод о высокой надежности значений эффективных температур и ускорений силы тяжести у исследуемых переменных типа RR Лиры.

Ключевые слова: переменные типа RR Лиры галактического поля: параметры атмосфер

1. *Введение.* Переменные звезды типа RR Лиры (лириды) - маломассивные, короткопериодические ($P \sim 0^{\text{д}}.2 - 1^{\text{д}}.2$) радиально пульсирующие гиганты спектральных классов А-F в фазе горения гелия в ядре. На диаграмме "спектр-светимость" они населяют полосу неустойчивости горизонтальной ветви. Эти переменные служат источниками знаний о структуре, кинематике, химическом составе галактических подсистем.

Ранее для изучения свойств лирид нами был составлен компилятивный каталог пространственно-кинематических параметров для 415 переменных типа RR Лиры галактического поля, а для 100 из них собраны относительные содержания 13 химических элементов (Fe, O, Mg, Si, Ca, Ti, Na, Al, Y, Zr, Ba, La, Eu). Подробное описание каталога дано в [1,2], а сам каталог и ссылки на использованные источники можно найти в [3] или в электронном виде по адресу <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/AZh/95/54>. По данным каталога в работах [2,4] было проведено комплексное исследование химических и кинематических свойств населения лирид поля в нашей Галактике.

Цель данной работы - установление параметров атмосферы (эффективной температуры $T_{\text{эфф}}$ и ускорения силы тяжести на поверхности звезды $\log g$)

переменных типа RR Лиры галактического поля из нашего каталога, выяснение возможности определения по ним масс звезд и исследования свойств лиридов с разным химическим составом.

2. Зависимость параметров атмосфер от фазы пульсаций.

Атмосферные параметры лиридов, периодически пульсирующих переменных, зависят от фазы пульсации. По мнению ряда авторов, такому влиянию подвержены лириды типа RRab с асимметричной кривой блеска, вдоль которой есть области спокойных фаз и области ударных волн (см., например, [5,6]). Переменные RRc типа с почти симметричными (иногда синусоидальными) кривыми блеска не показывают очевидного наличия ударных волн в атмосфере, и вся кривая блеска таких лиридов пригодна для анализа [7].

В определенные фазы цикла пульсаций в атмосферах переменных звезд типа RRab возникают ударные волны. Выделяют две такие фазы пульсации: 1) главный удар, соответствующий так называемому "горбу" в фазе ($\sim 0.9-1.0$), когда падение фотосферы прекращается, атмосфера начинает расширяться и ее ускорение быстро растет и 2) ранний удар, соответствующий так называемому "удару" в фазе ~ 0.7 , вероятно, создаваемый сталкивающимися слоями газа, когда атмосфера звезды движется к минимальному радиусу. Расчеты показывают, что ускорение в фазу ранней ударной волны может увеличивать поверхностную гравитацию на $< 0.1 \text{ dex}$, а в фазу главного удара вплоть до $\Delta \log g = (0.6 - 0.8)$ по сравнению со статичным значением [8]. Однако следует учесть, что такие значительные вариации $\log g$ связаны с чувствительностью спектров к нестационарным процессам в фотосфере лиридов. Реальные же изменения поверхностной гравитации за счет радиальных пульсаций атмосферы в несколько раз меньше. Всплески температуры в течение цикла для некоторых звезд могут достигать $\approx 2000 \text{ K}$ [9].

Но динамическая фаза вблизи минимума радиуса ($\varphi \approx 0.9$), при которой ударная волна возникает за счет ускорения в атмосфере лиридов, протекает в течение очень короткого промежутка времени (около 15 мин), что составляет лишь малую часть от пульсационного периода. Во время же большинства фаз пульсаций атмосфера находится в квазистатическом равновесии и ее параметры $T_{\text{эфф}}$ и $\log g$ существенно не меняются. Спокойными считают две фазы. Фаза $\varphi \approx 0.35$ вблизи максимального радиуса с узкими симметричными спектральными линиями больше всего подходит для определения содержаний химических элементов [6]. Наиболее точные параметры атмосферы можно получить в фазе минимума блеска ($\varphi \approx 0.75 - 0.80$), когда атмосфера практически не подвержена влиянию пульсаций [5].

3. Определение атмосферных параметров. Как упоминалось выше, нами был составлен каталог спектроскопических определений металличности,

относительных содержаний еще 12 химических элементов, а также компонентов пространственных скоростей для 100 переменных звезд типа RR Лиры галактического поля по данным из 25 статей, опубликованных с 1995 по 2017гг. [3]. Теперь, чтобы иметь возможность оценить массы этих 100 лирид с известным химическим составом, нам было необходимо собрать информацию об эффективной температуре $T_{эфф}$ и поверхностном ускорении силы тяжести $\log g$ из тех же работ, которые стали источниками обилия химических элементов.

Атмосферные параметры $T_{эфф}$ и $\log g$ определяются спектроскопическими и фотометрическими методами. Анализ значений $T_{эфф}$ и $\log g$, измеренных разными авторами, показывает, что при применении спектроскопических методов значительные изменения этих характеристик в зависимости от фазы в течение периода не наблюдаются. В большинстве случаев авторы рекомендовали наиболее предпочтительные значения параметров, полученных ими с помощью различных методов. Большинство авторов считает спектроскопический метод наиболее надежным. Фотометрический метод в основном используется для первоначальной оценки параметров. В случае отсутствия авторского предпочтения мы вычисляли средние по методам значения параметров. Кроме того, если в статье приводились данные для различных фаз, но авторы не предлагали принятое ими значение, мы считали среднее по фазам. Причем, если мы учитывали $T_{эфф}$ и $\log g$ только для фаз, близких к спокойной фазе минимума блеска ($\phi \approx 0.8$), это не приводило к сколь угодно существенному изменению средних величин $T_{эфф}$ и $\log g$.

Атмосферные параметры 40 переменных, для которых $T_{эфф}$ и $\log g$ определены в двух и более работах (максимум в восьми), мы вычисляли как средневзвешенные значения с коэффициентами, обратно пропорциональными неопределенностям, заявленным авторами статей. Полученные для 100 лирид величины эффективных температур варьируются в пределах $T_{эфф} = (5950 - 7550)$ К, а поверхностной гравитации - $\log g = (1.50 - 3.68)$, средние значения для нашей выборки звезд $T_{эфф\text{ ср}} = 6500$ К и $\log g_{\text{ср}} = 2.36$. Таблица, содержащая сведения об эффективных температурах и поверхностных ускорениях силы тяжести для 100 лирид (а именно принятые нами значения, минимальные и максимальные значения этих параметров из усредненных нами по фазам и методам или из рекомендованных авторами статей, если $T_{эфф}$ и $\log g$ определялись в двух или более работах) представлена в работе [10]. Там же приведены массы звезд, определенные по этим двум атмосферным параметрам.

В табл.1 собраны параметры атмосфер 40 лирид, для которых $T_{эфф}$ и $\log g$ определены более, чем в одной работе. В первом столбце дано название звезды. Далее представлены рассчитанные нами средневзвешенные значения $T_{эфф}$ и $\log g$, а также их ошибки. В последнем столбце приводится количество использованных статей n . Ссылки на первоисточники можно найти в каталоге [3].

Таблица 1

АТМОСФЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИРИД, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ В
НЕСКОЛЬКИХ РАБОТАХ

Звезда	$T_{эфф}$, К	$\varepsilon(T_{эфф})$, К	logg, dex	$\varepsilon(\text{logg})$, dex	n
SW And	6419	40	2.71	0.03	6
WY Ant	6319	120	2.24	0.02	2
XZ Aps	6319	80	1.93	0.02	2
BS Aps	6202	140	2.03	0.13	2
X Ari	6378	70	2.58	0.06	5
RS Boo	6666	100	2.74	0.08	4
ST Boo	6143	60	2.63	0.07	2
BPS CS 22881-039	6117	20	2.10	0.08	4
BPS CS 22940-070	6191	60	2.26	0.17	2
RR Cet	6339	60	2.42	0.09	5
UU Cet	6210	30	2.58	0.11	2
KP Cyg	6742	0	2.90	0.00	2
DX Del	6354	40	2.45	0.06	4
SU Dra	6161	40	2.69	0.05	3
XZ Dra	6438	40	2.71	0.12	2
SV Eri	6450	40	2.53	0.02	2
VX Her	6188	40	2.30	0.08	4
DT Hya	6280	130	2.04	0.02	2
V Ind	6409	100	2.18	0.09	2
RR Leo	6400	70	2.59	0.05	2
SS Leo	6875	550	2.41	0.12	2
TT Lyn	6189	90	2.55	0.05	3
RR Lyr	6345	30	2.56	0.04	8
KX Lyr	6663	170	2.88	0.09	2
Z Mic	6098	110	1.86	0.15	2
RV Oct	6247	140	1.84	0.08	2
UV Oct	6243	140	1.88	0.10	2
V 445 Oph	6647	70	2.62	0.09	3
AV Peg	6607	70	2.61	0.08	2
DH Peg	7002	130	2.73	0.08	3
AR Per	6422	30	2.79	0.09	3
SDSS J170733.93+585059.7	6475	160	3.68	0.48	2
VY Ser	6075	20	2.32	0.05	7
AN Ser	6575	50	2.45	0.11	2
V 440 Sgr	6874	400	2.62	0.27	2
RV UMa	6413	20	2.33	0.07	2
TU UMa	6231	40	2.44	0.07	4
CD Vel	6208	110	1.95	0.14	2
UU Vir	6269	20	2.49	0.15	3
AS Vir	6232	160	1.80	0.06	2

4. Оценка надежности полученных параметров атмосфер. От надежности параметров зависит точность определения других характеристик

звезды, в частности, массы. Анализ значений $T_{эфф}$ и $\log g$ показывает, что данные разных авторов различаются, иногда заметно. В большинстве работ приведены ошибки параметров. В табл.2 для спектроскопического и фотометрического методов определения $T_{эфф}$ и $\log g$ даны: наименьшие и наибольшие авторские ошибки, а также вычисленные нами из статей средние величины неопределенностей. Моды оцененных авторами ошибок, при определении параметров любыми методами, представлены в последнем столбце таблицы; они равны для эффективной температуры - 200 К, а для ускорения силы

Таблица 2

ОШИБКИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

Авторские ошибки	Спектроскопический метод			Фотометрический метод			Мода (все методы)
	Min	Max	Средняя	Min	Max	Средняя	
$T_{эфф}, K$	40	300	115	100	250	170	200
$\log g, dex$	0.1	0.5	0.24	0.1	0.3	0.18	0.3

тяжести - 0.3dex. Поэтому, при отсутствии в статьях указаний на неопределенности измерения рассматриваемых параметров, для вычисления средневзвешенных значений мы принимали именно такие величины ошибок.

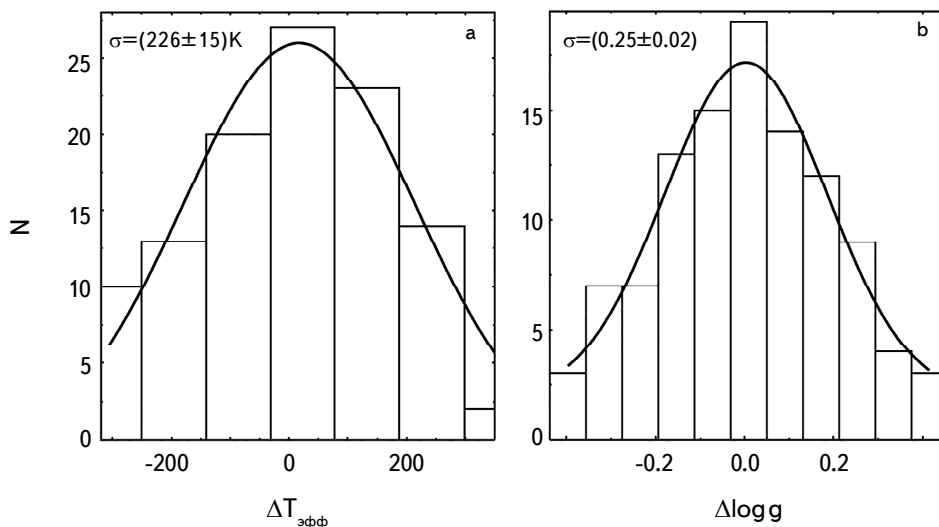


Рис.1. Распределения отклонений авторских значений параметров атмосфер лирид от вычисленных по ним средневзвешенных значений для эффективной температуры а) и поверхностного ускорения силы тяжести б). Кривые - аппроксимации распределений нормальным законом. Указаны дисперсии вычисленных средневзвешенных значений параметров, которые в данной статье мы называем сходимостью между разными авторами.

Напомним, что эффективные температуры $T_{\text{эфф}}$ и поверхностные ускорения силы тяжести $\log g$ для 40 переменных типа RR Лиры были определены в двух и более работах. По этим звездам мы построили распределения отклонений авторских определений обоих параметров от вычисленных средневзвешенных значений (рис.1a, b). Гистограммы неплохо описываются нормальным законом, что позволяет считать различия величин параметров, полученных разными авторами, случайными. Средние значения дисперсий, которые дают оценки внешних сходимостей параметров, определенных в разных работах, получились равными $\sigma(T_{\text{эфф}}) = (226 \pm 15)$ К и $\sigma(\log g) = (0.25 \pm 0.02)$. Видно, что величины внешних сходимостей оказались одного порядка с усредненными по всем методам авторскими ошибками (см. табл.2). Это свидетельствует о том, что, несмотря на различие используемых разными авторами методов определения атмосферных параметров, результаты получаются близкими, что говорит об их надежности.

Кроме того, сравнение индивидуальных ошибок средневзвешенных значений параметров (см. третий и пятый столбцы табл.1) и авторских ошибок (см. табл.2) показывает, что ошибки средних для подавляющего большинства звезд оказались значительно ниже ошибок измерений, приводимых авторами. Значит, рассчитанные по нескольким источникам средние величины параметров более точные. Исключения составляют лириды SS Leo и V 440 Sgr с большими расхождениями в авторских величинах эффективных температур (для каждой звезды $T_{\text{эфф}}$ определена только в двух

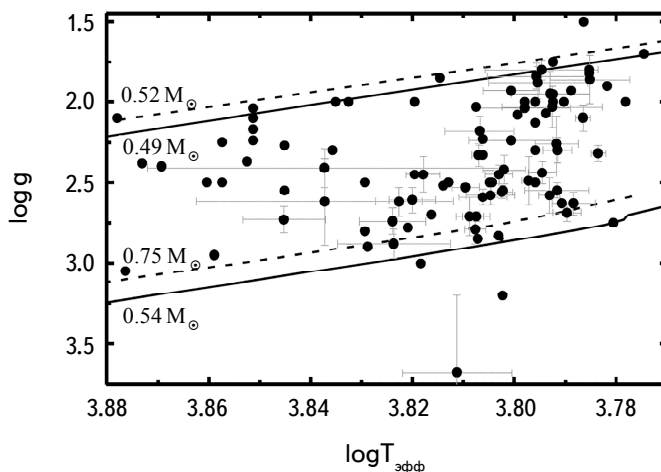


Рис.2. Диаграмма "эффективная температура ($\log T_{\text{эфф}}$) - ускорение силы тяжести ($\log g$)" для лирид нашей выборки. Теоретические треки минимальной и максимальной массы полосы неустойчивости горизонтальной ветви изображены для солнечного химического состава сплошными линиями (0.49 и $0.54 M_{\odot}$), для $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$ и $[\alpha/\text{Fe}] = 0.4$ - штриховыми линиями (0.52 и $0.75 M_{\odot}$). Показаны бары ошибок средних значений параметров для лирид с определениями в нескольких работах.

работах), а также звезда SDSS J170733.93+585059.7, значения $\log g$ которой, приведенные в двух статьях, существенно отличаются. К тому же среднее значение $\log g$ для SDSS J170733.93+585059.7 не попадает в диапазон моделей для звезд горизонтальной ветви, построенной в [11], поэтому массу этой звезды определить не удастся (см. [10]).

На рис.2 показано положение 100 лирид на диаграмме "эффективная температура ($\log T_{\text{эфф}}$) - ускорение силы тяжести ($\log g$)". Проведены по два теоретических эволюционных трека из Дартмутской базы данных [11]: сплошными линиями - для металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$ и относительного содержания α -элементов $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0$ ($0.49 M_{\odot}$ и $0.54 M_{\odot}$), штриховыми линиями - для $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$ и $[\alpha/\text{Fe}] = 0.4$ ($0.52 M_{\odot}$ и $0.75 M_{\odot}$). Для каждой пары значений металличности и содержаний α -элементов показаны теоретические треки минимальной и максимальной массы звезд полосы неустойчивости горизонтальной ветви (указаны в скобках). Видим, что почти все величины эффективной температуры и поверхностной гравитации для переменных типа RR Лиры нашей выборки соответствуют полосе неустойчивости теоретических эволюционных треков звезд горизонтальной ветви, что позволяет найти их массы. Полагаем это одним из подтверждений правильности установленных параметров атмосфер $T_{\text{эфф}}$ и $\log g$. Однако несколько лирид оказались на рисунке вне зоны теоретических треков горизонтальной ветви. Для этих звезд нет возможности определить массу.

5. Заключение. Значения эффективных температур $T_{\text{эфф}}$ и ускорений силы тяжести $\log g$ для 100 переменных типа RR Лиры галактического поля с известным химическим составом собраны из 25 статей (1995-2017гг.). Поскольку атмосферные параметры могут существенно меняться в динамическую фазу, мы проанализировали величины $T_{\text{эфф}}$ и $\log g$ в разные моменты пульсации и выяснили, что для имеющихся у нас данных учет только спокойных фаз (вблизи $\phi \approx 0.8$) не изменил средние величины эффективных температур и ускорений силы тяжести на поверхности звезды. Наиболее точными получились средневзвешенные величины атмосферных параметров 40 переменных, для которых $T_{\text{эфф}}$ и $\log g$ определены в более, чем одной работе. Проверка также показала, что различия в значениях параметров, полученных разными авторами, случайны, а расхождения определений между разными авторами оказываются одного порядка с заявленными ими ошибками. Это свидетельствует о достаточной надежности одиночных определений $T_{\text{эфф}}$ и $\log g$. Оба атмосферных параметра практически всех 100 лирид нашей выборки попадают в диапазон, соответствующий полосе неустойчивости горизонтальной ветви, что также подтверждает достоверность установленных параметров. Считаем, что значения эффективной температуры $T_{\text{эфф}}$ и поверхностной гравитации $\log g$ исследуемых лирид определены достаточно

надежно и могут быть использованы для нахождения масс звезд. Результаты исследования связей, полученных по найденным параметрам атмосфер масс молодых звезд типа RR Лиры поля с солнечной металличностью с другими параметрами звездных атмосфер, представлены в [10], а с пространственно-кинематическими характеристиками - в [12].

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).

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,
e-mail: gozha_marina@mail.ru

ON THE RELIABILITY OF ATMOSPHERIC PARAMETERS DEFINITION OF FIELD RR Lyrae VARIABLES

M.L.GOZHA, V.A.MARSAKOV, V.V.KOVAL'

The effective temperatures and the surface gravities for a hundred galactic-field RR Lyrae variable stars with a known chemical composition are found under published data from 25 papers from 1995 to 2017. The atmospheric characteristics for almost half of our list stars are defined in two or more papers. The weighted average values of the parameters are calculated for these stars. The T_{eff} and $\log g$ values for almost all studied stars fall into the theoretically calculated range in which far evolved stars turn out to be variable. The convergences of the definitions of the corresponding parameters obtained by different authors are analyzed. The conclusion about high reliability of the effective temperature and surface gravity values for the studied RR Lyrae variables has been made.

Keywords: *galactic-field RR Lyrae variables: atmospheric parameters*

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Л.Гожжа, В.А.Марсаков, В.В.Коваль, *Астрофизика*, **61**, 55, 2018, (*Astrophysics*, **61**, 41, 2018).
2. В.А.Марсаков, М.Л.Гожжа, В.В.Коваль, *Астрон. ж.*, **95**, 54, 2018, (*Astron.*

- Rep., **62**, 50, 2018).
3. *V.A.Marsakov, M.L.Gozha, V.V.Koval*, Astron. Rep., **62**, 1095, 2018.
 4. *В.А.Марсаков, М.Л.Гожжа, В.В.Коваль и др.*, Астрофизика, **61**, 191, 2018, (Astrophysics, **61**, 171, 2018).
 5. *E.Pancino, N.Britavskiy, D.Romano et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **447**, 2404, 2015.
 6. *K.Kolenberg, L.Fossati, D.Shulyak et al.*, Astron. Astrophys., **519**, A64, 2010.
 7. *J.Govea, T.Gomez, G.W.Preston et al.*, Astrophys. J., **782**, 59, 2014.
 8. *M.Chadid, J.Vernin, D.Gillet*, Astron. Astrophys., **491**, 537, 2008.
 9. *J.H.Пеña, A.Arellano Ferro, R.Пеña Miller et al.*, Rev. Mexicana Astron. Astrofis., **45**, 191, 2009.
 10. *В.А.Марсаков, М.Л.Гожжа, В.В.Коваль*, Астрон. ж., **96**, 219, 2019, (Astron. Rep., **63**, 203, 2019).
 11. *A.Dotter, B.Chaboyer, D.Jevremovic et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **178**, 89, 2008. <http://stellar.dartmouth.edu/models/index.html>.
 12. *В.А.Марсаков, М.Л.Гожжа, В.В.Коваль*, Астрофизика, **62**, 2019 (в печати).

