

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 62

НОЯБРЬ, 2019

ВЫПУСК 4

О ПРИРОДЕ МОЛОДЫХ ЗВЕЗД ТИПА RR LYRAE ПОЛЯ С СОЛНЕЧНОЙ МЕТАЛЛИЧНОСТЬЮ

В.А.МАРСАКОВ, М.Л.ГОЖА, В.В.КОВАЛЬ

Поступила 23 декабря 2018

Принята к печати 13 сентября 2019

По параметрам атмосфер, взятых из литературы, с помощью эволюционных треков Дартмутской базы данных определены массы ста переменных звезд типа RR Лиры (лирид) поля и проведен сравнительный анализ свойств лирид с разной металличностью. Найдено, что массы богатых металлами ($[Fe/H] > -0.5$) лирид с кинематикой тонкого диска заключены в интервале $(0.51\text{--}0.60) M_{\odot}$. Согласно современным представлениям, начальные массы таких звезд должны быть не более $(0.7\text{--}0.8) M_{\odot}$. Большое время эволюции таких маломассивных звезд входит в противоречие с заметно меньшим возрастом даже самых старых звезд подсистемы тонкого диска Галактики. Предлагается возможное объяснение природы таких, сравнительно молодых и богатых металлами переменных.

Ключевые слова: *эволюция звезд: содержания гелия в звездах: переменные типа RR Lyrae*

1. *Введение.* На необычные короткопериодические цефеиды поля (потом их переименовали в переменные типа RR Lyr), отсутствующие в шаровых скоплениях и концентрирующиеся к галактической плоскости, впервые обратил внимание 70 лет назад Кукаркин [1]. Через 10 лет Престон [2] показал, что такие лириды поля имеют высокую металличность и в окрестностях Солнца составляют примерно 25%, образуя отдельную группу. В предыдущих работах [3–5] мы на основе созданного компилятивного каталога, содержащего положения, скорости и металличности для 415 лирид поля и относительные содержания $[el/Fe]$ 12 химических элементов, в том числе четырех α -элементов (Mg, Ca, Si и Ti), для 100 лирид, исследовали связи между химическими и пространственно-кинематическими свойствами лирид поля. В частности было показано, что, несмотря на обычно декларируемый большой возраст этих переменных, среди них существуют звезды с кинематикой самой молодой подсистемы Галактики – тонкого диска, и обращено внимание на проблему существования металлических лирид с $[Fe/H] > -0.5$ и с солнечными относительными содержаниями α -элементов. Действительно, согласно теоретическим расчетам, чтобы попасть на горизонтальную ветвь, начальные массы этих звезд должны быть довольно низкими $(0.55\text{--}0.8) M_{\odot}$ [6], 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 к тонкому диску и об их более молодом возрасте. Несмотря на богатую историю их изучения, природа металлических лирид до сих пор остается непонятной. В работе [7] было предложено полуэмпирическое объяснение образования богатых металлами сравнительно молодых лирид в результате сброса значительной доли массы ($\sim 0.5 M_{\odot}$) на стадии эволюции красного гиганта. Версия не стала популярной, хотя и не была опровергнута. В работе [8] обнаружены существенные различия в кинематике оболочек богатых ($[Fe/H] > -1.0$) и бедных металлами лирид. В работах [3,4] мы предположили, что все или часть таких металлических лирид на самом деле могут также оказаться цефеидами, пульсирующими в обертонах с периодами менее суток. Такие цефеиды уже открыты в Большом и Малом Магеллановых Облаках в рамках проекта OGLE. 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 (см. [8]).

Данная работа посвящена определению масс лирид поля с известными содержаниями химических элементов и параметрами атмосфер по теоретическим эволюционным трекам с целью оценки условий для попадания богатых металлами маломассивных звезд с кинематикой тонкого диска в полосу неустойчивости на горизонтальной ветви.

2. Параметры атмосфер и массы лирид. Значения эффективных температур $T_{эфф}$ и ускорений силы тяжести $logg$ для всех 100 переменных типа RR Lyr нашего каталога получены из тех же 25 статей с 1995 по 2017гг., которые послужили нам источниками информации для нахождения содержаний химических элементов в атмосферах этих звезд в работе [3]. Ссылки на эти статьи можно найти в каталоге [9] или в электронном виде по адресу <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/AZh/95/54>. В работе [10] подробно описаны процедура сведения искомых параметров и их ошибки, которые получились равными: $\varepsilon(T_{эфф}) = 226 \pm 15$ К и $\varepsilon(log g) = 0.25 \pm 0.02$.

На рис.1 приведена диаграмма "эффективная температура $log T_{эфф}$ - ускорение силы тяжести $logg$ " для 100 лирид нашей выборки. Большими темными кружками обозначены самые богатые металлами звезды, чуть поменьше, светло-серыми - с $-0.5 > [Fe/H] > -1.0$, а маленькими серыми - самые малометаллические. Указанные выше ошибки температур и ускорений силы тяжести приводят к неопределенности найденных нами значений масс

$\epsilon(M/M_{\odot}) \approx 0.015$. Из диаграммы можно увидеть, что действительно, подавляющая часть металлических лирид имеет в среднем более высокие значения как $\log g$, так и $\log T_{\text{эфф}}$, чем большинство менее металлических звезд. Однако налицо и большой разброс этих параметров у всех групп по металличности. Так, в отличие от данных [8], в нашей выборке появилось значительное количество малометаллических лирид с более высокими температурами, чем у металлических.

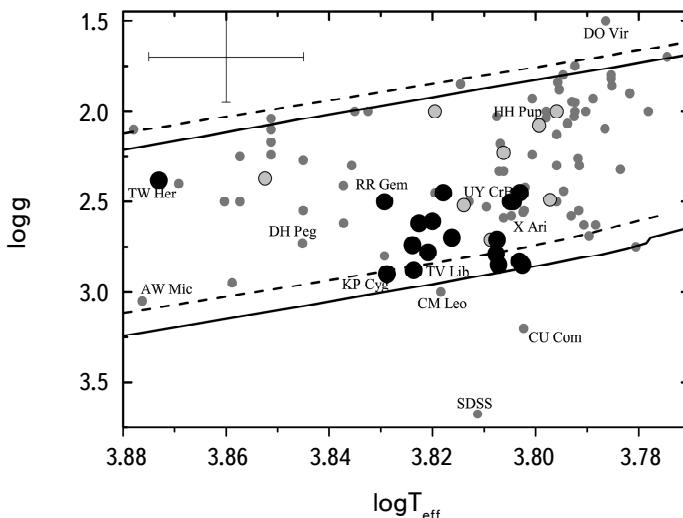


Рис.1. Связь эффективной температуры $\log T_{\text{эфф}}$ с ускорением силы тяжести $\log g$ для звезд типа RR Lyrae нашей выборки. Большинством черными кружками выделены звезды с $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.5$, чуть поменьше, светло-серыми - с $-0.5 > [\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$, а маленькими серыми самые малометаллические - $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$. Проведены два теоретических эволюционных трека для солнечного химического состава с массами 0.49 и $0.54 M_{\odot}$ (сплошные линии) и для в сто раз менее металлического с характерно увеличенными относительными содержаниями α -элементов ($[\alpha/\text{Fe}] = 0.4$) с массами звезд 0.52 и $0.75 M_{\odot}$ (штриховые линии). Приведены бары средних ошибок параметров и имена лирид, которые на разных диаграммах далеко отходят от наибольшей концентрации точек.

Для определения масс лирид нашей выборки мы использовали эволюционные треки Дартмутской базы данных (см. [11]). 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 α -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 рассчитаны по $[\text{Fe}/\text{H}]$ с шагом 0.5 dex, а по $[\alpha/\text{Fe}]$ с шагом 0.2 dex, то массу каждой лириды мы находили путем интерполяции между всеми этими параметрами. Для определения значения $[\alpha/\text{Fe}]$ мы усреднили относительные содержания магния, кальция, кремния и титана. При этом обилие всех

четырех элементов известно для большинства звезд нашей выборки. В случае отсутствия информации о каком-либо из перечисленных выше элементе, среднее вычисляли по известным данным о других α -элементах. И только для звезды UY CrB, металличность которой близка к солнечной, в нашем каталоге нет содержаний α -элементов. Для поиска массы этой лириды использовалось обилие $[\alpha/Fe] = 0.0$, типичное для звезд с солнечной металличностью. Увеличение $[\alpha/Fe]$ не привело к заметному изменению полученной по трекам массы этой звезды. Результат определения масс лирид представлен в табл.1 в работе [12].

На рис.1 приведены по две теоретические изолинии одинаковых масс, но разного химического состава, ограничивающие сверху и снизу лириды нашей выборки на диаграмме. Теоретические изолинии меньших масс при любой металличности появляются в верхней части диаграммы, как правило, при более высокой температуре, тогда как изолинии больших масс не доходят до полосы нестабильности 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 металлических будут больше. В сторону больших масс немного смещает и уменьшение относительных содержаний α -элементов. Из диаграммы "log $T_{\text{эфф}}$ - log 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.

3. Связь массы с металличностью и пространственно-кинематическими характеристиками лирид. Указанные в заголовке раздела связи приведены на панелях рис.2. Разными значками обозначены звезды, попавшие в разные подсистемы Галактики. Для стратификации по подсистемам мы воспользовались кинематическим критерием из работы [13], в котором по компонентам полных пространственных скоростей вычисляется вероятность принадлежности лирид подсистемам тонкого диска, толстого диска и гало (подробнее о стратификации наших лирид см. в [3]). При этом подразумевается, что компоненты пространственных скоростей звезд в каждой подсистеме подчиняются нормальным распределениям. В работе [3] мы всесторонне проанализировали зависимость относительных содержаний каждого из четырех исследуемых α -элементов от металличности у наших лирид поля, приведенных на рис.2а-г и рис.3а, б, на которых разными значками обозначена их принадлежность по кинематике разным галактическим подсистемам. На рис.2а приведена зависимость массы от металличности. Видно, что у всех лирид с $[Fe/H] > -1.0$ массы больше 0.51, но меньше $0.60 M_{\odot}$, тогда как при меньшей металличности верхний предел масс резко возрастает, а нижний предел остается

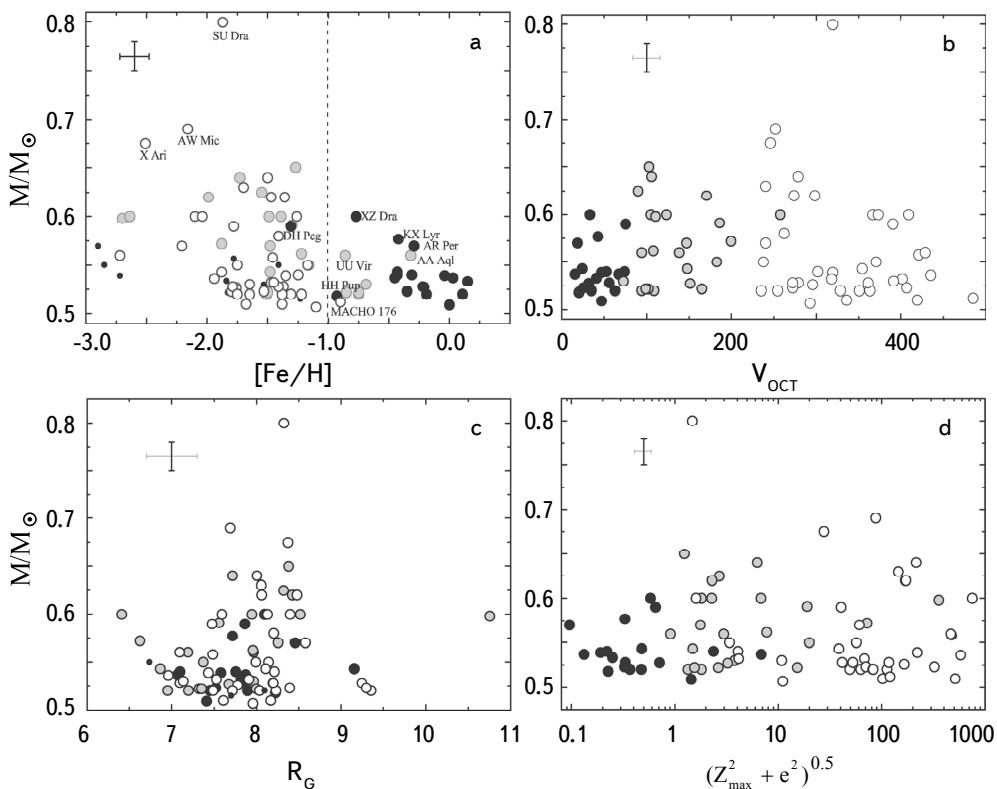


Рис.2. Зависимость массы лирид нашей выборки от металличности (а), полной остаточной скорости (б), удаления от галактического центра (с) и орбитального параметра $(Z_{max}^2 + e^2)^{1/2}$ (д). Темными большими кружками обозначены лириды, принадлежащие по кинематическому критерию тонкому диску, серыми - толстому диску, светлыми - гало; маленькими темными кружками обозначены нестратифицированные лириды. Вертикальная штриховая линия проведена через $[Fe/H] = -1.0$.

постоянным. Причем такая закономерность никак не связана с принадлежностью звезды по кинематике к той или иной подсистеме. Она связана с металличностью: все металлические лириды, принадлежащие и к толстому диску и гало, имеют малые массы. Напомним, что при переходе через пограничное значение $[Fe/H] = -1.0$ происходит скачкообразное увеличение разброса удалений от галактической плоскости, а также увеличение дисперсии пространственных скоростей у наших лирид (см. рис.1б, д, е в [3]). 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., например, [14]).

В работе [12] мы продемонстрировали, что связи полученных масс лирид с другими параметрами звездных атмосфер естественно объясняются заложенными в теоретические расчеты формулами и никак не выявляют каких-либо явно выделенных групп звезд. Не обнаружилось явной связи и масс лирид на рис.2а с принадлежностью разным подсистемам Галактики. Возможно, зависимость масс от кинематики и положений выявится внутри подсистем. Для этого рассмотрим связи масс лирид с полной остаточной скоростью (рис.2б), удаленностью от галактического центра (рис.2с) и от орбитального параметра $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2}$ (рис.2д), предложенного в работе [15]. Здесь e - эксцентриситет галактической орбиты, а Z_{max} - максимальное удаление точек орбиты от галактической плоскости в килопарсеках. Предварительно, по имеющимся скоростям и положениям, были вычислены элементы галактических орбит лирид по многокомпонентной модели Галактики. Модель состоит из центральной части, включающей две сферические компоненты с общей массой $1.9 \cdot 10^{10} M_\odot$, диска, состоящего из трех потенциалов Миямото-Нагаи и трех слагаемых потенциала Миямото-Нагаи для имитации тонкого слоя газа в диске (подробнее см. в [16]).

На рис.2б видна стратификация Галактики по остаточным скоростям на тонкий диск ($V_{ocm} < 85$ км/с), толстый диск (85 км/с $< V_{ocm} < 220$ км/с) и гало ($V_{ocm} > 220$ км/с). Одновременно можно увидеть, что внутри подсистем корреляция массы со скоростью не наблюдается. Налицо лишь небольшое скачкообразное увеличение массы при переходе от тонкого к толстому диску. Но это, как следует из рис.2а, следствие зависимости массы от металличности. Можно отметить увеличение массы во всех подсистемах с удалением от галактического центра в диапазоне $7 < R_g < 9$ кпк на рис.2с. Причем мы видим, что существуют кинематически очень "молодые" лириды, у которых остаточные скорости практически равны солнечной. Еще более наглядно проявляется увеличение массы с ростом орбитального параметра на рис.2д. По-видимому, все же именно металличность, как внутренний параметр, является причиной ограничения сверху величины массы лириды, поскольку кинематика влияет лишь на положение звезды.

4. Обсуждение. Таким образом, в работе показано, что практически все найденные в литературе величины эффективных температур $T_{\text{эфф}}$ и ускорений силы тяжести $\log g$ для переменных типа RR Лиры поля попадают по обоим параметрам атмосфер в полосу нестабильности соответствующих теоретических

эволюционных треков звезд горизонтальной ветви, что позволяет найти их массы. Мы полагаем это одним из свидетельств корректности определенных параметров их атмосфер. Установлено, что нижние пределы масс богатых и бедных металлами лирид совпадают и равны примерно половине солнечной массы. Зато верхний предел масс монотонно уменьшается с увеличением металличности. Причем малометаллические лириды с малой массой принадлежат в основном подсистеме гало и в меньшей степени толстому диску, т.е. это очень старые звезды, и с ними проблем нет. Тогда как при традиционном предположении, что потеря массы звездой на стадии красного гиганта и последующей гелиевой вспышки порядка (0.1-0.2) M_{\odot} (см. [7] 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 низким относительным содержанием α -элементов, но с возрастом более 10 млрд. лет (см., например, [17]). Однако лириды с солнечным химическим составом демонстрируют еще и очень "молодую" кинематику, что не характерно для звезд этой подсистемы, а свойственно только для тонкого диска. Если предположить, что это более массивные звезды - цефеиды - пульсируют в обертоне, т.е. 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 наблюдали. Подтверждают это предположение и результаты недавно вышедшей работы [24], где исследованы те же 400 лирид поля, что и в используемом нами исходном каталоге [25], но уже на основе параллаксов из GAIA DR2. В итоге было показано, что светимость у лирид поля в среднем уменьшается с ростом [Fe/H]. Причем среди металлических лирид ни одна не достигает даже средней светимости, характерной для менее металлических переменных. То есть среди них, скорее всего, нет более ярких звезд, которых можно классифицировать как цефеиды, пульсирующие в высоких обертонах (см. рис.20 из [24]).

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. рис.8 в [18]). Это так называемые старые металлические 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 ([19]). Согласно Дартмутским эволюционным трекам, уже звезда с первоначальной массой $1.05 M_{\odot}$ и с

солнечным химическим составом достигнет горизонтальной ветви через ~ 10 млрд. лет, что соответствует обычно принимаемому возрасту тонкого диска. Чтобы попасть в полосу нестабильности на горизонтальной ветви, такие массивные звезды должны на стадии красного гиганта потерять примерно половину своей массы, как это и предполагали авторы работы [7].

Кроме того, можно еще уменьшить начальную массу звезды, предположив, что начальное содержание гелия в предшественниках металлических 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 ~ 9.3 млрд. лет. Чтобы попасть в полосу нестабильности, такие звезды в момент гелиевой вспышки должны потерять хоть значительную долю своей массы $(0.2-0.3) M_{\odot}$, но такая потеря уже не представляется нереальной [20]. Звезды с повышенным содержанием гелия уже обнаружены в балдже. Так, в недавней работе [21] авторы оценили содержание гелия в звездах типа RRab по огромной выборке лирид из OGLE IV [22] 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 $Y=0.28 - 0.35$ " [23]. Для проверки последнего предположения желательно оценить содержания гелия в богатых химическими элементами группы железа переменных типа RR Лиры поля, находящихся в настоящее время в окрестностях Солнца.

Однако мы не можем исключить также и ситуацию, когда рожденные в балдже на ранних этапах формирования Галактики маломассивные звезды с солнечным химическим составом мигрировали в околосолнечные окрестности таким образом, что оказались с низкими скоростями относительно локального центра покоя. В течение длительного времени миграции они успели стать лиридами.

Авторы благодарят Л.В.Шпигель за вычисление элементов галактических орбит для наших лирид поля. 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: marsakov@sfedu.ru

ON THE NATURE OF YOUNG FIELD RR LYRAE STARS WITH SOLAR METALLICITY

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

Based on atmospheric parameters compiled from the literature, the masses of 100 field RR Lyrae variable stars were determined using evolutionary tracks of the Dartmouth database and a comparative analysis of the properties of Lirids with different metallicities was carried out. It was found that the masses of metal-rich ($[Fe/H] > -0.5$) Lirids with thin disk kinematics are enclosed in the interval $(0.51 - 0.60) M_{\odot}$. According to modern concepts, the initial masses of such stars should be no more than $(0.7 - 0.8) M_{\odot}$. The long time of evolution of such low-mass stars comes into conflict with a noticeably lower age of even the oldest stars of the thin disk subsystem of the Galaxy. A possible explanation of the nature of such relatively young and metal-rich variables is proposed.

Keywords: *evolution of stars: helium abundances: RR Lyrae variable stars*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Б.В.Кукаркин*, Исследование строения и развития звездных систем на основе изучения переменных звезд. М.-Л., Государственное издательство технико-теоретической литературы, с.191, 1949.
2. *G.Preston*, *Astrophys. J.*, **130**, 507, 1959.
3. *B.A.Марсаков, М.Л.Гожа, В.В.Коваль*, Астрон. ж., **95**, 54, 2018, (Astron. Rep., **62**, 50, 2018).
4. *B.A.Марсаков, М.Л.Гожа, В.В.Коваль и др.*, Астрофизика, **61**, 191, 2018, (Astrophysics, **61**, 171, 2018).
5. *М.Л.Гожа, В.А.Марсаков, В.В.Коваль*, Астрофизика, **61**, 55, 2018, (Astrophysics, **61**, 41, 2018).
6. *M.Marconi, G.Coppola, G.Bono et al.*, *Astrophys. J.*, **808**, 5, 2015.
7. *R.E.Taam, R.P.Kraft, N.Suntzeff*, *Astrophys. J.*, **207**, 201, 1976.
8. *M.Chadid, C.Sneden, G.W.Preston*, *Astrophys. J.*, **835**, 187, 2017.
9. *V.A.Marsakov, M.L.Gozha, V.V.Koval*, Astron. Rep., **62**, 1095, 2018.
10. *М.Л.Гожа, В.А.Марсаков, В.В.Коваль*, Астрофизика, **62**, 415, 2019, (Astrophysics, **62**, 369, 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. *V.A.Марсаков, М.Л.Гожа, В.В.Коваль*, Астрон. ж., **96**, 219, 2019, (Astron. Rep., **63**, 2003, 2019).
13. *T.Bensby, S.Feldzinger, I.Lungstrom*, Astron. Astrophys., **410**, 527, 2003.
14. *Т.В.Боркова, В.А.Марсаков*, Астрон. ж., **77**, 750, 2000.
15. *R.G.Gratten, E.Carretta, R.Claudi et al.*, Astron. Astrophys., **404**, 187, 2003.
16. *В.А.Марсаков, М.Л.Гожа, В.В.Коваль и др.*, Астрон. ж., **93**, 49, 2016, (Astron. Rep., **60**, 43, 2016).
17. *В.А.Марсаков, Т.В.Боркова*, Письма в Астрон. ж., **31**, 577, 2005.
18. *В.А.Марсаков, Т.В.Боркова*, Письма в Астрон. ж., **32**, 545, 2006.
19. *R.Schonrich, J.Binney*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **396**, 203, 2009.
20. *X.Fu, A.Bressan, P.Marigo et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **476**, 496, 2018.
21. *M.Marconi, D.Minniti*, Astrophys. J., **853**, 20, 2018.
22. *P.Pietrukowicz, S.Kozowski, J.Skowron et al.*, Astrophys. J., **811**, 113, 2015.
23. *Y.-W.Lee, S.Jang*, Astrophys. J., **833**, 236, 2016.
24. *T.Muraveva, H.E.Delgado, G.Clementini et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **481**, 1195, 2018.
25. *A.K.Dambis, L.N.Berdnikov, A.Y.Knizayev et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **435**, 3206, 2013.