

DOI: 10.54503/0571-7132-2025.68.1-37

## СУММАРНОЕ СОДЕРЖАНИЕ C+N+O В АТМОСФЕРАХ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ РАЗНОЙ МЕТАЛЛИЧНОСТИ

Л.С.ЛЮБИМКОВ, Д.В.ПЕТРОВ

Поступила 1 октября 2024

Принята к печати 14 февраля 2025

Сумма C+N+O в красных гигантах интересна тем, что она, по-видимому, не меняется в течение эволюции звезды, хотя ее составляющие, особенно содержания C и N, испытывают значительные эволюционные изменения. Показано, что существует ярко выраженная корреляция между суммарным содержанием  $\log \varepsilon(C+N+O)$  в красных гигантах и их индексом металличности [Fe/H]. Линейная зависимость между  $\log \varepsilon(C+N+O)$  и [Fe/H] свидетельствует о росте  $\log \varepsilon(C+N+O)$  от 7.0 при [Fe/H] = -2.5 до 9.2 при [Fe/H] = +0.3, т.е. более, чем на 2 dex. Относительное содержание [(C+N+O)/Fe] на том же интервале [Fe/H], напротив, уменьшается на 0.7 dex. Показано, что соотношение между [(C+N+O)/Fe] и [Fe/H] почти полностью определяется соотношением между [O/Fe] и [Fe/H]; следовательно, подтверждается, что кислород вносит главный вклад в сумму C+N+O. Поскольку современные модели эволюции Галактики достаточно хорошо объясняют наблюдаемую зависимость [O/Fe] от [Fe/H], тем самым они объясняют и наблюдаемую зависимость [(C+N+O)/Fe] от [Fe/H].

Ключевые слова: *красные гиганты; химический состав*

1. *Введение.* В серии наших работ [1-5] были исследованы красные гиганты двух типов в окрестности Солнца: гиганты с планетами и гиганты с магнитными полями. В работе [1] были определены фундаментальные параметры и содержания ключевых легких элементов Li, C и O для 9-ти K-гигантов с планетами. В работе [2] был детально исследован химический состав этих 9-ти звезд. Далее, в [3] был проанализирован химический состав гигантов EK Eri, OU And с магнитными полями, которые были причислены к вероятным потомкам магнитных Ap-звезд. В [4] были определены фундаментальные параметры и химический состав 20-ти магнитных G и K гигантов в окрестности Солнца. Наконец, в [5] была рассмотрена величина [N/C], которая представляет собой чувствительный индикатор эволюции звезд, в сравнении между магнитными и немагнитными гигантами. Важно отметить, что анализ химического состава во всех этих работах был выполнен по единой методике.

Особое внимание в [1-5] было уделено элементам группы CNO, которые считаются ключевыми в теории эволюции звезд. Как известно, эти элементы участвуют в реакциях горения водорода в ядре звезды на стадии главной

последовательности (ГП), самой продолжительной стадии в эволюции звезды. При этом существенно меняются содержания этих элементов, особенно С и N: содержание N существенно увеличивается, а содержание С, наоборот, уменьшается. Вследствие этого, в частности, при достижении стадии красного гиганта сильно увеличивается отношение N/C (см. [5]).

Имеются данные, как теоретические, так и наблюдательные, указывающие на то, что суммарное содержание C+N+O в звезде в процессе ее эволюции остается постоянным (см., например, [6-8]). Другими словами, сумма C+N+O в звезде остается неизменной с момента ее формирования и эта величина характеризует химический состав той межзвездной среды, из которой образовалась звезда.

В работе [4] для 27-и красных гигантов в окрестности Солнца была найдена отчетливая корреляция между суммарным содержанием C+N+O и индексом металличности [Fe/H]. При этом значения [Fe/H] варьировались в диапазоне от -0.49 до +0.26, т.е. вблизи солнечного значения [Fe/H]=0.00. Возникает предположение, что эта корреляция продолжается в областях более низких значений [Fe/H]. Цель настоящей работы - в проверке этого предположения, для чего были рассмотрены звезды в расширенном интервале [Fe/H] от -2.6 до +0.3.

Список рассмотренных в настоящей работе объектов, для которых в литературе имеются данные относительно суммы C+N+O, представлен в разделе 2. Он содержит как отдельные звезды, так и группы звезд, включая четыре шаровых скопления. В разделе 3 приведена зависимость суммарного содержания  $\log \varepsilon(C+N+O)$  от индекса металличности [Fe/H]; получена ярко выраженная корреляция между этими величинами. Антикорреляция между величинами [(C+N+O)/Fe] и [Fe/H], а также связанная с ней антикорреляция между [O/Fe] и [Fe/H], рассмотрены в разделах 4 и 5. Соответствие между полученными результатами и теоретическими расчетами обсуждается в разделе 6. Итоги работы подведены в разделе 7.

*2. Список рассмотренных объектов.* При построении зависимости суммарного содержания C+N+O от индекса металличности [Fe/H] использовались, прежде всего, результаты, полученные в [4] для 27 красных гигантов в окрестности Солнца. Напомним, что эти 27 гигантов показали околосолнечную металличность (значения [Fe/H] между -0.5 и +0.3). Кроме того, были добавлены другие объекты, для которых в литературе имеются данные относительно суммы C+N+O.

Список рассмотренных объектов представлен в табл.1. Для каждого из них указаны следующие величины: [Fe/H],  $\log \varepsilon(C+N+O)$ , [(C+N+O)/Fe] и [O/Fe]. Эти величины потребуются для построения рис.1, 2 и 3.

Таблица 1

ДАННЫЕ ИЗ ЛИТЕРАТУРЫ ОТНОСИТЕЛЬНО СУММЫ C+N+O  
ДЛЯ ИЗБРАННЫХ ОБЪЕКТОВ

Объект	[Fe/H]	$\log \varepsilon(C + N + O)$	$[(C+N+O)/Fe]$	[O/Fe]	Ссылка
Солнце	0.00	$8.94 \pm 0.14$	0.00	0.00	[9]
Звезды Лака	$0.06 \pm 0.20$	$8.97 \pm 0.25$	$-0.03 \pm 0.25$	$0.05 \pm 0.06$	[10]
M3	-1.39	7.74	0.19	$0.33 \pm 0.07$	[7]
M13	-1.50	7.70	0.26	$0.18 \pm 0.10$	[7]
NGC 6752	-1.6	$7.62 \pm 0.02$	0.28	$0.22 \pm 0.07$	[8]
NGC 1851	-1.3	$8.16 \pm 0.10$	0.52	$0.12 \pm 0.07$	[8]
NGC 1851	-1.04	$8.02 \pm 0.24$	$0.11 \pm 0.20$	$0.11 \pm 0.12$	[11]
HD 66573	-0.62	8.44	0.12	0.22	[12]
HD 140283	-2.57	7.06	0.69	0.77	[13]

В табл.1 включена работа Лака [10], где была исследована 451 звезда спектральных типов F, G, и K и классов светимости I и II. Для 221-й звезды здесь были определены содержания C, N и O и найдены суммарные содержания  $\log \varepsilon(C + N + O)$ . Среднее значение  $\log \varepsilon(C + N + O)$  для этой 221-й звезды (Звезды Лака), приведенное в табл.1, оказалось очень близким к солнечному значению.

В табл.1 приведены результаты исследования химического состава членов четырех шаровых скоплений с пониженной металличностью, а именно: M3, M13, NGC 1851 и NGC 6752. При этом для NGC 1851 взяты данные из работ [8,11]. В первой приведено среднее содержание C+N+O для скопления, а с помощью второй работы найдено это среднее по данным для 21-го красного гиганта.

В табл.1 включены также индивидуальные данные для двух звезд с низкой металличностью - HD 66573 и HD 140283. Вторая из них показала наименьшую металличность  $[Fe/H] = -2.57$  среди выбранных объектов.

3. *Корреляция между суммарным содержанием  $\log \varepsilon(C + N + O)$  и индексом металличности  $[Fe/H]$ .* На рис.1 представлена полученная нами зависимость  $\log \varepsilon(C + N + O)$  от  $[Fe/H]$ . Наиболее высокие значения  $\log \varepsilon(C + N + O)$  здесь показывают 27 гигантов из работы [4] с вариациями  $[Fe/H]$  от -0.49 до +0.26 (заполненные кружки в правом верхнем углу рис.1). В среднем эти значения хорошо соответствуют величине  $8.94 \pm 0.14$ , характерной для Солнца [9]. Такое же хорошее согласие с Солнцем имеет место для средних значений  $\log \varepsilon(C + N + O) = 8.97$  и  $[Fe/H] = 0.06$ , которые мы получили для 221-ой звезд из списка Лака [10].

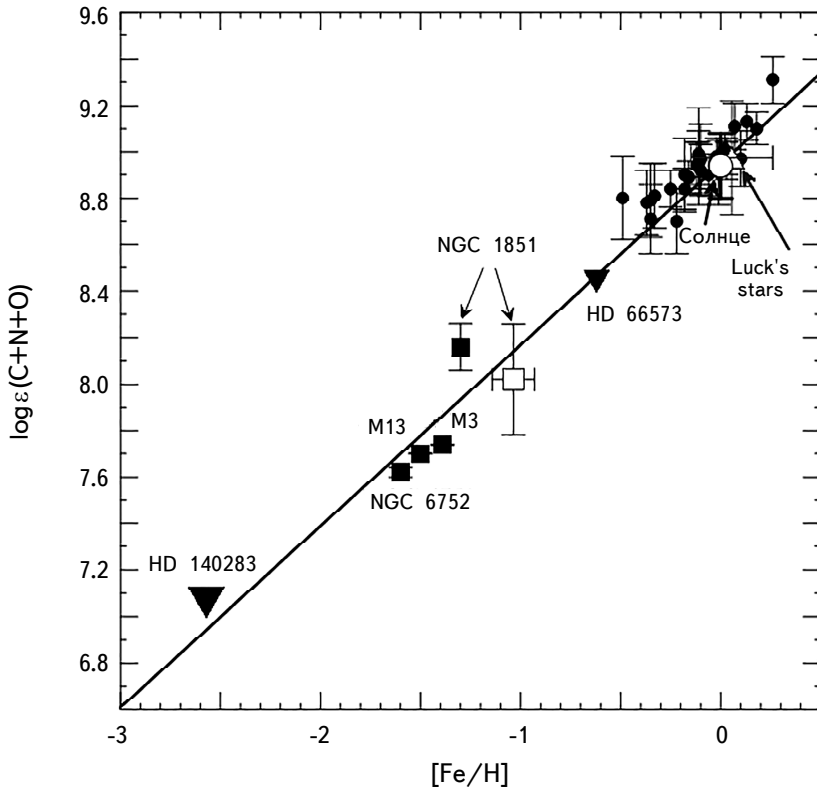


Рис.1. Зависимость суммарного содержания  $\log \varepsilon(C + N + O)$  от индекса металличности  $[Fe/H]$  для объектов, представленных в табл.1. Прямая линия проведена методом наименьших квадратов.

Весьма компактную группу на рис.1 образуют три шаровых скопления, М3, М13 и NGC 6752. Для гигантов этих скоплений в работах [7,8] были получены очень близкие средние значения  $\log \varepsilon(C + N + O)$ , а также  $[Fe/H]$  (см. табл.1). Для четвертого шарового скопления, NGC 1851, на рис.1 приведены данные двух работ: среднее значение  $\log \varepsilon(C + N + O) = 8.16$ , согласно [8], а также среднее значение  $\log \varepsilon(C + N + O) = 8.02$ , полученное нами по данным для 21-го члена скопления из работы [11].

На рис.1 представлены также индивидуальные данные для двух звезд - HD 66573 [12] и HD 140283 [13]. Вторая из них особенно интересна, так как для нее получен самый низкий индекс металличности  $[Fe/H] = -2.57$ .

В целом рис.1 показывает, что существует ярко выраженная корреляция между величинами  $\log \varepsilon(C + N + O)$  и  $[Fe/H]$ . Видно, что она хорошо аппроксимируется прямой линией, которая проведена на рис.1 методом наименьших квадратов. Эта линия свидетельствует, что суммарное содержание  $\log \varepsilon(C + N + O)$

меняется от 7.0 при  $[Fe/H] = -2.5$  до 9.2 при  $[Fe/H] = +0.3$ , т.е. увеличивается на 2.2 dex.

4. *Зависимость величины  $[(C+N+O)/Fe]$  от индекса металличности  $[Fe/H]$ .* Как и в [4], для дальнейшего обсуждения, а также для сравнения с теорией вместо абсолютного содержания  $\log \epsilon(C+N+O)$  полезно рассмотреть относительное содержание  $[(C+N+O)/Fe]$ , которое: 1) относит искомую величину к содержанию железа и 2) относит ее к содержанию на Солнце.

Зависимость  $[(C+N+O)/Fe]$  от  $[Fe/H]$  представлена на рис.2. Видно, что, в отличие от рис.1, где величина  $\log \epsilon(C+N+O)$  в диапазоне  $[Fe/H]$  от -2.5 до +0.3 меняется более, чем на два порядка, величина  $[(C+N+O)/Fe]$  на том же интервале  $[Fe/H]$  меняется только на 0.7 dex (это можно оценить по сплошной прямой линии, проведенной на рис.2 методом наименьших квадратов). Еще одно различие между рис.1 и 2 состоит в том, что если на

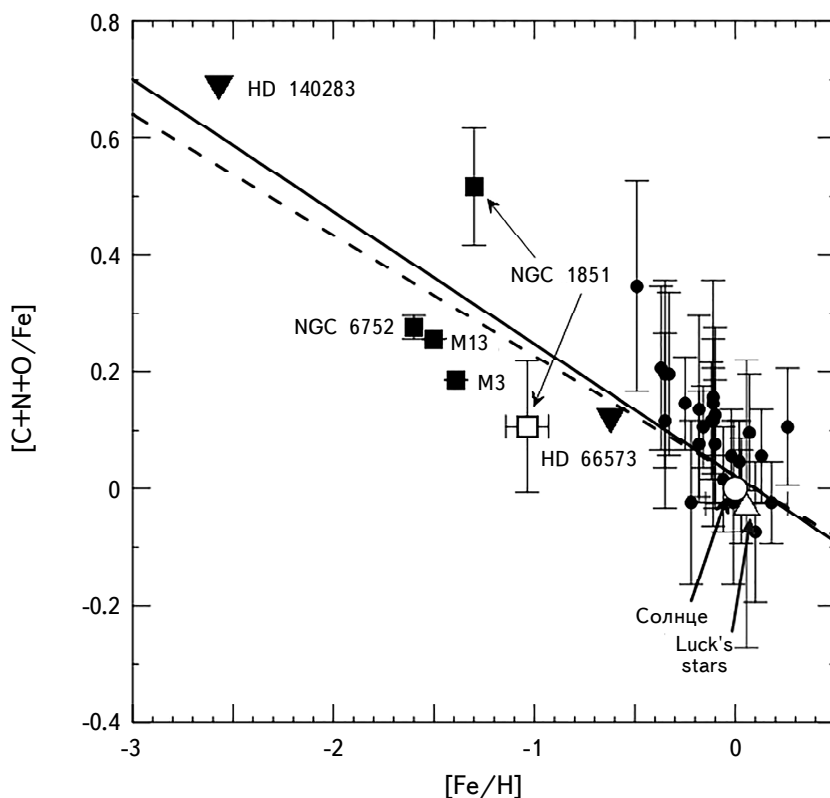


Рис.2. Зависимость величины  $[(C+N+O)/Fe]$  от индекса металличности  $[Fe/H]$ . Сплошная прямая проведена методом наименьших квадратов. Штриховая линия - повторение прямой, полученной для кислорода на рис.3.

первом имеет место ярко выраженная корреляция, то на втором, наоборот, наблюдается антикорреляция.

5. *Зависимость [O/Fe] от [Fe/H].* Среди CNO-элементов в сумму C+N+O наибольший вклад вносит кислород, так как он является самым обильным элементом в этой группе. Это видно на примере Солнца, для которого содержания C, N и O составляют  $\log \varepsilon(\text{C})=8.47$ ,  $\log \varepsilon(\text{N})=7.85$  и  $\log \varepsilon(\text{O})=8.71$  [9]. В этой связи зависимость величины [O/Fe] от [Fe/H] представляет особый интерес.

Давно известна антикорреляция, которая существует между величинами [O/Fe] и [Fe/H] (см., например, [14,15] и ссылки в них). На рис.3 для тех же объектов, что и на рис.1 и 2, представлена зависимость [O/Fe] от [Fe/H]. Эту зависимость мы аппроксимировали прямой линией, которую провели методом наименьших квадратов.

Заметим, что точке Luck's stars на рис.3 соответствуют координаты  $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.06 \pm 0.20$  и  $[\text{O}/\text{Fe}] = -0.05 \pm 0.06$ . Это средние значения, найденные

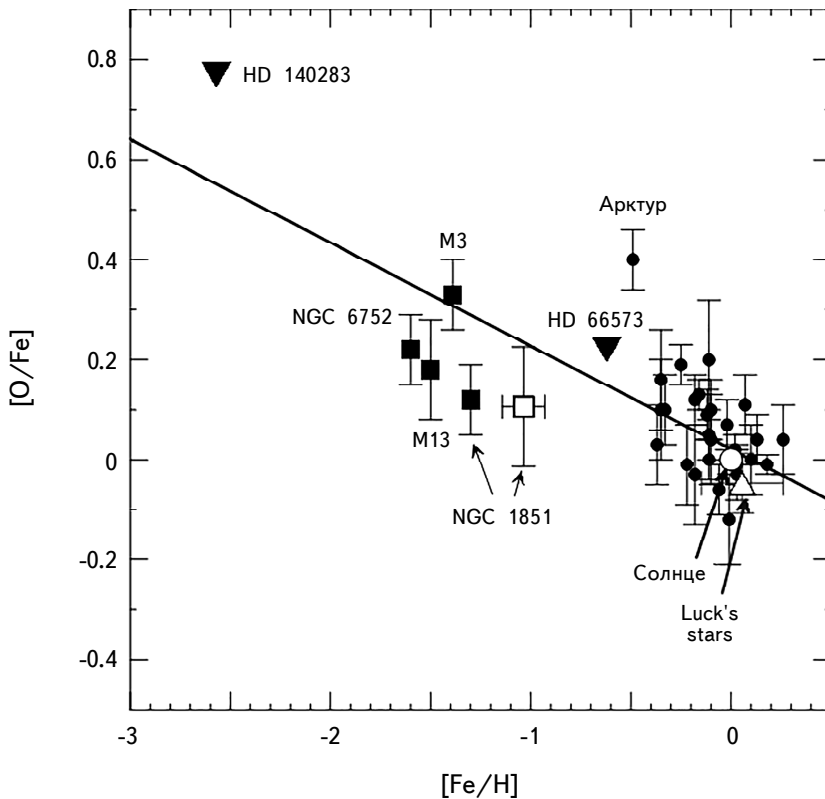


Рис.3. Зависимость величины [O/Fe] от индекса металличности [Fe/H]. Прямая линия проведена методом наименьших квадратов.

нами для 221-й звезды из работы [10]. Для сравнения можно указать, что для 1133 FGK-гигантов из [17] (см. там табл.3) мы нашли очень близкие средние значения  $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.02 \pm 0.23$  и  $[\text{O}/\text{Fe}] = +0.02 \pm 0.21$  (суммарное содержание C+N+O в [17] не определялось).

Была скопирована прямая линия, полученная на рис.3, и перенесена в виде штриховой прямой на рис.2. Видно, что эта штриховая линия, представляющая кислород, очень близка к сплошной прямой, представляющей сумму C+N+O, и лежит слегка ниже. Тем самым подтвердили, что кислород вносит доминирующий вклад в сумму C+N+O.

*6. Обсуждение.* Для дальнейшего обсуждения важным является следующий результат: сумма C+N+O, которая, по-видимому, не меняется в процессе эволюции звезды, определяется в основном вкладом кислорода. Таким образом, наблюдаемые вариации величины  $[(\text{C+N+O})/\text{Fe}]$  отражают фактически вариации величины  $[\text{O}/\text{Fe}]$ .

Традиционно предполагалось, что обогащение межзвездной среды (МС) химическими элементами в Галактике происходило в основном за счет взрывов сверхновых, причем сверхновые I типа поставляли в МС железо, а сверхновые II типа - кислород. Позже добавился еще один, внешний источник обогащения МС элементами. Имеется в виду падение вещества из так называемого Магелланова Потока (Magellanic Stream), представляющего собой высокоскоростные облака газа, летящие из Большого и Малого Магелланова Облака.

Современные "модели с падением" ("infall models") обсуждаются, например, в [15,16]. Они описывают формирование гало, толстого диска и тонкого диска Галактики. К сожалению, здесь не было определено суммарное содержание  $[(\text{C+N+O})/\text{Fe}]$ . Однако в [15,16] получена теоретическая зависимость  $[\text{O}/\text{Fe}]$  от  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , которая достаточно хорошо согласуется с наблюдениями (см., например, рис.15 в [15]). Поскольку кислород вносит определяющий вклад в суммарное содержание C+N+O, тем самым подтверждается, что современная теория достаточно хорошо объясняет зависимость  $[(\text{C+N+O})/\text{Fe}]$  от  $[\text{Fe}/\text{H}]$ .

*7. Заключение.* В настоящей работе, наряду с нашими результатами для 27 G- и K-гигантов в окрестности Солнца использовались также данные из литературы для звезд (в основном красных гигантов) разной металличности. Основные результаты состоят в следующем.

Найдена ярко выраженная корреляция между суммарным содержанием  $\log \epsilon(\text{C+N+O})$  и индексом металличности  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . Линейная зависимость между  $\log \epsilon(\text{C+N+O})$  и  $[\text{Fe}/\text{H}]$  свидетельствует о росте  $\log \epsilon(\text{C+N+O})$  от 7.0 при  $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$  до 9.2 при  $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.3$ , т.е. более чем на 2 dex.

Относительное содержание  $[(C+N+O)/Fe]$  показывает антикорреляцию и меняется на  $-0.7$  dex на том же интервале  $[Fe/H]$ .

Сумма  $C+N+O$  в звезде, по-видимому, остается неизменной в процессе ее эволюции. Найденная зависимость  $[(C+N+O)/Fe]$  от  $[Fe/H]$ , как было показано, почти полностью определяется зависимостью  $[O/Fe]$  от  $[Fe/H]$  (так как кислород вносит главный вклад в  $C+N+O$ ). Поскольку современные модели эволюции Галактики достаточно хорошо объясняют наблюдаемую зависимость  $[O/Fe]$  от  $[Fe/H]$ , тем самым они косвенно объясняют и наблюдаемую зависимость  $[(C+N+O)/Fe]$  от  $[Fe/H]$ .

Ранее суммарное содержание  $C+N+O$  не рассматривалось как параметр, характеризующий химическую эволюцию Галактики. Однако, по нашему мнению, эта величина вполне может быть включена в число таких параметров.

Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН,  
e-mail: lyub@crao.crimea.ru

## THE TOTAL C+N+O ABUNDANCE IN ATMOSPHERES OF RED GIANTS OF VARIOUS METALLICITY

L.S.LYUBIMKOV, D.V.PETROV

The sum  $C+N+O$  in red giants is interesting because it does not apparently change during the star's evolution, although its components, especially the C and N abundances, suffer significant changes. We showed that the pronounced correlation exists between the total abundance  $\log \varepsilon(C+N+O)$  in red giants and their metallicity index  $[Fe/H]$ . The linear relation that was found between  $\log \varepsilon(C+N+O)$  and  $[Fe/H]$  evidences an increase of  $\log \varepsilon(C+N+O)$  from 7.0 at  $[Fe/H] = -2.5$  to 9.2 at  $[Fe/H] = +0.3$ , i.e. greater than 2 dex. The relative abundance  $[(C+N+O)/Fe]$  on the same  $[Fe/H]$  interval, on the contrary, decreases by 0.7 dex. It was shown that the relation between  $[(C+N+O)/Fe]$  and  $[Fe/H]$  is determined almost completely by the relation between  $[O/Fe]$  and  $[Fe/H]$ ; therefore it is confirmed that oxygen gives a main contribution to the sum  $C+N+O$ . Since modern models of the Galaxy evolution explain well enough the observed dependence of  $[O/Fe]$  on  $[Fe/H]$ , they explain by that the observed dependence of  $[(C+N+O)/Fe]$  on  $[Fe/H]$ .

Keywords: *red giants: chemical composition*



## ЛИТЕРАТУРА

1. *L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.V.Petrov et al.*, *Astron. Nachr.*, **342**, 497, 2021.
2. *Л.С.Любимков, Д.Б.Поклад, С.А.Коротин*, *Астрофизика*, **65**, 515, 2022, (*Astrophysics*, **65**, 494, 2022).
3. *Л.С.Любимков, С.А.Коротин, Д.В.Петров и др.*, *Астрофизика*, **65**, 63, 2022, (*Astrophysics*, **65**, 53, 2022).
4. *L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.V.Petrov et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **528**, 304, 2024.
5. *Л.С.Любимков, Д.Б.Поклад*, *Астрон. ж.*, **101**, 9, 60, 2024.
6. *R.E.Luck, D.L.Lambert*, *Astrophys. J.*, **298**, 782, 1985.
7. *J.G.Cohen, J.Meléndez*, *Astron. J.*, **129**, 303, 2005.
8. *D.Yong, F.Grundahl, J.E.Norris*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **446**, 3319, 2015.
9. *K.Lodders*, *Space Sci. Rev.*, **217**, 44, 2021.
10. *R.E.Luck*, *Astron. J.*, **147**, 137, 2014.
11. *G.Tautvaišienė, A.Drazdauskas, A.Bragaglia et al.*, *Astron. Astrophys.*, **658**, A80, 2022. doi:10.1051/0004-6361/202142234.
12. *Y.Takeda*, *Research in Astron. Astrophys.*, **23**, 025008, 2023.
13. *M.Spite, F.Spite, B.Barbuy*, *Astron. Astrophys.*, **652**, A97, 2021.
14. *Т.В.Мишенина*, "Галактика, ее строение и обогащение химическими элементами", Одесса, Астропринт, 2017. (*T.V.Mishenina*, "Galaxy, its structure and enrichment with chemical elements", Odessa, Astroprint, 2017).
15. *F.Matteucci*, *Astron. Astrophys. Rev.*, **29**, 5, 2021.
16. *A.Micali, F.Matteucci, D.Romano*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **436**, 1648, 2013.
17. *R.E.Luck*, *Astron. J.*, **150**, 88, 2015.