

ОТНОШЕНИЕ N/O В РАННИХ В-ЗВЕЗДАХ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ КАК ИНДИКАТОР ИХ ЭВОЛЮЦИИ

Л.С.ЛЮБИМКОВ

Поступила 13 мая 2016

Принята к печати 24 августа 2016

Показано, что в случае ранних В-звезд на стадии Главной последовательности (ГП) из трех отношений - N/C, C/O и N/O, рассматриваемых в качестве индикаторов звездной эволюции, большего доверия заслуживает величина N/O, так как она оказалась нечувствительной к сверхионизации ионов N II и O II. Напротив, величины N/C и C/O, включающие углерод, в случае звезд с $T_{\text{eff}} > 18500$ К могут содержать систематические ошибки вследствие неучтенной сверхионизации ионов C II. Исследовано отношение N/O в атмосферах 46 ранних В-звезд ГП. Полученные значения N/O рассмотрены как функция эффективной температуры, возраста, скорости вращения и массы звезд. Показано, что для большинства ранних В-звезд ГП характерно отношение $[N/O] \approx 0$, свидетельствующее о малом изменении величины N/O в течение стадии ГП, причем этот результат не зависит от перечисленных выше фундаментальных параметров. Большое число звезд с $[N/O] \approx 0$ объясняется двумя причинами: с одной стороны, согласно предсказаниям теории, при начальной скорости вращения $V_0 < 100$ км/с величина N/O к концу стадии ГП меняется мало ($[N/O] < 0.2$); с другой стороны, согласно наблюдениям, большинство ранних В-звезд ГП действительно имеет малые начальные скорости вращения V_0 . Немногочисленные ранние В-звезды ГП, для которых получены повышенные значения $[N/O] = 0.4 - 0.8$, соответствуют моделям со скоростями вращения $V_0 = 200 - 300$ км/с. Этот вывод согласуется с результатами, полученными ранее для звезд таких же масс на более поздней стадии эволюции, стадии AFG-сверхгигантов и ярких гигантов.

Ключевые слова: *ранние В-звезды; звездные атмосферы; химический состав; звездная эволюция*

1. **Введение.** В течение стадии Главной последовательности (ГП) содержания гелия и азота в атмосферах ранних В-звезд повышаются. Впервые это было обнаружено автором в 1970-80 гг., сначала для гелия [1,2], потом для азота [3]. Следует напомнить, что стадия ГП - это самая первая и самая продолжительная стадия звездной эволюции, когда в ядре звезды горит водород. В ранних В-звездах ГП горение водорода происходит в CNO-цикле; при этом увеличиваются содержания He и N в ядре звезды. Обнаруженное в [1-3] повышение содержаний He и N в атмосферах звезд как будто свидетельствовало о глубоком перемешивании, которое должно приводить к выносу продуктов CNO-цикла из звездных недр на поверхность.

Наблюдаемое увеличение содержаний He и N у В-звезд в течение эволюции на ГП в те годы оказалось неожиданностью для теории. Объяснение этому явлению пришло позже, когда теоретики научились рассчитывать модели вращающихся звезд. Оказалось, что начальная скорость вращения V_0 является таким же важным параметром в эволюции звезды, как и масса M (см., например, Медера [4]). Из расчетов моделей звезд с вращением следовало, что изменения в атмосферных содержаниях легких элементов, появляющиеся в результате перемешивания, индуцированного вращением, тем больше, чем больше масса M и чем выше скорость вращения V_0 .

Перемешивание вследствие вращения приводит к повышению содержаний гелия и азота и к одновременному понижению содержания углерода (здесь и далее имеются в виду самые распространенные изотопы этих элементов ^4He , ^{14}N и ^{12}C). Давно известна антикорреляция между содержаниями N и C у A-, F- и G-сверхгигантов, которые являются потомками ранних В-звезд ГП. Недавно в [5] было показано, что наблюдаемая антикорреляция между N и C у таких звезд отражает прежде всего зависимость аномалий N и C от начальной скорости вращения V_0 : чем выше V_0 , тем больше избыток N и дефицит C. Тем самым была подтверждена важность параметра V_0 для правильного понимания эволюционных изменений в наблюдаемом химическом составе звезд.

Как известно (см., например, [6]), отношения содержания трех элементов, участвующих в CNO-цикле, именно величины N/C, C/O и N/O, относятся к наиболее чувствительным индикаторам эволюции звезд средних и больших масс. Детальные расчеты значений N/C и N/O для моделей с массами M от $15 M_\odot$ до $1.7 M_\odot$ (здесь $M_\odot$ - масса Солнца) и скоростями вращения V_0 от 0 до 0.95 критической скорости представлены в работе [7].

В настоящей работе анализируется отношение N/O для группы ранних В-звезд ГП. Отношения N/C и C/O, куда входит углерод, исключены из рассмотрения, так как их определяемые значения для таких звезд могут быть систематически искажены вследствие неучтенной сверхионизации ионов C II (см. ниже). Рассмотрена зависимость величины N/O от возраста звезд, их скорости вращения и массы. Полученные результаты сравниваются с упомянутыми выше расчетами [7] вращающихся моделей звезд.

2. *Насколько реальны определения N/C, C/O и N/O для ранних В-звезд?* Данная работа основана на предыдущих исследованиях В-звезд ГП, результаты которых были опубликованы в 2000-х гг. в цикле статей Любимкова и др. [8-12]. В работе [8] были получены спектры высокого разрешения для более 100 В-звезд ГП; наблюдения проводились на двух обсерваториях - Крымской астрофизической обсерватории и Обсерватории Мак Дональд Техасского университета. В [9] для 107 звезд этого списка были определены фундаментальные параметры, включая

эффективную температуру T_{eff} , ускорение силы тяжести в атмосфере $\log g$, массу M , радиус R , светимость L и возраст t , а также относительный возраст $t/t_{\text{жизни}}$, где $t_{\text{жизни}}$ - время жизни звезды данной массы M на стадии ГП. В [10] для 102 звезд было найдено содержание гелия He/H ; при этом анализ линий He I был выполнен при отказе от условия ЛТР (локальное термодинамическое равновесие). В [11] для 52 звезд был выполнен не-ЛТР анализ содержания магния, а в [12] для 57 звезд - не-ЛТР анализ содержаний C , N и O .

В более поздней работе [13] те же авторы, выбрав из первоначального списка 22 непроэволюционировавшие В-звезды с массами $M = 5 - 11 M_{\odot}$, и переопределив для них по усовершенствованной методике параметры T_{eff} и $\log g$, нашли содержания C , N и O . Они оказались близкими к солнечным, что подтверждало, что начальный химический состав атмосфер молодых В-звезд ГП в среднем тот же, что и у Солнца. Только углерод, как и в работах других авторов, показал небольшой дефицит.

Особый интерес в контексте данного исследования представляет работа [14], где рассмотрена возможная сверхионизация ионов C II , N II и O II в атмосферах ранних В- и поздних О-звезд. Напомним, что именно по линиям C II , N II и O II для ранних В-звезд определяются содержания C , N и O . Термин "сверхионизация" здесь означает, что фотоионизация ионов C II , N II и O II , происходящая под действием ультрафиолетового излучения, в реальных атмосферах может быть существенно выше, чем в расчетах, основанных на стандартных моделях атмосфер. Именно такие модели используются до сих пор при анализе содержания C , N и O в ранних В-звездах.

В [14] показано, что сверхионизация становится заметной при температурах $T_{\text{eff}} > 18500 \text{ K}$ в случае линий C II и при $T_{\text{eff}} > 26000 \text{ K}$ в случае линий N II и O II . Отобрав из [13] для оценки содержания C звезды с $T_{\text{eff}} < 18500 \text{ K}$, а для оценки содержаний N и O - звезды с $T_{\text{eff}} < 25000 \text{ K}$,

Таблица 1

СРЕДНИЕ НАЧАЛЬНЫЕ СОДЕРЖАНИЯ C , N И O В
АТМОСФЕРАХ В-ЗВЕЗД ГП В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА [14].
ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ПРИВЕДЕНЫ СОДЕРЖАНИЯ C , N И O В
АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА (по данным [15,16])

Элемент	$\log \epsilon$ В-звезды ГП	$\log \epsilon$ Солнце
C	8.46 ± 0.09	8.43 ± 0.05 [15] 8.50 ± 0.06 [16]
N	7.78 ± 0.09	7.83 ± 0.05 [15] 7.86 ± 0.12 [16]
O	8.72 ± 0.12	8.69 ± 0.05 [15] 8.76 ± 0.07 [16]

удалось получить неискаженные за счет сверхионизации начальные содержания С, N и O в В-звездах ГП. В среднем в пределах ошибки они совпадают с солнечными содержаниями. Это видно из табл.1, где наряду с найденными в [14] средними начальными содержаниями $\log \epsilon(\text{C})$, $\log \epsilon(\text{N})$ и $\log \epsilon(\text{O})$ для В-звезд ГП приведены современные оценки содержаний С, N и O для Солнца [15] и [16]. Последние получены на основе нестационарных гидродинамических 3D-моделей солнечной атмосферы. Отметим, что содержания элементов здесь и далее даются в стандартной логарифмической шкале, где для водорода принято $\log \epsilon(\text{H}) = 12.00$.

Поскольку, согласно [14], при температурах $T_{\text{eff}} > 18500 \text{ K}$ определяемое содержание С вследствие неучтенной сверхионизации оказывается заниженным (до 0.2 dex), а содержания N и O вплоть до температур $T_{\text{eff}} \approx 26000 \text{ K}$ остаются неискаженными, в области $T_{\text{eff}} \approx 18500 - 26000 \text{ K}$ отношение N/C должно получаться больше, а отношение C/O - меньше реального значения. Отсюда следует, что для ранних В-звезд ГП (им соответствуют температуры $T_{\text{eff}} > 18000 \text{ K}$) полученные в литературе значения N/C и C/O могут быть соответственно завышены или занижены (до 0.2 dex).

Иная ситуация имеет место в случае отношения N/O. Оба элемента, азот и кислород, в случае В-звезд с температурами $T_{\text{eff}} < 26000 \text{ K}$, согласно [14], оказываются нечувствительными к сверхионизации, поэтому для таких звезд определяемые отношения N/O можно считать, с этой точки зрения, вполне надежными. Более того, если рассматривать звезды с $T_{\text{eff}} > 26000 \text{ K}$, для них неучтенная сверхионизация примерно одинаково влияет и на N II и на O II, т.е. этот эффект, одновременно понижая содержания N и O, должен мало влиять на отношение N/O.

Интересно отметить, что как раз вблизи $T_{\text{eff}} \approx 26000 \text{ K}$ в распределении эквивалентных ширин W линий N II и O II по T_{eff} наблюдается максимум (см., например, рис.2 и 3 в [13]). Однако при этом отношение эквивалентных ширин W (линия N II)/ W (линия O II) не показывает в районе $T_{\text{eff}} \approx 26000 \text{ K}$ никакого максимума или минимума; напротив, оно меняется монотонно в широком диапазоне T_{eff} от 14000 до 32000 K.

Из сказанного можно сделать вывод, что в случае ранних В-звезд при исследовании отношений N/C, C/O и N/O предпочтение следует отдавать величине N/O, в то время как величины N/C и C/O, куда входит углерод, могут оказаться систематически искаженными вследствие неучтенной сверхионизации ионов С II. Следуя этому выводу, автор отказался от рассмотрения отношений N/C и C/O. Целью настоящей работы было исследование отношения N/O в достаточно большой группе ранних В-звезд ГП.

3. *Список исследованных звезд.* Список В-звезд, который был отобран для данного анализа из работы [12], представлен в табл.2 и 3. Поскольку нашей задачей было определение величины N/O, из списка

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ 40 В-ЗВЕЗД С ТЕМПЕРАТУРАМИ $T_{\text{eff}} < 26000$ К

HR	T_{eff} К	logg	$M / M_{\odot}$	u / t_{m}	$V \sin i$ км/с	log(N/O)	[N/O]
38	19220	3.83	7.6	0.76	11	-0.86	+0.08
1072	22300	3.81	9.8	0.76	39	-0.22	+0.72
1074	25700	4.22	10.5	0.06	97	-1.09	-0.15
1595	22500	4.17	8.4	0.21	6	-0.83	+0.11
1617	18570	3.87	7.1	0.70	46	-1.00	-0.06
1640	19750	3.81	8.0	0.76	54	-1.05	-0.11
1731	17900	3.98	6.2	0.60	11	-0.72	+0.22
1781	23700	4.27	8.9	0.00	5	-0.92	+0.02
1810	21040	4.11	7.7	0.35	24	-0.49	+0.45
1820	19370	4.05	7.0	0.45	14	-0.95	-0.01
1840	21300	4.26	7.4	0.00	11	-0.93	+0.01
1848	18900	4.23	6.1	0.11	25	-0.92	+0.02
1861	25300	4.11	10.7	0.30	10	-1.12	-0.18
1880	25400	4.21	10.3	0.08	72	-0.83	+0.11
1886	23300	4.11	9.2	0.32	13	-1.16	-0.22
1923	21400	3.78	9.5	0.79	17	-0.88	+0.06
1933	24090	4.14	9.7	0.26	66	-0.77	+0.17
1950	23100	4.13	9.0	0.28	34	-0.95	-0.01
2058	21720	4.24	7.7	0.06	21	-0.96	-0.02
2205	19390	3.74	8.1	0.83	9	-0.90	+0.04
2344	19420	3.76	8.0	0.81	61	-0.85	+0.09
2373	20400	3.92	7.9	0.65	57	-1.08	-0.14
2517	16600	3.31	8.1	1.02	70	-0.54	+0.40
2618	22900	3.39	14.4	1.01	47	-0.60	+0.34
2633	18000	3.38	8.8	1.02	18	-0.75	+0.19
2688	19200	3.86	7.3	0.73	17	-1.02	-0.08
2756	16590	4.06	5.4	0.46	26	-1.09	-0.15
2824	20210	3.86	8.4	0.72	12	-0.97	-0.03
2928	23650	3.83	11.2	0.73	26	-0.78	+0.16
3023	22400	3.86	9.7	0.71	42	-0.89	+0.05
7426	16540	3.60	6.8	0.93	29	-0.94	0.00
7862	17750	4.19	5.7	0.17	34	-1.09	-0.15
7929	16700	3.64	6.7	0.91	40	-0.94	0.00
7996	15980	3.60	6.5	0.92	35	-0.97	-0.03
8243	24300	3.32	18.0	1.01	67	-0.17	+0.77
8385	15360	3.76	5.6	0.82	19	-0.95	-0.01
8439	17400	3.31	8.8	1.02	19	-1.06	-0.12
8549	20400	3.97	7.8	0.60	8	-0.96	-0.02
8768	18090	3.94	6.5	0.65	8	-1.02	-0.08
9005	22340	3.79	10.5	0.76	15	-0.75	+0.19

[12] были исключены те звезды, для которых в этой работе не были получены содержания кислорода. Кроме того, было исключено несколько звезд, которые, согласно базе данных SIMBAD (<http://simbad.u-strasbg.fr/>)

simbad/sim-fid), оказались спектрально-двойными или переменными.

В табл.2 приведены параметры 40 ранних В-звезд с эффективными температурами $T_{\text{эф}} < 26000$ К. Как отмечено выше, для звезд с такими температурами $T_{\text{эф}}$ определяемые содержания N и O (а значит, и отношение N/O) не искажены вследствие неучтенной сверхионизации. В табл.2 наряду с номером HR, для каждой звезды указаны следующие параметры: эффективная температура $T_{\text{эф}}$, логарифм ускорения силы тяжести $\log g$, масса звезды в массах Солнца $M/M_{\odot}$, относительный возраст $t/t_{\text{П}}$ и проекция скорости вращения на луч зрения $V \sin i$. Отметим, что значения $V \sin i$ были найдены в [10] из не-ЛТР анализа профилей шести линий He I.

В предпоследнем столбце табл.2 указана величина $\log(N/O) = \log \epsilon(N) - \log \epsilon(O)$. Следует отметить, что для 22 звезд в табл.2, в отличие от остальных звезд, где использованы данные [12], значения $T_{\text{эф}}$, $\log g$ и $\log(N/O)$ взяты из работы [13]. Это уточненные величины по сравнению с данными [12] для тех же звезд. Содержания N и O для этих звезд в [13] несколько отличаются от [12], однако важно, что отношение N/O в пределах ошибок определения осталось прежним. В последнем столбце табл.2 приведена величина $|N/O| = \log(N/O) + 0.94$, разница между найденным значением $\log(N/O)$ для каждой звезды и исходным значением $\log(N/O)$ в начале ГП. Последнее, согласно табл.1, для звезд той же выборки составляет $\log(N/O) = -0.94$. Интересно, что такое же начальное значение $\log(N/O) = -0.94$ принято в модельных расчетах [7], которые используются ниже.

В табл.3 приведены параметры шести В-звезд с эффективными температурами $T_{\text{эф}} > 26000$ К (согласно [12]). Как отмечено выше, для таких горячих звезд содержания N и O могут быть занижены из-за неучтенного эффекта сверхионизации, однако отношение N/O, как можно ожидать, не подвержено значительному влиянию этого эффекта. Тем не менее, эти шесть звезд в последующем анализе N/O (см. рис.1 и 2) будут выделены особо. Как окажется, они вполне согласуются с теми зависимостями, которые показывают звезды из табл.2.

Таблица 3

ПАРАМЕТРЫ ШЕСТИ В-ЗВЕЗД С ТЕМПЕРАТУРАМИ $T_{\text{эф}} > 26000$ К

HR	$T_{\text{эф}}$ К	$\log g$	$M / M_{\odot}$	$t/t_{\text{П}}$	$V \sin i$ км/с	$\log(N/O)$	$ N/O $
1756	27900	4.22	12.4	0.04	33	-1.01	-0.07
1855	30700	4.42	15.0	0.00	20	-0.84	+0.10
1887	27500	4.13	12.5	0.24	30	-0.97	-0.03
2479	28500	3.65	18.8	0.80	90	-0.31	+0.63
2739	29900	4.10	15.1	0.27	47	-0.59	+0.35
8797	27200	3.98	13.1	0.51	47	-0.58	+0.36

Следует отметить, что точность значений $[N/O]$, приведенных в табл.2, составляет в среднем ± 0.14 dex, хотя для отдельных звезд ошибка достигает ± 0.20 dex. Ошибка определения $[N/O]$ для шести звезд в табл.3 несколько выше: для четырех звезд она составляет в среднем ± 0.16 dex и для двух звезд (HR 2479 и HR 2739) она равна ± 0.24 и ± 0.25 dex. Сравнительно большие ошибки в определении $[N/O]$ для HR 2479 и HR 2739 объясняются меньшей точностью содержаний азота для этих звезд. На рис.1 и 2, приведенных ниже, ошибки в $[N/O]$ для HR 2479 и HR 2739, будут указаны.

Эволюция наблюдаемых значений $[N/O]$ в течение стадии ГП, в принципе, должна зависеть от трех параметров: массы, возраста и скорости вращения звезды. Поэтому представляют интерес общие сведения об этих параметрах для звезд, перечисленных в табл.2 и 3. Массы M звезд в табл.2 варьируются от 5.4 до $18.0 M_{\odot}$, в то время как в табл.3 содержатся только сравнительно массивные звезды с M от 12.4 до $18.8 M_{\odot}$. Относительный возраст $t/t_{\text{ГП}}$ исследованных звезд занимает интервал от нуля (начало ГП) до значений $t/t_{\text{ГП}} = 1.01 - 1.02$. Напомним, что значение $t/t_{\text{ГП}} = 1$ соответствует звезде в момент окончания стадии ГП, т.е. звезды с $t/t_{\text{ГП}} = 1.01 - 1.02$ только что завершили эту стадию. Наблюдаемые скорости вращения для всех звезд $V \sin i < 100$ км/с (отметим, что в списках звезд [12] и [13], использованных в настоящей работе, не рассматривались звезды с более

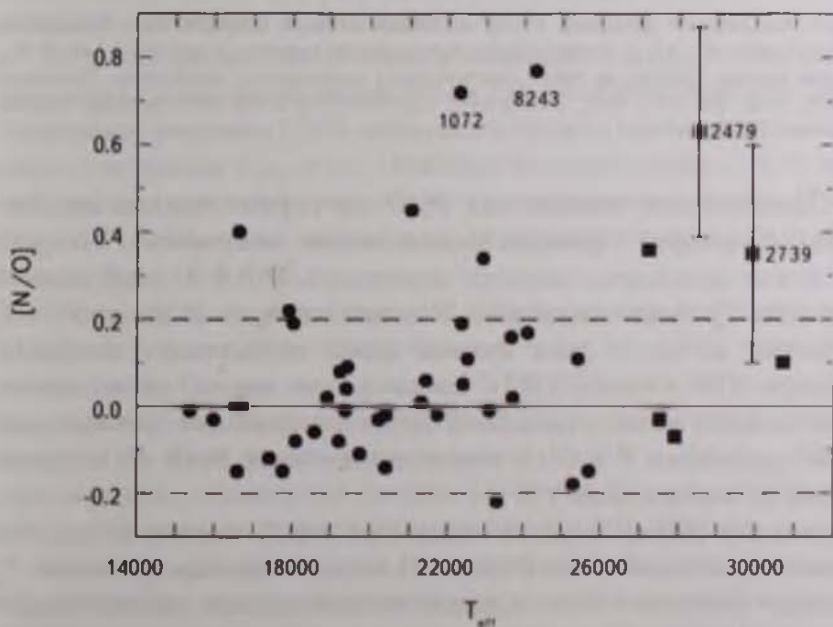


Рис.1. Зависимость величины $[N/O]$ от эффективной температуры T_{eff} . Заполненные кружки соответствуют звездам с $T_{\text{eff}} < 26000$ К из табл.2, заполненные квадратикки - звездам с $T_{\text{eff}} > 26000$ К из табл.3. Для звезд HR 2479 и HR 2739 указаны ошибки определения $[N/O]$ (в этих двух случаях они особенно велики).

высокими значениями $V \sin i$). Следует подчеркнуть, что для некоторых звезд реальная скорость вращения на экваторе V может быть существенно выше величины $V \sin i$, проекции V на луч зрения.

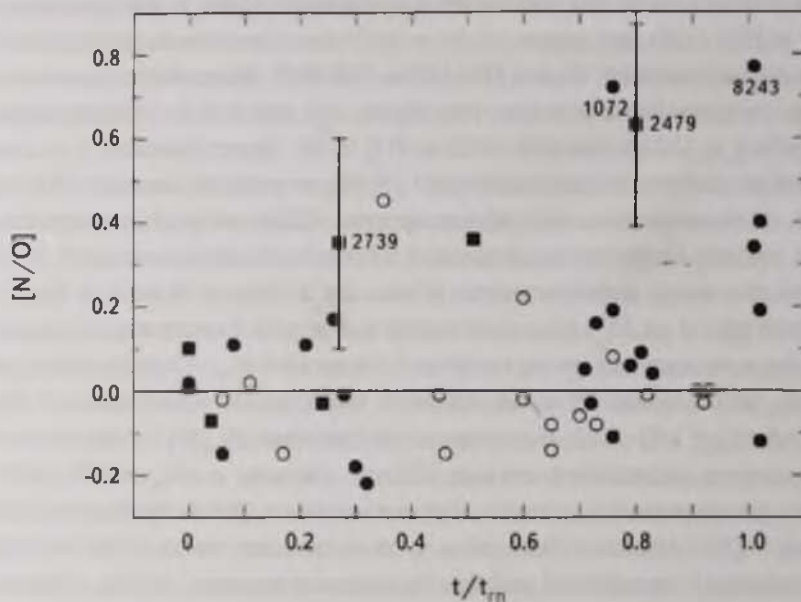


Рис.2. Зависимость величины $[N/O]$ от относительного возраста t/t_{III} . Звездам из табл.2 с массами $M > 8 M_{\odot}$ соответствуют заполненные кружки, а звездам с $M < 8 M_{\odot}$ - открытые кружки. Звездам из табл.3 соответствуют заполненные квадратики. Отмечены положения звезд 2739, 1072, 2479 и 8243. Для HR 2739 и HR 2479 указаны ошибки определения $[N/O]$.

4. *Зависимость отношения N/O от эффективной температуры.* Некоторый предварительный анализ полученных значений $[N/O]$ можно выполнить, построив зависимость $[N/O]$ от эффективной температуры T_{eff} . Такая зависимость в диапазоне T_{eff} от 15360 до 30700 К представлена на рис.1. Здесь нулевая линия соответствует исходному отношению N/O в начале ГП. С точки зрения теории, на эту линию должны попадать звезды с начальной скоростью вращения $V_0 = 0 \text{ км/с}$, для которых содержания N и O (а, значит, и отношение N/O) не меняются от начала до конца стадии ГП.

Очевидный вывод, который следует из рис.1, состоит в том, что большинство исследованных В-звезд ГП во всем широком диапазоне T_{eff} показывает значения $[N/O]$, лежащие вблизи нулевой линии, причем разброс $\pm 0.2 \text{ dex}$ около нее сравним с ошибками определения $[N/O]$. (Полоса шириной $\pm 0.2 \text{ dex}$ обозначена на рис.1 штриховыми линиями). Только 8 звезд из 46, т.е. 17%, показали значения $[N/O]$ заметно больше 0.2 (от 0.34 до 0.77). В отношении остальных 38 звезд (83%) возникает

предположение, что они, имея малые значения $[N/O] \approx 0$, имели и малые начальные скорости вращения V_0 . Ниже будет показано, что такое предположение подтверждается современными исследованиями.

Другой вывод, следующий из рис.1, состоит в том, что величина $[N/O]$ не показывает какого-либо тренда с T_{eff} . При этом звезды с $T_{\text{eff}} > 26000$ К из табл.3 (квадратики), как и ожидалось, не обнаруживают каких-либо систематических отличий в значениях $[N/O]$ от звезд с $T_{\text{eff}} < 26000$ К из табл.2 (заполненные кружки). Последнее заключение подтверждается при сопоставлении $[N/O]$ с другими параметрами (см. ниже).

5. Зависимость отношения N/O от возраста. На рис.2 представлена зависимость величины $[N/O]$ от относительного возраста звезд $t/t_{\text{ГП}}$. Чтобы разделить звезды по массам M , разными значками показаны звезды с $M \geq 8 M_{\odot}$ и $M < 8 M_{\odot}$ из табл.2. Особыми значками (квадратиками) представлены шесть звезд из табл.3; их массы достаточно велики: $M = 12.4 - 8.8 M_{\odot}$. Здесь нулевая линия, как и на рис.1, соответствует исходному отношению N/O в начале ГП.

Большинство В-звезд на рис.2, независимо от относительного возраста $t/t_{\text{ГП}}$, в пределах разброса $\pm 0.2 \text{ dex}$ лежит вблизи нулевой линии. Напомним, что эта особенность уже была отмечена при обсуждении рис.1. Причина того, что у этих звезд $[N/O] \approx 0$, связана с достаточно малой начальной скоростью вращения V_0 (см. ниже).

Из рис.2 видно, что 10 звезд с возрастом $0 \leq t/t_{\text{ГП}} < 0.25$, т.е. находящиеся в самом начале эволюции на ГП, все имеют величину $[N/O] \approx 0$. Повышение величины $[N/O]$ наблюдается только у проэволюционировавших звезд с возрастом $t/t_{\text{ГП}} \geq 0.3$. Особенно большой разброс $[N/O]$ на рис.2 наблюдается для пяти звезд, только что завершивших стадию ГП (у них $t/t_{\text{ГП}} = 1.01 - 1.02$); здесь величина $[N/O]$ варьируется от -0.12 для HR 8439 до +0.77 для HR 8243.

Интересно отметить, что звезда HR 8243, показавшая наибольшее значение $[N/O] = 0.77$, имеет почти самую большую массу $M = 18 M_{\odot}$ среди исследованных звезд. Еще две звезды на рис.2 - HR 1072 и HR 2479, которые тоже показали высокие значениями $[N/O] = 0.6 - 0.7$ и тоже близки к завершению стадии ГП, также имеют большие массы $M = 9.8$ и $18.8 M_{\odot}$. Как будет показано ниже, повышенные значения $[N/O] = 0.4 - 0.8$ соответствуют моделям звезд с начальными скоростями вращения $V_0 = 200 - 300 \text{ км/с}$.

Завершая обсуждение рис.2, следует отметить, что шесть звезд с $T_{\text{eff}} > 26000$ К из табл.3, как и ожидалось, вполне вписываются на рисунке в общую картину, которую создают звезды с $T_{\text{eff}} < 26000$ К из табл.2.

6. Зависимость отношения N/O от скорости вращения. Еще один параметр - скорость вращения, согласно теории, должен играть

важную роль в эволюции величины $[N/O]$ у ранних В-звезд. На рис.3 представлена зависимость найденных значений $[N/O]$ от наблюдаемой скорости вращения $V \sin i$, проекции скорости вращения на экваторе V на луч зрения. Для всех звезд на рис.3 $V \sin i < 100$ км/с, однако, как уже отмечалось, реальная скорость вращения на экваторе V для некоторых звезд может быть существенно выше, чем $V \sin i$.

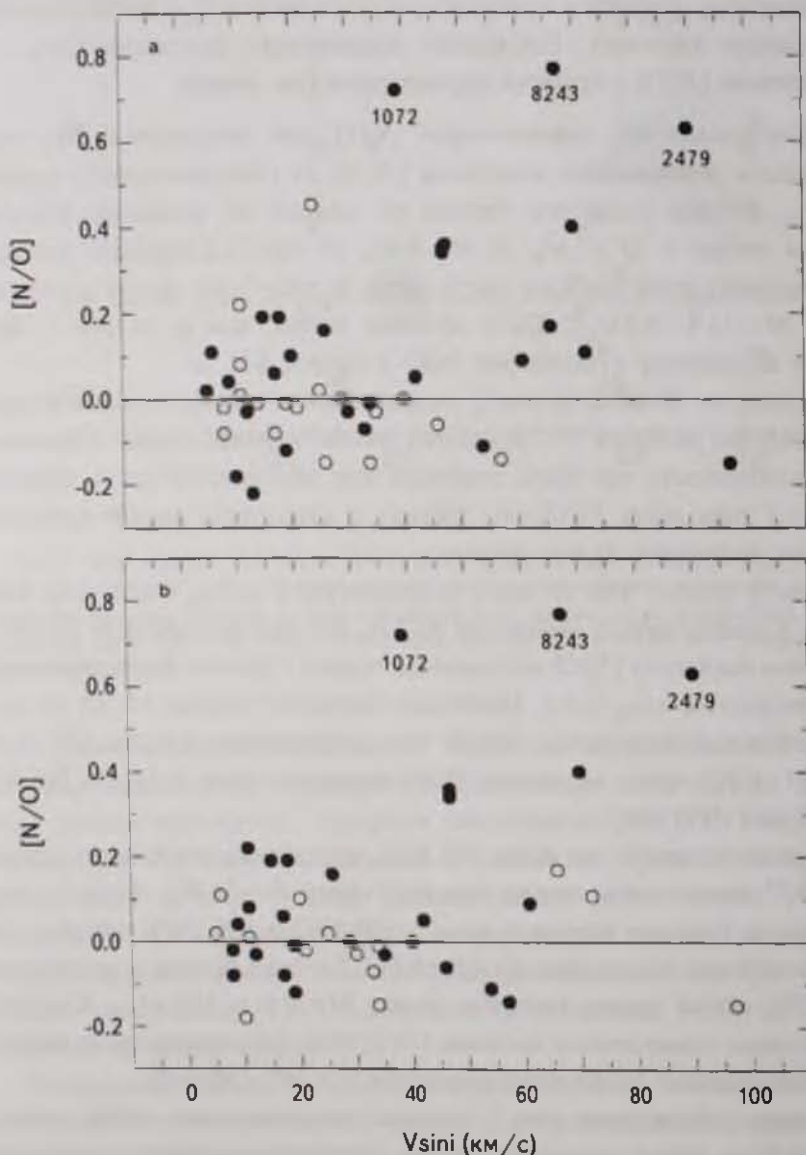


Рис.3. Зависимость величины $[N/O]$ от наблюдаемой скорости вращения $V \sin i$. На верхней панели (рис.3а) звезды разделены по массам: объектам с массами $M \geq 8 M_{\odot}$ соответствуют заполненные кружки, объектам с $M < 8 M_{\odot}$ - открытые кружки. На нижней панели (рис.3б) звезды разделены по относительному возрасту: объектам с возрастом $t/t_{III} > 0.5$ соответствуют заполненные кружки, объектам с $t/t_{III} \leq 0.3$ - открытые кружки.

Чтобы учесть зависимость $[N/O]$ от двух других параметров - массы M и возраста $t/t_{\text{ГП}}$, рис.3 представлен в виде двух панелей. На верхней панели (рис.3а) разными значками показаны звезды с массами $M \geq 8 M_{\odot}$ и $M < 8 M_{\odot}$. На нижней панели (рис.3b) разными значками показаны звезды с возрастом $t/t_{\text{ГП}} \leq 0.3$ (начало ГП) и $t/t_{\text{ГП}} > 0.5$ (вторая половина жизни на ГП). Несколько звезд с $t/t_{\text{ГП}}$ между 0.3 и 0.5 на рис.3b не представлено.

На рис.1 и 2 шесть звезд с $T_{\text{эф}} > 26000$ К из табл.3 не показали каких-либо систематических отличий в значениях $[N/O]$ от звезд с $T_{\text{эф}} < 26000$ К из табл.2. Оказалось, что и при построении зависимости $[N/O]$ от $V \sin i$ на рис.3 эти звезды хорошо вписываются в общую картину, поэтому они на рис.3 (чтобы не усложнять рисунок) особыми значками не отмечены. (То же замечание относится к последующему рис.4).

Как уже упоминалось, расчеты [7] моделей звезд с вращением выполнены для интервала масс M от 15 до $1.7 M_{\odot}$ и начальных скоростей вращения V_0 от нуля до 0.95 критической скорости. Из результатов, полученных в [7], следует, что при скорости вращения $V_0 = 40$ км/с даже в массивной звезде с $M = 15 M_{\odot}$ никакого изменения величины $[N/O]$ к концу ГП не происходит. Нужна скорость $V_0 > 100$ км/с, чтобы произошло обнаружимое повышение $[N/O]$. Например, как следует из [7], при $V_0 = 130$ км/с значение $[N/O]$ увеличивается до 0.33 dex при $M = 15 M_{\odot}$ и только до 0.20 dex при

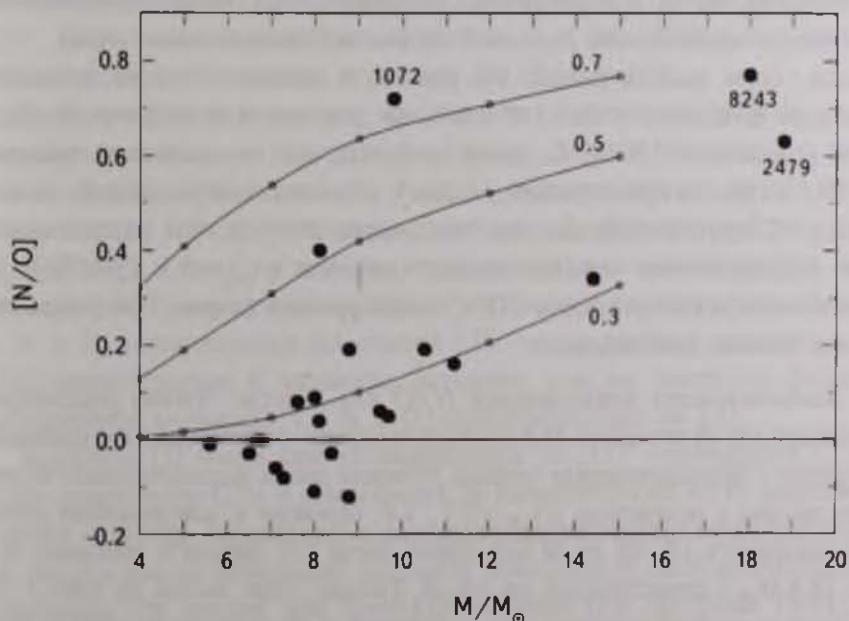


Рис.4. Зависимость величины $[N/O]$ от массы M для В-звезд, находящихся в конце стадии ГП ($t/t_{\text{ГП}} = 0.70 - 1.02$). Сплошные линии соответствуют теоретическим зависимостям, основанным на модельных расчетах [7] для трех значений начальной угловой скорости вращения $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.3, 0.5$ и 0.7 .

$$M = 12 M_{\odot}.$$

В связи с этим возникает вопрос: какие реальные скорости вращения наблюдаются у ранних В-звезд ГП? Оказывается, что наблюдаемые значения $V_{\sin i}$ у многих таких звезд действительно малы. В частности, согласно [17], максимум в распределении скоростей вращения у карликов ГП классов В0-В2 приходится на интервал $V_{\sin i} = 0 - 20$ км/с, хотя весь диапазон значений $V_{\sin i}$ простирается до $V_{\sin i} \sim 400$ км/с. Близкий результат ранее был получен в [18]: максимум в распределении $V_{\sin i}$ у ранних В-звезд ГП приходится на интервал 0-50 км/с. В работе Абта и др. [19], где исследовались скорости вращения у В-звезд ГП, было получено, что довольно большая доля этих звезд имела начальные скорости вращения на экваторе $V_0 \sim 50$ км/с.

Учитывая все сказанное, теперь можно вернуться к рис.3 и обсудить некоторые его особенности. Во-первых, большинство исследованных звезд (32 из 47, т.е. 68%) показывают небольшие скорости вращения $V_{\sin i} = 5 - 40$ км/с. Это объясняется тем, что реальная доля ранних В-звезд с $V \leq 40$ км/с действительно велика (см. выше). Во-вторых, подавляющее большинство таких звезд показывают на рис.3а, б значения $[N/O]$ вблизи нулевой линии. Это означает, что значения $V_{\sin i}$ для них достаточно близки к реальным скоростям вращения V , а тогда величина $[N/O]$ для таких звезд, как следует из расчетов [7], не должна меняться на ГП независимо от массы и возраста. Для пары звезд (HR 1072 и HR 1810) с $V_{\sin i} < 40$ км/с, показавших на рис.3а, б повышенные значения $[N/O]$, можно предположить существенное превышение реальной скорости V относительно $V_{\sin i}$.

Далее, если рассматривать на рис.3а, б звезды с более высокими скоростями вращения $V_{\sin i} \geq 40$ км/с, то для них наблюдается большой разброс в величине $[N/O]$. С одной стороны, все повышенные значения $[N/O] > 0.3$ на рис.3а принадлежат звездам с относительно высокими массами $M \geq 8 M_{\odot}$. С другой стороны, все эти звезды с $[N/O] > 0.3$ (кроме одной) имеют одновременно относительный возраст $t/t_{\text{ГП}} > 0.5$ (рис.3б), т.е. приближаются к концу стадии ГП. С точки зрения теории, эти результаты являются вполне ожидаемыми.

7. Зависимость отношения N/O от массы. Чтобы рассмотреть зависимость $[N/O]$ от массы M и затем выполнить количественное сравнение результатов с предсказаниями теории, отберем среди исследованных В-звезд только звезды с возрастом $t/t_{\text{ГП}} \geq 0.7$, т.е. близкие к завершению стадии ГП. Зависимость $[N/O]$ от M для таких звезд (22 звезды с массами M от 5.6 до $18.8 M_{\odot}$) представлена на рис.4. Только одна звезда из табл.3 (HR 2479) попала на этот рисунок, все остальные звезды взяты из табл.2. Здесь же сплошными линиями показаны данные расчетов [7] для интервала масс $M = 4 - 15 M_{\odot}$ и трех начальных скоростей вращения $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.3, 0.5$ и 0.7, где Ω - угловая скорость вращения и Ω_{crit} - критическая скорость

вращения (расчеты [7] выполнены для значений $\Omega/\Omega_{\text{crit}}$ от 0 до 0.95).

Величина V_0 , начальная линейная скорость вращения на экваторе, при постоянном значении $\Omega/\Omega_{\text{crit}}$ зависит от массы M . Согласно [7], при $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.3$ величина V_0 меняется от 116 км/с для $M = 5M_{\odot}$ до 132 км/с для $M = 15M_{\odot}$. При $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.5$ соответствующее изменение V_0 составляет от 192 до 241 км/с, а при $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.7$ - от 277 до 333 км/с.

Из рис.4 видно, что для большинства представленных здесь звезд, которые показывают сравнительно низкие значения $[N/O] \leq 0.3$, наиболее подходящими с точки зрения теории являются модели с $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0$ и $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.3$, чему соответствуют начальные скорости вращения V_0 от 0 до 130 км/с. Для четырех звезд с наиболее высокими значениями $[N/O] = 0.40 - 0.77$ хорошо подходят модели с $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.5$ ($V_0 \approx 220$ км/с) и $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.7$ ($V_0 \approx 300$ км/с). Отметим, что наиболее высокие значения $[N/O] = 0.8 - 0.9$ расчеты [7] предсказывают для модели $M = 15M_{\odot}$ при скоростях вращения $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.80 - 0.95$ ($V_0 \approx 400 - 500$ км/с); однако такие $[N/O]$ на рис.1-4 не наблюдаются.

Таким образом, анализ полученных значений $[N/O]$ для ранних В-звезд ГП в интервале M от 5 до $19M_{\odot}$ приводит к следующим выводам. Поскольку большинство таких звезд, согласно наблюдениям, имеет в начале ГП скорости вращения $V_0 < 100$ км/с, то для них, в полном соответствии с теоретическими моделями, в конце ГП наблюдаются значения $[N/O] \leq 0.2$, т.е. у них на стадии ГП не происходит существенного повышения отношения N/O. Только при начальных скоростях $V_0 = 200 - 300$ км/с в конце ГП имеют место повышенные значения $[N/O] = 0.4 - 0.8$.

В связи с этими выводами представляет интерес следующая после ГП стадия эволюции, в которую переходят ранние В-звезды с массами $M = 4 - 20M_{\odot}$. Это стадия А-, F- и G-сверхгигантов и ярких гигантов. Как известно, при достижении определенной эффективной температуры ($T_{\text{eff}} < 5900$ К) в этих звездах начинается глубокое конвективное перемешивание (ГКП), в результате которого аномалии в атмосферных содержаниях С, N и О, появившиеся на стадии ГП, могут заметно усилиться. У тех AFG-сверхгигантов и гигантов, которые еще не достигли фазы ГКП, сохраняются аномалии С, N и О, приобретенные на ГП.

В работе [5] были проанализированы не-ЛТР содержания С и N, а также отношение C/N в атмосферах 36 галактических AFG-сверхгигантов и ярких гигантов. Сравнение с моделями вращающихся звезд показало, что эти звезды имели начальные скорости вращения V_0 от 0 до 300 км/с. Если трактовать эти звезды как пост-ГП объекты (т.е. до фазы ГКП), тогда наибольшим аномалиям С и N соответствуют скорости $V_0 = 200 - 300$ км/с. Таким образом, выводы настоящей работы полностью совпадают с выводами, полученными в [5] для более холодных звезд тех же масс, находящихся на

более поздней стадии эволюции.

8. **Заключение.** Основные результаты настоящей работы состоят в следующем.

1. Показано, что в случае ранних В-звезд ГП из трех отношений - N/C , C/O и N/O , рассматриваемых в качестве индикаторов звездной эволюции, с доверием следует относиться только к величине N/O , так как она оказалась нечувствительной к возможной сверхионизации ионов $N\ II$ и $O\ II$. Величины N/C и C/O , куда входит углерод, напротив, для звезд с эффективными температурами $T_{\text{эф}} > 18500\text{ K}$ могут содержать систематические ошибки из-за неучтенной сверхионизации ионов $C\ II$.

2. Для 46 ранних В-звезд ГП в области эффективных температур $T_{\text{эф}}$ от 15360 до 30700 K и с массами M от 5.4 до $18.8 M_{\odot}$ определена величина $[N/O]$, отношение N/O , нормированное к исходному значению (в логарифмической шкале). Проанализирована зависимость величины $[N/O]$ от таких параметров как эффективная температура $T_{\text{эф}}$, относительный возраст $t/t_{\text{м}}$, наблюдаемая скорость вращения $V \sin i$ и масса звезды M .

3. Для большинства рассмотренных звезд получено $[N/O] \approx 0$ с разбросом $\pm 0.2\text{ dex}$, причем этот результат никак не зависит от параметров $T_{\text{эф}}$, $t/t_{\text{м}}$, $V \sin i$ и M . Иначе говоря, эти звезды не показали значимых изменений отношения N/O в течение стадии ГП. Только 8 звезд из 46, т.е. 17%, показали значения $[N/O]$ существенно выше уровня возможной ошибки (от 0.34 до 0.77).

4. Выполнено сравнение с расчетами [7] моделей вращающихся звезд. Сделан вывод, что большое число звезд с $[N/O] \approx 0$ объясняется двумя причинами: с одной стороны, согласно расчетам [7], при начальной скорости вращения $V_0 < 100\text{ км/с}$ отношение N/O к концу стадии ГП меняется мало ($[N/O] < 0.2$); с другой стороны, большинство ранних В-звезд ГП действительно имеет малые начальные скорости вращения V_0 .

5. Ранние В-звезды ГП с повышенными значениями $[N/O] = 0.4 - 0.8$ находят объяснение в моделях с начальными скоростями вращения $V_0 = 200 - 300\text{ км/с}$. Такие же оценки V_0 от 0 до 200 - 300 км/с получены в работе [5], где выполнен анализ содержаний C , N и отношения C/N для звезд тех же масс на следующей стадии эволюции, стадии А-, F- и G-сверхгигантов и ярких гигантов.

THE N/O RATIO IN THE EARLY B-TYPE MAIN SEQUENCE STARS AS A TRACER OF THEIR EVOLUTION

L.S. LYUBIMKOV

It is shown that in a case of early B-type stars on the main sequence (MS) stage, from three ratios - N/C, C/O and N/O considered as tracers of stellar evolution, the N/O value is more reliable, because it seems to be insensitive to the overionization of N II and O II ions. In contrast, the N/C and C/O ratios included carbon for stars with effective temperatures $T_{\text{eff}} > 18500$ K can contain systematic errors due to the ignored overionization of C II ions. The N/O ratio is studied in atmospheres of 46 early B-type MS stars. The obtained N/O values are considered as a function of the effective temperature, age, rotational velocity and mass of the stars. It is shown that for majority of early B-type MS stars the ratio $[N/O] \approx 0$ is typical, that is evidence of a little change of the N/O value during the MS stage, and this result does not depend on the fundamental parameters mentioned above. The large number of stars with $[N/O] \approx 0$ is explained by two reasons: on the one hand, according to predictions of the theory, for the initial rotational velocity $V_0 < 100$ km/s the N/O value changes little by the MS end ($[N/O] < 0.2$); on the other hand, according to observations, most of early B-type MS stars has really the little initial rotational velocities V_0 . Few early B-type MS stars, for which the enhanced values $[N/O] = 0.4 - 0.8$ are found, correspond to models with the rotational velocities $V_0 = 200 - 300$ km/s. This conclusion agrees with results obtained earlier for stars of the same masses on a later stage of evolution, the stage of AFG-supergiants and bright giants.

Key words: *early B stars; stellar atmospheres; chemical composition; stellar evolution*

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.С.Любимков, Письма в Астрон. ж., **1**, 29, 1975, (Pis'ma v Astron. Zhurnal, **1**, 29, 1975).
2. Л.С.Любимков, Астрофизика, **29**, 479, 1988, (Astrophysics, **29**, 704, 1988).
3. Л.С.Любимков, Астрофизика, **20**, 475, 1984, (Astrophysics, **20**, 255, 1984).
4. A.Maeder, Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars. Springer, Berlin, 2009.

5. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, S.A.Korotin et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **446**, 3447, 2015.
6. *A.Maeder, N.Przybilla, M.-F.Nieva et al.*, Astron. Astrophys., **565**, A39, 2014.
7. *C.Georgy, S.Ekstrom, A.Granada et al.*, Astron. Astrophys., **553**, A24, 2013.
8. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, T.M.Rachkovskaya et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **316**, 19, 2000.
9. *L.S.Lyubimkov, T.M.Rachkovskaya, S.I.Rostopchin et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **333**, 9, 2002.
10. *L.S.Lyubimkov, S.I.Rostopchin, D.L.Lambert*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **351**, 745, 2004.
11. *L.S.Lyubimkov, S.I.Rostopchin, T.M.Rachkovskaya et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **358**, 193, 2005.
12. *Л.С.Любимков, Д.Л.Ламберт, С.И.Ростопчин и др.*, Изв. Крымской Астрофиз. Обс., **104**, 187, 2008, (Izvestija Krym. Astrofiz. Obs., **104**, 187, 2008).
13. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, D.B.Poklad et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **428**, 3497, 2013.
14. *Л.С.Любимков*, Астрофизика, **56**, 517, 2013, (Astrophysics, **56**, 472, 2013).
15. *M.Asplund, N.Grevesse, A.J.Sauval et al.*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **47**, 481, 2009.
16. *E.Caffau, H.-G.Ludwig, M.Steffen et al.*, Solar. Phys., **268**, 255, 2011.
17. *S.Simyn-Diaz, A.Herrero*, Astron. Astrophys., **562**, A135, 2014.
18. *G.A.Bragança, S.Daflon, K.Cunha et al.*, Astron. J., **144**, 130, 2012.
19. *H.A.Abt, H.Levato, M.Grosso*, Astrophys. J., **573**, 359, 2002.