

УДК 524.31

Содержание С, N и O в атмосферах 57 В-звезд

Л.С. Любимков¹, Д.Л. Ламберт², С.И. Ростопчин¹, Т.М. Рачковская¹, Д.Б. Поклад¹

¹НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

²The University of Texas at Austin

Десять лет Крымская астрофизическая обсерватория (КрАО) сотрудничает с университетом Техаса и принадлежащей ему обсерваторией Мак Дональд (McDO) в области исследования молодых звезд класса В на стадии главной последовательности (ГП). Основной целью исследования является поиск изменений в наблюдаемом содержании легких элементов, участвующих в CNO-цикле. К такому изменению может приводить перемешивание на стадии ГП между недрами звезд и их поверхностными слоями. Постоянными участниками проекта со стороны КрАО являются Л.С. Любимков, Т.М. Рачковская, С.И. Ростопчин и Д.Б. Поклад, а с американской стороны – Д.Л. Ламберт, профессор Техасского университета, с 2003 г. – директор обсерватории Мак Дональд.

Прежде всего, нами были получены спектры высокого разрешения для более чем 100 В-звезд ГП на двух обсерваториях – КрАО (телескоп 2.6 м) и McDO (телескоп 2.7 м). Были определены фундаментальные параметры звезд и исследовано содержание элементов CNO-цикла в их атмосферах, включая He, C, N и O, а также содержание Mg как индикатора металличности звезд. Результаты содержатся в четырех больших статьях в журнале *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* (Любимков и др., 2000, 2002, 2004, 2005). Данный доклад является кратким изложением предварительных результатов по содержаниям C, N и O.

Для анализа содержаний C, N и O из нашего списка были отобраны 57 В-звезд, подавляющее большинство которых имеет невысокие скорости вращения ($v \sin i < 100$ км/с). Причина – линии CII, NII и OII, по которым проводится анализ, достаточно слабы и, следовательно, трудноизмеримы для звезд с высокими скоростями $v \sin i$. He-IITP анализ линий CII, NII и OII был выполнен с помощью двух независимых программ: MULTI (модифицирована С.А. Коротыным) и DETAIL & SURFACE. Обе программы используются в текущих исследованиях В-звезд. Расхождение между программами в найденных содержаниях

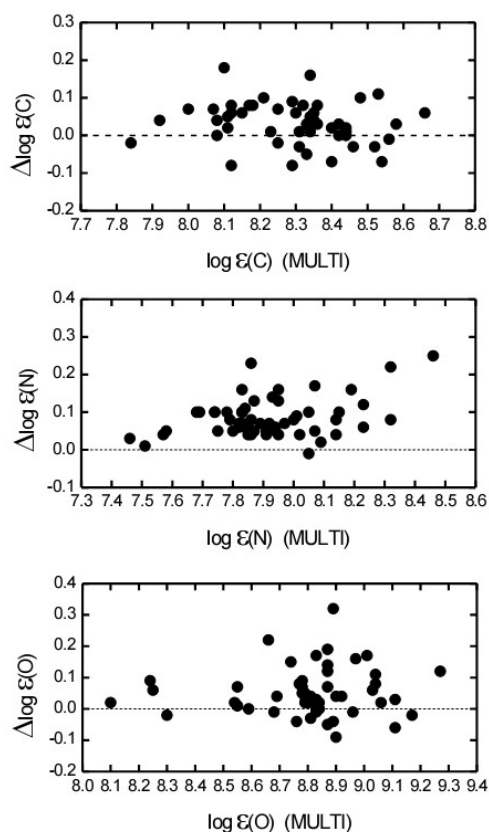


Рис. 1. Различия в содержаниях C, N и O, найденных с помощью двух компьютерных программ: DETAIL & SURFACE и MULTI

Обе программы используются в текущих исследованиях В-звезд. Расхождение между программами в найденных содержаниях

С, N и O оказалось небольшим (рис. 1); в среднем получено $\Delta \log \varepsilon(\text{C}) = 0.03$; $\Delta \log \varepsilon(\text{N}) = 0.09$; $\Delta \log \varepsilon(\text{O}) = 0.05$.

По линиям NH и OH определен параметр микротурбулентности V_t ; мы подтвердили, что отказ от условия ЛТР (локальное термодинамическое равновесие) приводит к значительному уменьшению V_t . Показано, что параметр V_t мал для сравнительно маломассивных звезд групп А и В (их массы $M = 4.1\text{--}11.2 M_\odot$); для таких звезд типичны значения $V_t = 0\text{--}3$ км/с. Только для относительно массивных проэволюционировавших гигантов группы В этот параметр может быть выше, достигая 9–10 км/с (рис. 2). Для группы С, включающей наиболее массивные В-звезды ($M = 12.4\text{--}18.8 M_\odot$), величина V_t показывает корреляцию с относительным возрастом t/t_{MS} , повышаясь от 5 до 16–17 км/с, см. рис. 3 (здесь t – возраст, а t_{MS} – время жизни звезды данной массы на ГП). Эти результаты для параметра V_t очень похожи на те, что были получены ранее для групп А, В и С по линиям HeI (Любимков и др., 2004).

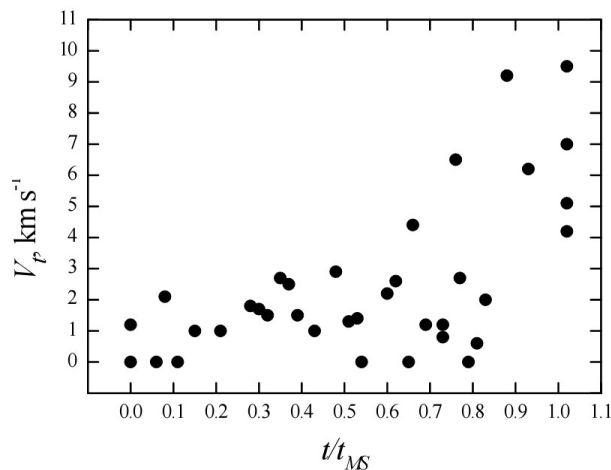


Рис. 2. Параметр микротурбулентности V_t для звезд групп А и В ($M = 4.1\text{--}11.2 M_\odot$) как функция относительного возраста t/t_{MS}

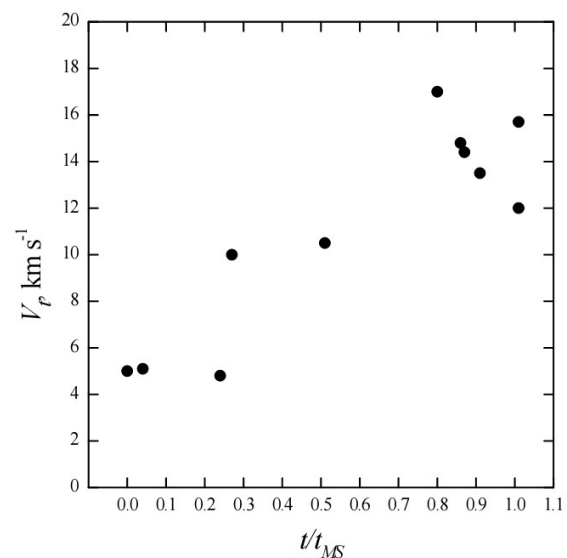


Рис. 3. Параметр микротурбулентности V_t для звезд группы С, содержащей наиболее массивные звезды ($M = 12.4\text{--}18.8 M_\odot$) как функция относительного возраста t/t_{MS}

Среди трех рассмотренных элементов (С, N и O) только содержание азота $\log \varepsilon(\text{N})$ показало явную зависимость от относительного возраста t/t_{MS} (рис. 4). В течение стадии ГП содержание $\log \varepsilon(\text{N})$ повышается в среднем на 0.22 dex (66 %) для групп А и В и на 0.65 dex (в 4.5 раза) для группы С. Кроме того, существует корреляция между содержанием азота $\log \varepsilon(\text{N})$ и содержанием гелия He/H , наиболее ярко выраженная для массивных В-звезд группы С (рис. 5). Среднее значение $\log \varepsilon(\text{N}) = 7.82 \pm 0.09$ для непроэволюционировавших звезд групп А и В с $t/t_{MS} \leq 0.35$, как и положение максимума, $\log \varepsilon(\text{N}) = 7.82$, в распределении звезд по $\log \varepsilon(\text{N})$ близко к солнечному содержанию азота $\log \varepsilon_\odot(\text{N}) = 7.78 \pm 0.06$ (Асплунд, и др., 2005). Мы заключаем, что начальное содержание N для В-звезд в окрестности Солнца практически совпадает с солнечным. Сравнение с теоретическими эволюционными моделями вращающихся звезд показывает, что наблюдаемое обогащение азотом поверхности массивных В-звезд (группа С) можно объяснить перемешиванием между недрами и внешними слоями звезд при скорости

вращения на экваторе $v \approx 300$ км/с (ранее по гелию для звезд группы С было получено $v \approx 300\text{--}400$ км/с).

Содержание кислорода $\log \varepsilon(\text{O})$ не показало зависимости от относительного возраста t/t_{MS} как для звезд групп А и В, так и звезд группы С. Этот результат согласуется с предсказанием теории, что ожидаемое уменьшение $\log \varepsilon(\text{O})$ при скорости вращения $v \approx 300$ км/с составляет только 0.10–0.15 dex, то есть оно меньше ошибки определения $\log \varepsilon(\text{O})$. Мы столкнулись с проблемой избытка кислорода, а именно: его начальное содержание в В-звездах оказалось на 0.2 dex выше, чем солнечное содержание. Как видно из рис. 6, не обнаружено заметной корреляции между $\log \varepsilon(\text{O})$ и температурой T_{eff} и массой M для звезд с массами $M \leq 10 M_{\odot}$, однако включение звезд группы С приводит к появлению заметного тренда с T_{eff} и M .

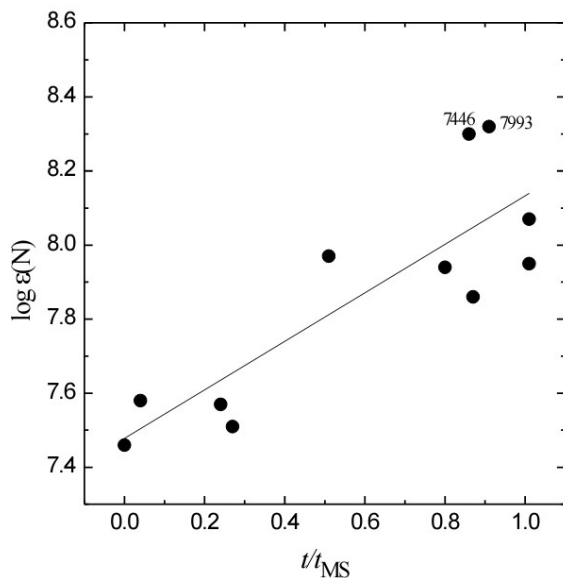


Рис. 4. Содержание азота как функция относительного возраста t/t_{MS} для звезд группы С ($M = 12.4\text{--}18.8 M_{\odot}$). Прямая линия проведена методом наименьших квадратов. Она показывает, что для этих массивных В-звезд содержание азота к концу стадии ГП повышается на 0.65 dex (в 4.5 раза)

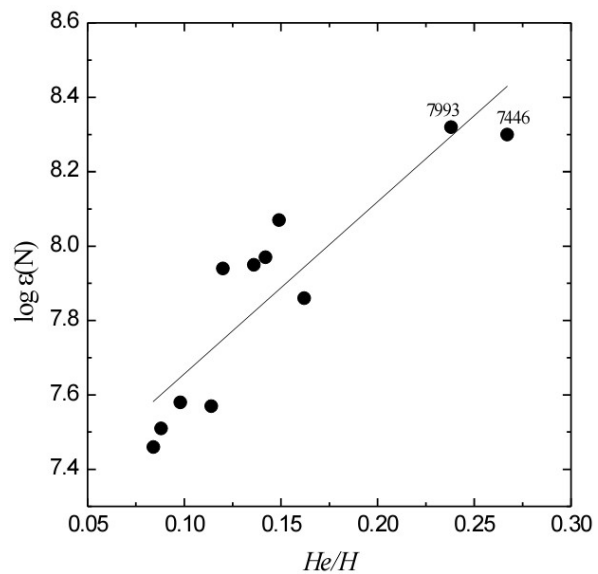


Рис. 5. Корреляция между содержаниями гелия и азота для звезд группы С. Прямая линия проведена методом наименьших квадратов

Для В-звезд с массами $M < 8 M_{\odot}$ среднее содержание углерода $\log \varepsilon(\text{C}) = 8.42 \pm 0.11$ практически совпадает с солнечным содержанием $\log \varepsilon_{\odot}(\text{C}) = 8.39 \pm 0.05$ (Асплунд и др., 2005). Однако для более массивных звезд значения $\log \varepsilon(\text{C})$ значительно понижаются с ростом T_{eff} и M (рис. 7). Не найдено зависимости $\log \varepsilon(\text{C})$ от t/t_{MS} ни для групп А и В, ни для группы С.

Таким образом, содержание С и O в атмосферах звезд группы С, то есть самых массивных и горячих В-звезд, оказалось значительно пониженным как по отношению к менее массивным В-звездам (рис. 6 и 7), так и по отношению к Солнцу. Мы показали, что невозможно устранить этот дефицит С и O за счет изменения температуры T_{eff} . Действительно, увеличение $\log \varepsilon(\text{C})$ требует большого повышения T_{eff} (до 5000 К), в то время как увеличение $\log \varepsilon(\text{O})$, напротив, требует понижения T_{eff} на 2000 К и более. Мы предлагаем для решения этой проблемы альтернативную гипотезу, а именно: возможную сверхионизацию атомов СII, NII и OII в атмосферах ранних В-звезд.

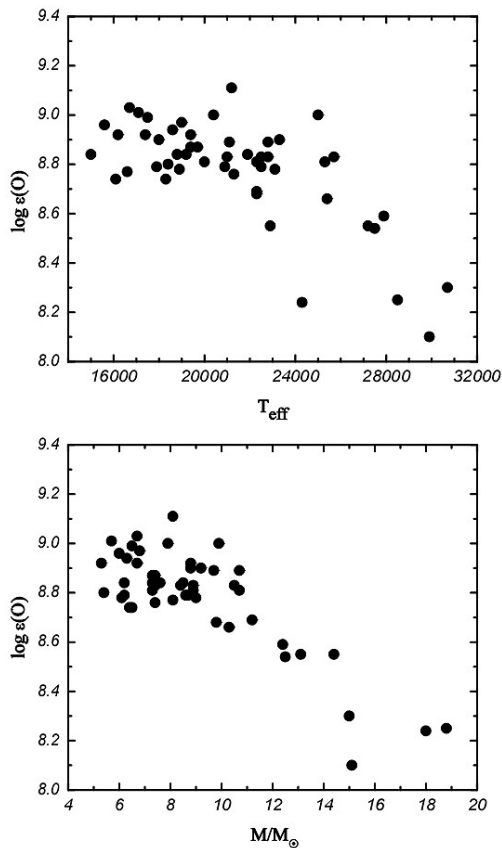


Рис. 6. Содержание кислорода как функция эффективной температуры (верхняя панель) и массы звезд (нижняя панель)

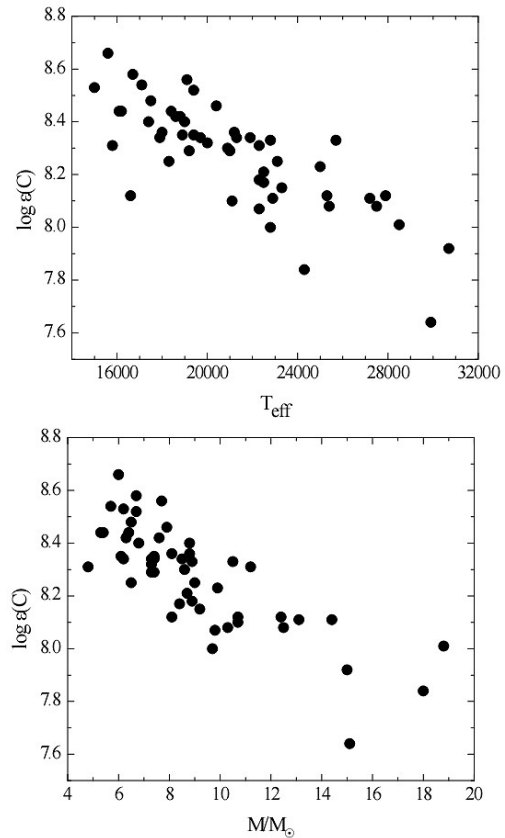


Рис. 7. Содержание углерода как функция эффективной температуры (верхняя панель) и массы звезд (нижняя панель)

В заключение следует отметить, что в настоящее время сотрудничество между КраО и Техасским университетом вышло на новый этап. Мы начали исследование А-, F- и G-сверхгигантов, которые, как известно, являются следующей эволюционной стадией ранних В-звезд ГП. На McDO получены спектры высокого разрешения для 90 сверхгигантов, и начато определение фундаментальных параметров этих звезд и их химического состава.

Работа частично поддержана грантом CDRF UKP1–2809–CR–06.

Литература

- Асплунд М. и др. (Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J.) // “Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, in honor of David L. Lambert.” / Eds. T.G. Barnes and F.N. Bash. ASP Conf. Ser. 2005. V. 336. P. 11.
- Любимков Л.С. и др. (Lyubimkov L.S., Lambert D.L., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I., Tarasov A.E., Poklad D.B., Larionov V.M., Larionova L.V.) // MNRAS. 2000. V. 316. P. 19. (Paper I).
- Любимков Л.С. и др. (Lyubimkov L.S., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I., Lambert D.L.) // MNRAS. 2002. V. 333. P. 9. (Paper II).

Любимков Л.С. и др. (Lyubimkov L.S., Rostopchin S.I., Lambert D.L.) // MNRAS. 2004. V. 351. P. 745. (Paper III).

Любимков Л.С. и др. (Lyubimkov L.S., Rostopchin S.I., Rachkovskaya T.M., Poklad D.B., Lambert D.L.) // MNRAS. 2005. V. 358. P. 193. (Paper IV).