

УДК 524.3

## Наблюдаемые проявления эволюционных изменений химического состава звезд

*Л.С. Любимков*

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

Поступила в редакцию 14 декабря 2005

**Аннотация.** Уже с 1940-х годов, т.е. с первых лет существования КрАО, в обсерватории начались исследования химического состава звезд. В 1970-х годах, следуя мировой тенденции, мы перешли в таких исследованиях от метода кривых роста к более точной методике, основанной на применении моделей звездных атмосфер. Исследовался химический состав звезд спектральных классов от В до К включая химически пекулярные звезды и двойные системы. К тому времени была разработана в общих чертах современная теория эволюции звезд, что позволило интерпретировать получаемые результаты с эволюционной точки зрения. Наиболее детально изучались в КрАО эволюционные изменения химического состава у ранних звезд класса В, т.е. звезд с эффективными температурами  $T_{eff}$  между 15000 и 30000 К и с массами  $M$  между 4 и 20  $M_{\odot}$ . В ядрах таких звезд на стадии главной последовательности (ГП) идут термоядерные реакции CNO-цикла, и продукты этих реакций, как было показано нами, появляются в звездных атмосферах. Это свидетельствовало о том, что на стадии ГП существует перемешивание между недрами звезд и их поверхностными слоями.

Согласно современным теоретическим моделям, причиной перемешивания на ГП может быть вращение звезд. Чтобы иметь надежную основу для сравнения с теорией, нами были проанализированы спектры высокого разрешения более 100 ранних В-звезд, полученные на двух обсерваториях – КрАО и Мак Дональд (США). Основное внимание уделялось элементам CNO-цикла, то есть He, C, N и O. Анализ линий гелия привел к выводу, что содержание гелия  $He/H$  в атмосферах звезд увеличивается с относительным возрастом  $t/t_{MS}$ , где  $t$  – возраст и  $t_{MS}$  – время жизни звезды данной массы на ГП. При этом наблюдаемое повышение  $He/H$  в течение стадии ГП, как и предсказывает теория, сильно зависит от массы звезды и от ее скорости вращения. Сравнение с данными других авторов, полученными для более массивных звезд класса O, показало, что и O-звезды и ранние В-звезды в течение первой половины жизни на ГП, то есть при  $0.0 \leq t/t_{MS} < 0.5$ , показывают низкое (исходное) содержание гелия  $He/H \approx 0.10$ , в то время как у звезд с  $0.6 \leq t/t_{MS} \leq 1.0$  преобладает повышенное содержание вплоть до значений  $He/H = 0.2 - 0.3$ . Ранее очень похожая зависимость  $He/H$  от  $t/t_{MS}$  была получена для В-звезд, входящих в тесные двойные системы. Среди элементов C, N и O особенно заметный эволюционный эффект найден для азота. Как и в случае гелия, этот эффект ярче всего выражен у наиболее массивных В-звезд ( $M = 12 - 19 M_{\odot}$ ). Если содержание He в их атмосферах в конце стадии ГП может оказаться повышенным в 2-3 раза, то содержание N – в 6 раз относительно исходного значения. Согласно теоретическим моделям, такое повышение содержания He и N к концу фазы ГП дос-

тигается при скоростях вращения 300 – 400 км/с. Отмечено, что в КрАО начато исследование звезд тех же масс  $M = 4 - 20 M_{\odot}$  на следующей стадии эволюции, когда ранние В-звезды ГП становятся сверхгигантами классов А, F и G.

**Ключевые слова:** В-звезды, сверхгиганты, химический состав, эволюция

---

## 1 Введение

В настоящее время наблюдаемое содержание химических элементов в звездах рассматривается как ключ к проверке теории звездной эволюции и к теории происхождения элементов. Химический состав звезд – традиционная область исследований в КрАО. Еще в 1940-х годах академик Г.А. Шайн, исследуя отношение изотопов углерода  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  в звездных атмосферах, обнаружил, что в углеродных звездах оно сильно понижено, а именно:  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 2 - 25$ , а не 90, как на Земле, на Солнце и в метеоритах (см., например, Шайн, 1948; Шайн и Газе, 1957). За это открытие в 1950 г. он получил Государственную премию. Позже данный факт был подтвержден другими авторами. В те годы еще не существовало современной теории эволюции звезд, и эволюционный статус углеродных звезд был совершенно неясен. Сейчас мы знаем, что такие звезды находятся на достаточно продвинутой стадии эволюции и пониженное отношение  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  объясняется выносом из недр звезды в атмосферу продуктов термоядерного синтеза (см., например, Любимков, 1995).

В 1950-1960-х годах содержание химических элементов в звездных атмосферах изучали в КрАО А.А. Боярчук, И.М. Копылов и другие сотрудники. Применялся общепринятый в те годы метод кривых роста. Хотя, с современной точки зрения, он был довольно грубым вследствие заложенных в него упрощающих предположений, тем не менее, полученные на его основе данные позволили прийти к важному выводу, что наряду со звездами с нормальным (солнечным) химическим составом в Галактике наблюдаются звезды с резкими химическими аномалиями. В частности, Боярчук (1959) обнаружил сильный избыток гелия у главного компонента тесной двойной звезды Бета Лиры; этот результат, впоследствии подтвержденный другими авторами, был одним из первых экспериментальных доказательств горения водорода и синтеза гелия в ядрах звезд. Тем не менее, количественная интерпретация подобных аномалий была в те годы затруднена из-за отсутствия реалистических эволюционных моделей звезд.

В конце 1960-х и в 1970-х годах в исследованиях химического состава звезд во всем мире происходил переход к новой методике, основанной на применении моделей звездных атмосфер. Такой переход был обусловлен наступлением в астрофизике “эры компьютеров”. Перешли к этой методике и мы в КрАО. Новый метод применялся в КрАО в исследовании звезд следующих типов: 1) В-звезды главной последовательности (ГП); 2) химически пекулярные звезды типов HgMn, Ap, Am и  $\delta$  Sct; 3) сверхгиганты классов В, А и F; 4) гиганты и карлики классов G и K; 5) компоненты двойных систем. Результаты, полученные к началу 1990-х годов, были рассмотрены в нашем обзоре (Любимков, 1994). Необходимо отметить также более поздние работы по содержанию лития в химически пекулярных звездах (Полосухина, наст. том).

Метод моделей атмосфер, примененный к спектрам высокого качества, позволял исследовать тонкие эффекты, связанные с эволюцией звезд. Важно, что к тому времени была разработана в общих чертах современная теория звездной эволюции, на основании которой можно было делать предсказания о возможных изменениях в химическом составе звезд и сравнивать их с наблюдаемыми содержаниями элементов. В частности, обнаруженный нами избыток натрия в атмосферах сверхгигантов класса F позволил эмпирически подтвердить, что в ядрах достаточно массивных звезд в фазе ГП параллельно с горением водорода и синтезом гелия в CNO-цикле, происходит синтез натрия в NeNa-цикле (Боярчук и Любимков, 1983; Любимков, 1995).

## 2 Проблема перемешивания на стадии главной последовательности

Уже первое исследование содержания гелия  $He/H$  в О-звездах и ранних В-звездах, выполненное нами около 30 лет назад, позволило обнаружить увеличение  $He/H$  с возрастом звезд (Любимков, 1975). Позже аналогичный эффект был найден и для азота (Любимков, 1984). Это было первым указанием на то, что в таких звездах на стадии ГП происходит перемешивание между недрами звезды, где идут реакции CNO-цикла, и ее наружными слоями. Благодаря перемешиванию в атмосферах звезд появляются продукты термоядерного синтеза. Напомним, что стадия ГП – это начальная и самая продолжительная стадия эволюции звезды, когда в ее ядре горит водород.

Для теории звездной эволюции такие изменения в химическом составе атмосфер звезд на стадии ГП явились полной неожиданностью, так как в те годы считалось, что никакого перемешивания на ГП быть не может. Однако со временем теоретики изменили свою точку зрения, и сейчас они вводят перемешивание в расчеты эволюционных моделей массивных звезд; при этом, источником перемешивания считается вращение (Хегер и Лангер, 2000; Мене и Медер, 2000). Расчеты продемонстрировали сильную зависимость содержаний гелия и азота в конце фазы ГП от массы звезды и ее скорости вращения. Тем не менее, в количественном отношении результаты теоретиков весьма неоднозначны (в смысле предсказанных изменений в содержаниях элементов CNO-цикла в звездных атмосферах).

Необходимо отметить, что если вначале проблема перемешивания в звездах ГП казалась хотя и интересной, но все-таки частной проблемой, то теперь она приобрела фундаментальное значение. Расчеты показали, что перемешивание в фазе ГП влияет на все последующие стадии эволюции, включая и заключительную фазу – взрыв сверхновой II типа, а значит, на выброс элементов в окружающую межзвездную среду. Следовательно, этот эффект, в конечном итоге, влияет на химическую эволюцию Галактики в целом.

Накопленные к середине 1990-х гг. эмпирические данные показали, что перемешивание в О- и В-звездах зависит от массы  $M$ , однако при этом не было найдено корреляции со скоростью вращения (Любимков, 1996, 1998а). Чтобы иметь надежную наблюдательную базу для проверки теории, нами была поставлена задача – резко повысить объем и точность исследования эволюционных изменений в химическом составе молодых ранних В-звезд ГП. Напомним, что ранние звезды класса В – это звезды с эффективными температурами  $T_{eff}$  между 15000 и 30000 К и с массами  $M$  между 4 и 20 масс Солнца. Еще раз подчеркнем, что основной интерес для нас представляют элементы CNO-цикла, то есть He, C, N и O.

## 3 Наш подход к решению проблемы

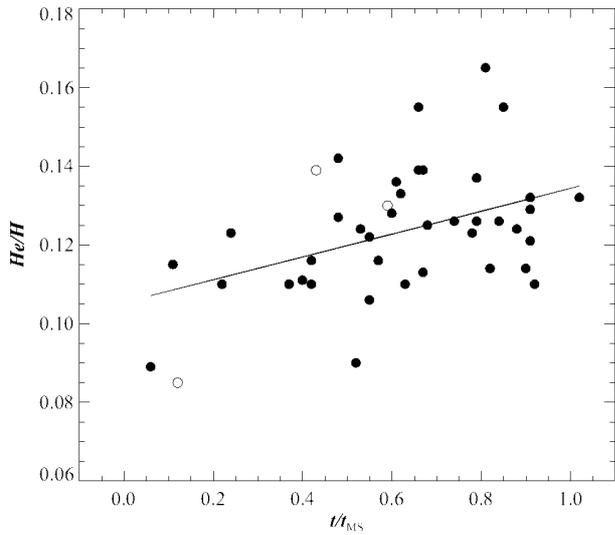
Основные отличия нашей работы от предыдущих работ по определению содержаний элементов CNO-цикла в В-звездах ГП заключаются в следующем:

- резко увеличено число исследованных звезд;
- значительно повышена точность анализа.

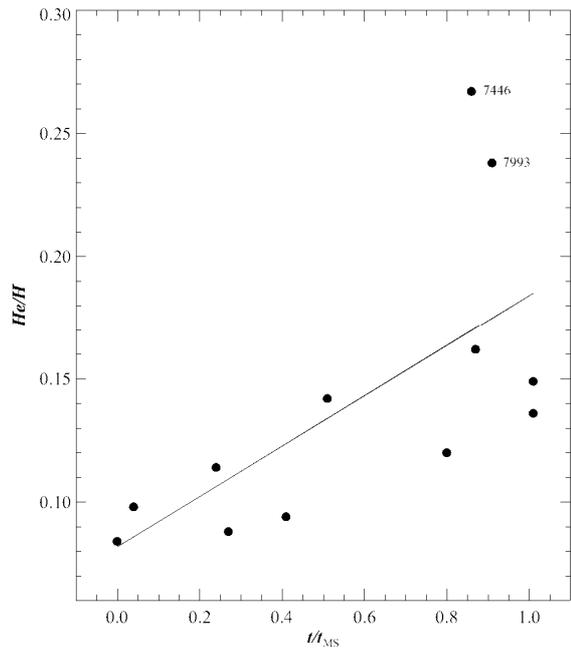
Постоянными участниками этого международного проекта являются:

- от КРАО – Л.С.Любимков, Т.М.Рачковская, С.И.Ростопчин и Д.Б. Поклад;
- от Техасского университета (the University of Texas at Austin, USA) – профессор Д.Л. Ламберт.

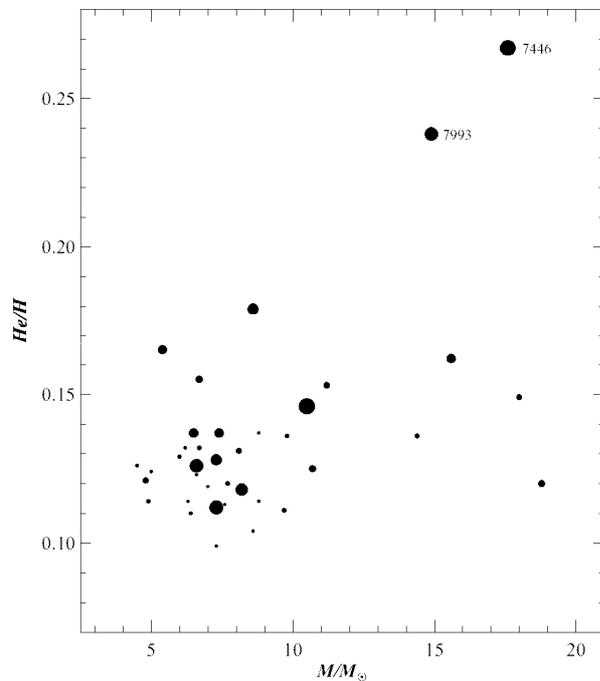
Спектральные наблюдения с высоким разрешением 123 В-звезд были проведены в 1996-1998 гг. на двух обсерваториях – КРАО и Мак Дональд (США), телескопы 2.6 и 2.7 м соответственно. По полученным спектрам были тщательно измерены эквивалентные ширины линий



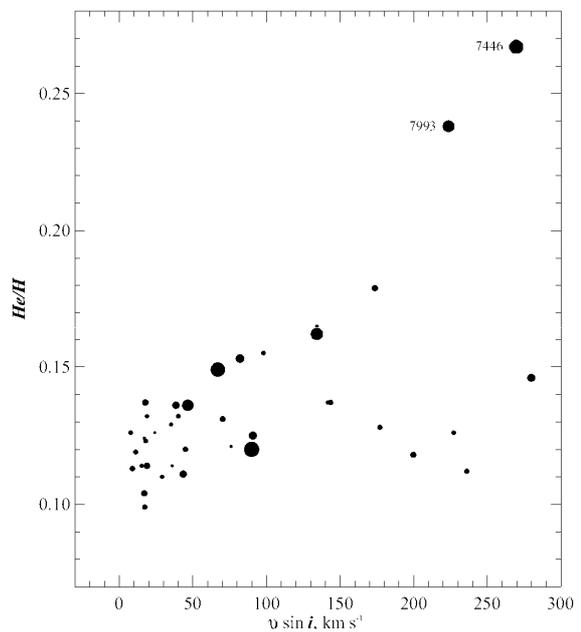
**Рис. 1.** Зависимость содержания гелия от относительного возраста в группе В-звезд с относительно небольшими массами ( $M = 4-7 M_{\odot}$ ). Прямая линия проведена методом наименьших квадратов (Любимков и др., 2004)



**Рис. 2.** Зависимость содержания гелия от относительного возраста в группе наиболее массивных В-звезд ( $M = 12-19 M_{\odot}$ ). Прямая линия проведена методом наименьших квадратов (Любимков и др., 2004)



**Рис. 3.** Содержание гелия как функция массы у В-звезд в конце стадии ГП ( $t/t_{MS} = 0.7-1.0$ ). Размер кружков пропорционален наблюдаемой скорости вращения  $v \sin i$ . Наблюдается большой разброс в  $He/H$  для массивных В-звезд, связанный, по-видимому, с различиями в скоростях вращения (Любимков и др., 2004)



**Рис. 4.** Содержание гелия как функция наблюдаемой скорости вращения у В-звезд в конце стадии ГП ( $t/t_{MS} = 0.7-1.0$ ). Размер кружков пропорционален массе  $M$ . Наблюдается большой разброс в  $He/H$  для В-звезд с большими скоростями  $v \sin i$ , связанный, по-видимому, с различиями в массах  $M$  (Любимков и др., 2004)

HI, HeI, CII, NII и OII. Определены фундаментальные параметры звезд, такие как эффективная температура  $T_{eff}$ , ускорение силы тяжести  $\log g$ , масса  $M$ , возраст  $t$  и др. Найдено и проанализировано содержание гелия в их атмосферах. Выполнены высокоточные определения скорости вращения звезд по профилям шести линий HeI. Определено и проанализировано содержание магния, подтверждающее, что средняя металличность программных звезд совпадает с солнечной. Результаты этой обширной работы опубликованы в четырех статьях (Любимков и др., 2000, 2002, 2004, 2005). Готовится пятая статья об эволюционных изменениях в содержаниях C, N и O.

#### 4 Содержание гелия

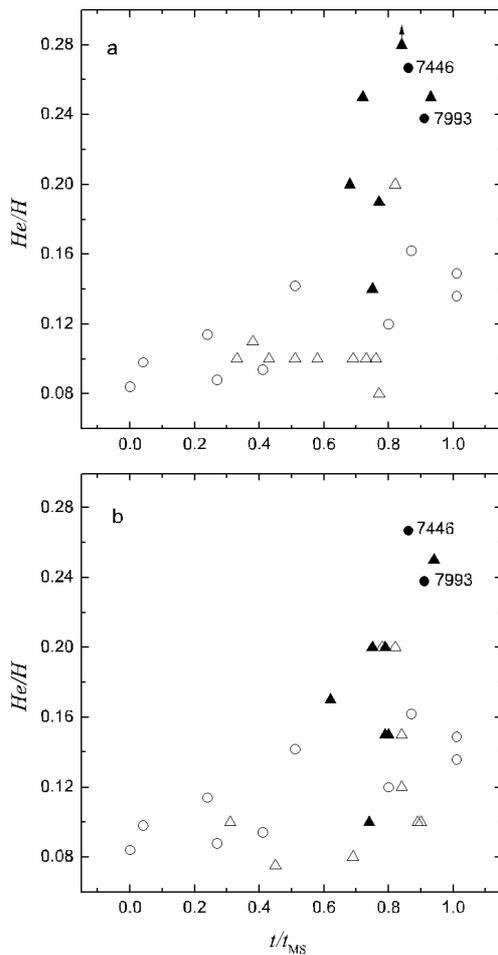
Обсудим некоторые из наших результатов более подробно. Благодаря большому числу исследованных В-звезд мы смогли разделить их по массам  $M$  на три группы. На рис. 1 представлена зависимость содержания гелия  $He/H$  от относительного возраста  $t/t_{MS}$  для группы наименее массивных звезд, у которых массы  $M$  варьируются между 4 и 7  $M_{\odot}$ ; здесь  $t_{MS}$  – время жизни звезды данной массы на ГП (Любимков и др., 2004). Видно, что величина  $He/H$  демонстрирует тенденцию повышаться с возрастом. В этом случае повышение  $He/H$  сравнительно невелико: как показывает прямая на рис. 1, проведенная методом наименьших квадратов, в среднем за время жизни на ГП содержание гелия  $He/H$  возрастает на 28%. Разброс точек около прямой обусловлен ошибками измерения эквивалентных ширин линий HeI и, в меньшей степени, неточностями в параметрах  $T_{eff}$  и  $\log g$ .

На рис. 2 представлена зависимость  $He/H$  от  $t/t_{MS}$  для группы самых массивных В-звезд с массами примерно от 12 до 19  $M_{\odot}$ . Здесь повышение  $He/H$  в течение стадии ГП гораздо больше, в среднем более чем в 2.2 раза. При этом наблюдается значительный разброс в  $He/H$  вблизи конца стадии ГП. Особенно высокое содержание гелия ( $He/H = 0.27$  и  $0.24$ ) показали два гиганта, HR 7446 и 7993. Вероятная причина больших значений  $He/H$  связана с их особенно высокими скоростями вращения (см. ниже).

Согласно предсказаниям теории, изменения в атмосферном содержании гелия к концу стадии ГП могут сильно зависеть от массы  $M$  и скорости вращения звезды. На рис. 3 представлена зависимость  $He/H$  от массы  $M$  для звезд с относительным возрастом  $t/t_{MS}$  от 0.7 до 1.0, то есть вблизи завершения стадии ГП. Размер кружков пропорционален величине  $v \sin i$ , проекции скорости вращения на луч зрения. Видим, что для массивных звезд с  $M > 12 M_{\odot}$  наблюдается большой разброс значений  $He/H$ , связанный с различием в  $v \sin i$ .

На рис. 4 показана зависимость  $He/H$  от наблюдаемой скорости вращения  $v \sin i$ . Размер кружков пропорционален массе  $M$ . Виден большой разброс значений  $He/H$  при скоростях  $v \sin i > 150$  км/с; он объясняется различием в массах звезд. Особенно высокое содержание гелия  $He/H$  на рис. 3 и 4 показали гиганты HR 7446 и 7993. Эти две звезды вблизи конца стадии ГП имеют достаточно большие массы  $M$  и одновременно высокие скорости вращения. Напротив, звезды с малыми значениями  $M$  и  $v \sin i$  показывают незначительное повышение  $He/H$  в конце ГП. Таким образом, имеется качественное согласие с теорией. Если же говорить о количественных оценках, сравнение с расчетами Хегера и Лангера (2000) показало, что найденное нами обогащение атмосфер В-звезд гелием в течение фазы ГП можно объяснить вращением с экваториальной скоростью  $v \approx 250 - 400$  км/с (Любимков и др., 2004).

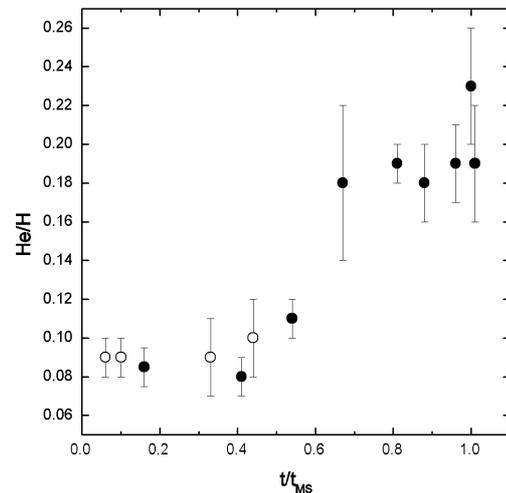
На рис. 5 мы сравниваем наши значения  $He/H$  для группы наиболее массивных В-звезд ( $M = 12 - 19 M_{\odot}$ ) с результатами, полученными другими авторами для поздних О-звезд ГП; массы последних заключены между 20 и 40  $M_{\odot}$ . В случае О-звезд использованы данные двух работ, а именно: а) Херреро и др. (1992); б) Реполуст и др. (2004). На рис. 5а,б обращает на себя внимание следующая интересная особенность: как О-звезды (треугольники), так и В-звезды (кружки) в течение первой половины жизни на ГП, то есть при  $0.0 \leq t/t_{MS} < 0.5$ , показывают низкое содержание гелия, близкое к исходному значению  $He/H = 0.10$ . С другой стороны,



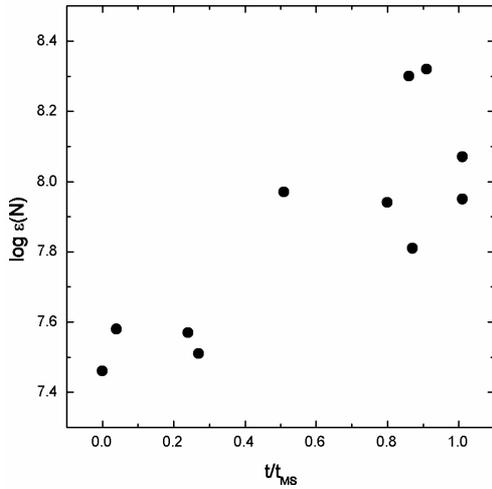
**Рис. 5.** Зависимость содержания гелия от относительного возраста в группе наиболее массивных В-звезд ( $M = 12-19 M_{\odot}$ ) в сравнении с опубликованными данными для поздних О-звезд ( $M = 20-40 M_{\odot}$ ). Кружки – В-звезды, треугольники – О-звезды. Заполненные символы –  $v \sin i = 200-400$  км/с; незаполненные символы –  $v \sin i = 20-140$  км/с (Любимков и др., 2004).

у проэволюционировавших звезд с  $0.6 \leq t/t_{MS} \leq 1.0$  наблюдается большой разброс в содержании гелия с явным преобладанием повышенных значений  $He/H$ . Особенно высокое содержание, вплоть до значений  $He/H = 0.2 - 0.3$ , показывают звезды с быстрым вращением ( $v \sin i = 200 - 400$  км/с, заполненные значки).

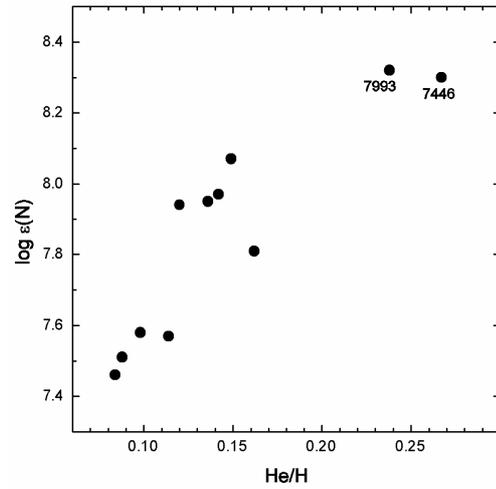
Очень похожая зависимость  $He/H$  от  $t/t_{MS}$  была получена нами ранее для В-звезд, входящих в тесные двойные системы (Любимков, 1996; Любимков и др., 1998). На рис. 6 приведена такая зависимость для компонентов исследованных нами пяти двойных В-звезд (заполненные кружки). Кроме того, здесь представлены также значения  $He/H$  для компонентов двух двойных О-звезд, взятые из работ Штурм и Симон (1994) и Симон и др. (1994) (открытые кружки). Как и на рис. 5, при  $t/t_{MS} < 0.5$  у этих звезд сохраняется низкое (исходное) содержание гелия. С другой стороны, при  $t/t_{MS} > 0.6$  все компоненты двойных систем показывают повышенное содержание гелия. Современные теоретические модели массивных звезд с перемешиванием предсказывают монотонное повышение величины  $He/H$  в атмосферах с возрастом, то есть найденное нами сохранение исходного значения  $He/H$  в течение первой половины жизни на ГП и дальнейший быстрый подъем  $He/H$  теория пока объяснить не может.



**Рис. 6.** Зависимость содержания гелия от относительного возраста для компонентов тесных двойных В- и О-звезд. Заполненные кружки – ранние В-звезды (Любимков и др., 1998); незаполненные кружки – поздние О-звезды (данные из литературы). Вблизи  $t/t_{MS} \approx 0.6$  наблюдается скачок, не предсказанный теорией.



**Рис. 7.** Зависимость содержания азота от относительного возраста в группе наиболее массивных В-звезд ( $M = 12-19 M_{\odot}$ ).



**Рис. 8.** Корреляция между содержаниями гелия и азота в группе наиболее массивных В-звезд ( $M = 12-19 M_{\odot}$ ).

## 5 Содержание азота

Среди элементов С, N и О, согласно нашему исследованию, особенно сильный эволюционный эффект показывает содержание азота. Как и в случае гелия, этот эффект ярче всего выражен в группе наиболее массивных В-звезд ( $M = 12 - 19 M_{\odot}$ ). На рис. 7 представлена зависимость содержания азота  $\log \epsilon(N)$  для звезд этой группы от относительного возраста  $t/t_{MS}$  (здесь содержание элемента дано в обычной логарифмической шкале, где для водорода принято  $\log \epsilon(H)=12.00$ ). Видим, что за время жизни на ГП содержание N увеличивается в несколько раз. На основании рис. 7 можно предположить, что азот, как и гелий, сохраняет свое исходное содержание в атмосферах таких массивных звезд при  $t/t_{MS} < 0.5$ , и лишь при  $t/t_{MS} > 0.6$  происходит быстрый подъем величины  $\log \epsilon(N)$ . Сравнение с модельными расчетами Хегера и Лангера (2000) показывает, что наблюдаемое увеличение содержания N можно объяснить вращением с экваториальной скоростью  $v \approx 300$  км/с, что хорошо согласуется с оценкой  $v = 300 - 400$  км/с, полученной для звезд данной группы по гелию (см. Любимков и др., 2004).

На рис. 8 представлена зависимость между содержаниями гелия и азота для той же группы массивных В-звезд. В полном соответствии с теорией, имеет место сильная корреляция, то есть обогащение атмосфер гелием и азотом происходит одновременно. Наибольший эволюционный эффект не только по гелию, но и по азоту обнаружен у двух упомянутых выше гигантов с быстрым вращением, HR 7446 и 7993.

В целом наши результаты для ранних В-звезд ГП достаточно хорошо согласуются с изменениями химического состава звездных атмосфер, рассчитанными для стадии ГП в работе Хегера и Лангера (2000). Подтверждается сильная зависимость таких изменений от массы и скорости вращения звезд. Звезды с массой  $M \approx 5 M_{\odot}$  не показывают значительных изменений в содержаниях He и N независимо от скорости вращения, в то время как звезды с  $M > 10 M_{\odot}$  демонстрируют сильную зависимость от этой скорости. Как показывает пример гигантов HR 7446 и 7993, у массивных В-звезд в конце стадии ГП содержание He может быть повышено в 2 – 3 раза, а содержание N – в 6 раз относительно исходных значений.

## 6 Заключение

Полученные в КрАО результаты о содержании гелия и азота в атмосферах ранних В-звезд ГП с массами  $M = 4 - 20 M_{\odot}$  служат эмпирическим доказательством существования перемешивания на стадии ГП. Сопоставляя эти наблюдательные данные с модельными расчетами, мы приходим к выводу, что наиболее существенные избытки гелия (до 2-3 раз) и азота (до 6 раз), найденные для наиболее массивных В-звезд, достигаются при скоростях вращения 300 – 400 км/с. Благодаря высокой точности определения содержаний He и N и скоростей вращения  $v \sin i$  впервые подтверждена эмпирически связь между обогащением атмосфер звезд продуктами CNO-цикла и вращением. Показано, что обогащение атмосфер ранних В-звезд, а также О-звезд гелием начинается лишь во второй половине их жизни на ГП; этот феномен теория пока объяснить не может.

В КрАО начата работа по другому большому международному проекту, а именно: исследование звезд тех же масс ( $M = 4 - 20 M_{\odot}$ ) на следующей стадии эволюции, стадии сверхгигантов классов А, F и G. Согласно теории, на этой стадии происходит глубокое перемешивание, приводящее к изменению содержаний таких легких элементов как He, C, N, O и Na в атмосферах сверхгигантов. Однако эти изменения существенно зависят от того, было ли до этого перемешивание на стадии ГП. Имеющиеся в литературе данные подтверждают, что наблюдаемые аномалии в содержаниях C, N и Na у F- и G-сверхгигантов значительно превышают те, которые можно ожидать из теоретических моделей, рассчитанных без учета перемешивания на ГП (Любимков, 1998b).

Чтобы иметь надежную основу для сравнения с предсказаниями теории, мы, как и в случае В-звезд, поставили здесь две задачи:

- резко увеличить число исследуемых объектов;
- значительно повысить точность анализа.

Всего в нашем списке содержится 90 сверхгигантов. Спектры подавляющего большинства этих звезд уже получены на обсерватории Мак Дональд Техасского университета.

Автор признателен Д.Б. Покладу за помощь в оформлении статьи.

## Литература

- Боярчук А.А. // Астрон. журн. 1959. Т. 36. С. 766.  
 Боярчук А.А., Любимков Л.С. // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. 1983. Т. 66. С. 130.  
 Любимков Л.С. // Письма в Астрон. журн. 1975. Т. 1. №11. С. 29.  
 Любимков Л.С. // Астрофизика. 1984. Т. 20. С. 475.  
 Любимков Л.С. // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. 1994. Т. 91. С. 24.  
 Любимков Л.С. // “Химический состав звезд: метод и результаты анализа”. Одесса. Астропринт. 1995.  
 Любимков (Lyubimkov L.S.) // Astrophys. and Space Sci. 1996. V. 243. P. 329.  
 Любимков Л.С. // Астрон. журн. 1998a. Т. 75. С. 61.  
 Любимков (Lyubimkov L.S.) // “Modern Problems of Stellar Evolution” / Ed. D.S.Wiebe. Moscow. Geos. 1998b. P. 231.  
 Любимков Л.С., Рачковская Т.М., Ростопчин С.И., Тарасов А.Е. // Астрон. журн. 1998. Т. 75. С. 355.  
 Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Lambert D.L., Rachkovskaya T.M. et al.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2000. V. 316. P. 19.  
 Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Rachkovskaya T.M., Rostopchin S.I., Lambert D.L.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2002. V. 333. P. 9.  
 Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Rostopchin S.I., Lambert D.L.) // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2004. V. 351. P. 745.

- Любимков и др. (Lyubimkov L.S., Rostopchin S.I., Rachkovskaya T.M., Poklad D.B., Lambert D.L.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2005. V. 358. P. 193.
- Мейне и Медер (Meynet G., Maeder A.) // *Astron. and Astrophys.* 2000. V. 361. P. 101.
- Реполуст и др. (Repolust T., Puls J., Herrero A.) // *Astron. and Astrophys.* 2004. V. 415. P. 349.
- Симон и др. (Simon K.P., Sturm E., Fiedler A.) // *Astron. and Astrophys.* 1994. V. 292. P. 507.
- Хегер и Лангер (Heger A., Langer N.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 544. P. 1016.
- Херреро и др. (Herrero A., Kudritzki R.P., Vilches J.M. et al.) // *Astron. and Astrophys.* 1992. V. 261. P. 209.
- Шайн Г.А. // *Вестник АН СССР.* 1948. Т. 8. С. 97.
- Шайн Г., Газе В. // “Ядерные процессы в звездах”. Ред. А.Г. Масевич. Москва. ИИЛ. 1957. С. 305 (доклад на Льежском коллоквиуме по астрофизике 1953 г.).
- Штурм и Симон (Sturm E., Simon K.P.) // *Astron. and Astrophys.* 1994. V. 282. P. 93.