

ВОЗМОЖНАЯ СВЕРХИОНИЗАЦИЯ ИОНОВ С II, N II И O II В АТМОСФЕРАХ РАННИХ В- И ПОЗДНИХ O-ЗВЕЗД

Л.С.ЛЮБИМКОВ

Поступила 31 мая 2013

Принята к печати 14 августа 2013

Рассмотрена проблема достоверности содержаний С, N и O, определяемых по линиям С II, N II и O II для ранних В- и поздних O-звезд на эволюционной стадии ГП (Главная последовательность). Рассмотрение базируется на факте, имеющем для данной проблемы первостепенное значение, а именно: фотоионизация ионов С II, N II и O II в атмосферах таких звезд происходит под действием излучения в далекой УФ области спектра. Из наблюдений следует, что реальный поток в этой области у горячих звезд может быть значительно больше, чем теоретический; следовательно, в реальных атмосферах таких звезд имеет место сверхионизация С II, N II и O II по сравнению с расчетной ионизацией, полученной из стандартных моделей атмосфер. Недооценка ионизации в расчетах приводит к занижению определяемых содержаний С, N и O. Это подтверждается наблюдаемой зависимостью от эффективной температуры T_{eff} : с ростом T_{eff} в содержаниях С, N и O наблюдается тенденция к понижению. Показано, что сверхионизация становится заметной для достаточно горячих звезд, а именно: при $T_{\text{eff}} > 18500$ К в случае линий С II и при $T_{\text{eff}} > 26000$ К в случае линий N II и O II. Систематическая разница в содержаниях С, N и O между такими относительно горячими звездами и более холодными В-звездами ГП составляет около 0.2 dex. Относительно холодные В-звезды ГП ($T_{\text{eff}} < 18100$ К в случае С II и $T_{\text{eff}} < 25000$ К в случае N II и O II) показывают неискаженные содержания С, N и O; их средние значения очень хорошо согласуются с современными оценками для Солнца. Тем самым подтверждена солнечная металличность В- и O-звезд ГП в окрестности Солнца. Дано объяснение небольшого дефицита углерода, полученного для ранних В-звезд ГП в предыдущих работах. Отмечено, что при использовании альтернативной методики определения параметров T_{eff} и $\log g$, основанной на рассмотрении ионизационного баланса (например, He I-II, C II-III, Ne I-II, Si III-IV), проблема сверхионизации практически снимается; однако такая методика приводит к систематическому завышению значений T_{eff} и $\log g$. Решение проблемы сверхионизации может быть достигнуто путем перехода к более совершенным моделям атмосфер ранних В- и поздних O-звезд, учитывающих сферичность, а также, возможно, звездный ветер и магнитное поле.

Ключевые слова: *звезды: химический состав*

1. **Введение.** Звездные содержания трех легких химических элементов - углерода, азота и кислорода - уже не одно десятилетие вызывают повышенный интерес исследователей. Объясняется это тем, что элементы С, N и O (их атомные номера $Z=6, 7$ и 8) по своему обилию у большинства звезд, включая Солнце, уступают только водороду и гелию (близкое к С, N и O содержание показывает еще неон, $Z=10$). Поэтому от их содержания существенно зависит такой важный параметр как металличность звезд. Кроме того, названные элементы участвуют в CNO-цикле, который является основным

источником энергии у звезд с массами $M > 2M_{\odot}$ на первой и самой продолжительной стадии их эволюции - стадии Главной последовательности (ГП), когда в ядре звезды горит водород. Во время CNO-цикла содержания С, N и O внутри звезды сильно меняются. Через некоторое время в результате перемешивания, вызванного, например, быстрым вращением звезды на стадии ГП, изменение содержаний С, N и O может произойти и в поверхностных слоях. Как следует из теории эволюции звезд, фаза ГП после ее завершения у звезд с $M > 2M_{\odot}$ быстро сменяется фазой А- F- и G-сверхгигантов, во время которой происходит глубокое конвективное перемешивание, приводящее к дополнительному изменению поверхностных содержаний С, N и O. Поэтому анализ наблюдаемых содержаний С, N и O в звездных атмосферах имеет важное значение для проверки и уточнения теории звездной эволюции.

Линии углерода, азота и кислорода наблюдаются в спектрах звезд всех спектральных классов от O до M. В частности, в спектрах ранних В-звезд и поздних O-звезд видны линии ионов C II, N II и O II, по которым обычно и определяются содержания С, N и O. В 1990-х годах анализ этих линий для ранних В-звезд ГП в окрестности Солнца привел к выводу, что у этих звезд наблюдается небольшой ($-0.2 - 0.3$ dex) дефицит С, N и O относительно Солнца (см., например, [1-4]). Отметим, что в расчетах при этом учитывались отклонения от ЛТР (локальное термодинамическое равновесие). Такой вывод представлялся неожиданным с точки зрения теории звездной эволюции. Действительно, согласно расчетам CNO-цикла, дефицит С должен был бы сопровождаться избытком N, чего не наблюдалось.

В 2000-х годах ситуация изменилась, в основном благодаря тому, что были пересмотрены в сторону понижения солнечные содержания С, N и O. Это произошло вследствие применения более совершенной модели солнечной атмосферы - нестационарной гидродинамической 3D-модели, воспроизводящей солнечную грануляцию. Были пересмотрены содержания всех элементов, включая С, N и O (см. обзор Асплунда и др. [5]). Кроме того, была повышена точность определения содержаний С, N и O и для В-звезд ГП. Последние работы по таким звездам (например, [6] и [7]) показывают, что средние содержания азота и кислорода для В-звезд ГП теперь хорошо согласуются с современными оценками для Солнца. Однако небольшой дефицит углерода по-прежнему остается. Например, в работе [6] для 29 В-звезд ГП получено среднее содержание углерода $\log(\text{C}) = 8.33 \pm 0.04$, а в работе [7] для 22 В-звезд ГП - близкое значение $\log(\text{C}) = 8.31 \pm 0.13$. Это заметно ниже современных оценок для Солнца: $\log(\text{C}) = 8.43 \pm 0.05$ [5] и $\log(\text{C}) = 8.50 \pm 0.06$ [8], особенно если принять во внимание очень малые ошибки определения величины $\log(\text{C})$ в [6], [5] и [8]. Следует подчеркнуть, что в [6] и [7] рассматривались В-звезды ГП с достаточно медленным

вращением, в атмосферах которых, по-видимому, сохранилось исходное содержание C, N и O. Отметим, что содержание углерода и других элементов дается здесь в обычной логарифмической шкале, где для водорода принято $\log \epsilon(\text{H}) = 12.00$.

Важно отметить, что в данной работе обсуждаются наблюдаемые содержания C, N и O для довольно молодых В-звезд ГП в окрестности Солнца. Действительно, их возраст, как правило, не превышает 100 млн лет, что значительно меньше возраста Солнца 4.5 млрд лет. Расстояния до этих звезд, например, в работе [7] не превышают 600 пк. Возможно ли, чтобы начальное содержание металлов в таких молодых и близких звездах отличалось бы от содержания металлов на Солнце? (Напомним, что металлами в астрофизике принято называть все химические элементы тяжелее водорода и гелия; обычно "металличность" звезды, т.е. содержание металлов определяют по отношению к Солнцу).

В расчетах моделей химической эволюции Галактики традиционно предполагалось, что Солнце в течение всей своей жизни оставалось в той области Галактики, где оно сформировалось 4.5 млрд лет назад. Однако, благодаря расчетам некоторых авторов, в последние годы появилась альтернативная точка зрения, что Солнце при своем рождении находилось существенно ближе к центру Галактики, чем сейчас; в таком случае его химический состав может отличаться от состава молодых звезд в его сегодняшнем окружении (детали см., например, в [6]). Следует отметить, что, с одной стороны, расчеты миграции звезд в диске Галактики, включая Солнце, достаточно трудны и пока еще довольно неопределенны. С другой стороны, содержание многих металлов в близких молодых звездах показывает хорошее согласие с солнечным содержанием, что не подтверждает указанную альтернативную гипотезу. Например, такое согласие между близкими В-звездами ГП и Солнцем найдено для следующих элементов: N и O [6,7], Mg [9], Mg, Si и Fe [10]. В случае сверхгигантов классов А, F и G, являющихся прямыми потомками В-звезд ГП, согласие с Солнцем получено для таких индикаторов металличности как Fe [11], Cr и Ti [12].

Таким образом, имеющиеся эмпирические данные о химическом составе молодых близких звезд подтверждают идентичность металличности этих звезд и Солнца. Только небольшой, но устойчивый дефицит углерода в атмосферах В-звезд ГП как будто противоречит общей картине. Возникает предположение, что углерод, как и другие металлы, имеет в этих звездах нормальное (солнечное) содержание, а его наблюдаемый дефицит не соответствует действительности и порожден несовершенством используемой методики. Ниже мы попытаемся обосновать это предположение. Будет показано, что ряд фактов указывает на возможную сверхионизацию ионов C II, N II и O II в атмосферах ранних В-звезд ГП, а также более горячих O-звезд. При этом имеется в виду, что

степень ионизации в реальных атмосферах существенно выше, чем в расчетах, основанных на стандартных моделях атмосфер. Другими словами, имеет место неучтенная в расчетах сверхионизация С II, N II и O II, что может приводить к занижению определяемых содержаний С, N и O.

2. *Адекватность применяемых моделей атмосфер.* Расчеты спектральных линий С II, N II и O II, на которых основано определение содержаний С, N и O в ранних В-звездах и поздних O-звездах, в последние два десятилетия проводятся при отказе от предположения о ЛТР. В таких не-ЛТР расчетах линий С II, N II и O II применяются стандартные модели атмосфер, подобные моделям Куруца [13]; т.е. это плоскопараллельные ЛТР-модели в гидростатическом равновесии. Насколько они соответствуют наблюдаемым характеристикам O- и В-звезд?

Первым указанием на то, что стандартные модели атмосфер не вполне адекватны реальным атмосферам O- и ранних В-звезд, можно считать открытие у нормальных O- и В-звезд рентгеновского излучения. Рентгеновский поток (X-поток) у таких звезд был открыт и исследован с помощью спутников EINSTEIN, ROSAT и CHANDRA (см., например, работы [14-16]). Рентгеновская светимость L_x у таких звезд невелика: ее характерное отношение к болометрической светимости L_{bol} составляет $L_x/L_{bol} \sim 10^{-7}$. Тем не менее, сам факт присутствия рентгеновского излучения невозможно объяснить на основе стандартных моделей атмосфер. Для его объяснения пришлось привлекать либо очень горячую корону с температурой $T \geq 10^6$ К, либо сильный звездный ветер. Таким образом, стандартные модели атмосфер O- и В-звезд неспособны предсказать наблюдаемый рентгеновский поток. Возникает предположение, что тот же процесс, который приводит к перегреву внешних слоев атмосфер горячих звезд и к возникновению рентгеновского излучения (например, ударные волны в звездном ветре [16]), может значительно усилить жесткое излучение в далекой ультрафиолетовой (УФ) области спектра; последнее, как показано ниже, играет важную роль в расчетах линий С II, N II и O II.

Интенсивность линий С II, N II и O II в спектрах горячих звезд классов O и В зависит от концентрации ионов С II, N II и O II в их атмосферах. Корректный не-ЛТР анализ этих линий определяется, в частности, корректным рассмотрением процессов ионизации названных ионов. При решении не-ЛТР задачи приходится учитывать два ионизационных процесса: ионизацию под действием столкновений и ионизацию под действием излучения или фотоионизацию. Как оказалось, для линий С II, N II и O II в случае O- и ранних В-звезд первостепенное значение имеет фотоионизация за счет излучения в далекой УФ области спектра.

В табл.1 приведены потенциалы ионизации E_{ion} ионов С II, N II и O II, а также, для сравнения, атомов H I и He I. Здесь же указаны пределы ионизации, то есть длины волн λ_0 в ангстремах, соответствующие

Таблица 1

ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ ДЛИНЫ ВОЛН ДЛЯ ПЯТИ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Атом или ион	$E_{\text{ион}}, \text{эВ}$	$\lambda_0, \text{А}$
H I	13.595	912.0
He I	24.587	504.3
C II	24.383	508.5
N II	29.601	418.9
O II	35.117	353.1

ионизации из основного состояния. Из табл.1 видно, что фотоионизация ионов C II, N II и O II определяется излучением в лаймановском континууме H I, что соответствует длинам волн $\lambda < 912\text{А}$, а для ионов N II и O II - также излучением в континууме He I, т.е. в области $\lambda < 504\text{А}$. До последнего времени в расчетах фотоионизации ионов C II, N II и O II использовались теоретические УФ потоки, полученные из стандартных моделей атмосфер. Возникает вопрос, насколько такие потоки соответствуют наблюдаемому излучению в далекой УФ области для горячих O- и B-звезд.

К сожалению, наблюдения звезд в области лаймановского континуума ($\lambda < 912\text{А}$) существенно затруднены из-за сильного поглощения межзвездным водородом. Тем не менее, с помощью спутника EUVE, запущенного на орбиту в 1992г., удалось получить распределение потока в области $\lambda < 912\text{А}$ для двух ранних B-звезд - ϵ СМа (B2 II) и β СМа (B1 II-III) [17]. Эти звезды оказались расположенными в достаточно прозрачной области пространства, где число поглощающих атомов межзвездного водорода было сравнительно невелико, что облегчало детектирование УФ потока. Для одной из этих звезд, ϵ СМа, удалось измерить также УФ поток в континууме He I ($\lambda < 504\text{А}$) [18]. Сравнение с теоретическим распределением УФ потока, вычисленным по моделям Куруца [13], показало, что наблюдаемый поток больше теоретического на два порядка при $\lambda < 504\text{А}$ и в несколько раз при $\lambda < 912\text{А}$ (см., например, рис.12 в [19] и рис.2 в [20]). Отсюда следовал вывод, что стандартные модели атмосфер, подобные моделям [13], не могут объяснить не только присутствие рентгеновского излучения у O- и ранних B-звезд, но и наблюдаемый поток в далекой УФ области.

Как показали Ауфденберг и др. [20,21], сферические не-ЛТР модели атмосфер B-звезд гораздо лучше объясняют наблюдаемое распределение УФ потока для звезды ϵ СМа, чем стандартные плоско-параллельные модели. При этом отклонения от ЛТР играют второстепенную роль, основной же вклад дает переход от плоской геометрии к сферической протяженной атмосфере. Позже в работе [22] было получено более удовлетворительное согласие с наблюдениями ϵ СМа; однако при этом, если уровень рассчитанного

УФ потока стал в среднем лучше соответствовать наблюдениям, то распределение потока по длине волны в расчетах и наблюдениях существенно различалось. Более того, как отмечено в [22], наблюдаемые интенсивности спектральных линий в рассматриваемой УФ области оказались слишком сильными по сравнению с расчетами.

Таким образом, современные модели атмосфер ранних В-звезд пока еще не могут адекватно описать наблюдаемый поток излучения в далекой УФ области спектра. Из сказанного выше видно, что применение сферических моделей атмосфер для О- и ранних В-звезд оказалось бы предпочтительней при рассмотрении фотоионизации ионов С II, N II и O II. Однако все работы по определению содержаний С, N и O в В- и О-звездах по-прежнему основаны на применении стандартных плоско-параллельных моделей атмосфер. Последние оказываются неадекватными при моделировании потока в далекой УФ области, что может приводить к занижению ионизации С II, N II и O II и, как следствие, к занижению определяемых содержаний С, N и O.

3. *Наблюдаемые содержания С, N и O: зависимость от T_{eff} .* К чему может приводить недооценка эффекта фотоионизации? В качестве примера можно указать работу [23], где этот эффект был рассмотрен для линий Fe I в спектрах F-сверхгигантов. Было показано, что реальная фотоионизация атомов Fe I, происходящая под действием УФ излучения (здесь $\lambda_0 = 1575 \text{ \AA}$) существенно выше, чем следует из стандартных моделей атмосфер при предположении ЛТР. Если такая сверхионизация Fe I учитывается в не-ЛТР расчетах, это приводит к повышению определяемого содержания Fe и к приведению его в соответствие с содержанием, полученным по линиям ионов Fe II. Очень похожая ситуация имеет место для более горячих звезд классов О и В при анализе линий С II, N II и O II. Как отмечено выше, наблюдения некоторых ранних В-звезд в далекой УФ области позволяют предположить, что в не-ЛТР расчетах линий С II, N II и O II для таких звезд принятый УФ поток занижен и, следовательно, определяемое содержание С, N и O тоже занижено. Так как УФ поток тем больше, чем выше эффективная температура T_{eff} , можно ожидать, что недооценка фотоионизации ионов С II, N II и O II проявляется заметнее для звезд с более высокими температурами T_{eff} , т.е. имеется зависимость от T_{eff} .

Рассмотрим наблюдательные данные из некоторых работ, подтверждающие такое предположение. Как отмечалось выше, в группе элементов С, N и O наибольший интерес вызывает дефицит углерода. На рис.1 по данным работы [7] представлена зависимость содержания углерода $\log \epsilon(\text{C})$ от T_{eff} для 22 В-звезд. Из рис.1 видно, что имеется тренд $\log \epsilon(\text{C})$ с ростом T_{eff} , а именно: относительно холодные звезды с эффективной температурой $T_{\text{eff}} < 18100 \text{ K}$ показывают в среднем более высокое содержание С, чем звезды с $T_{\text{eff}} > 18500 \text{ K}$. При этом содержание С для звезд с $T_{\text{eff}} = 15300 -$

18100 К практически совпадает с солнечным содержанием, в то время как для звезд с $T_{\text{эф}} = 18500 - 24100$ К оно систематически понижено. Это видно из табл.2, где сравниваются средние содержания C для относительно

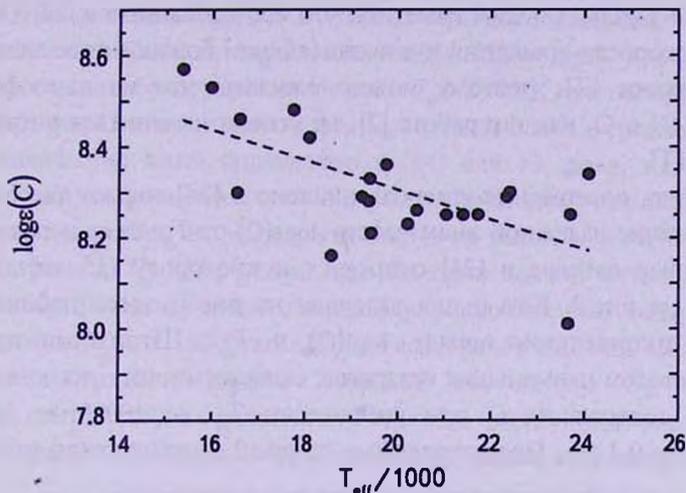


Рис.1. Содержание углерода как функция $T_{\text{эф}}$ для 22 В-звезд из работы [7]. Штриховая прямая проведена методом наименьших квадратов.

холодных и горячих В-звезд из [7]. Для звезд с $T_{\text{эф}} < 18100$ К среднее содержание $\log \epsilon(C) = 8.46 \pm 0.09$ отлично согласуется с современными оценками для Солнца: $\log \epsilon(C) = 8.43 \pm 0.05$ [5] и $\log \epsilon(C) = 8.50 \pm 0.06$ [8]. С другой стороны, более горячие звезды с $T_{\text{эф}} > 18500$ К показывают систематический дефицит C относительно Солнца, составляющий в среднем около 0.2 dex.

В работе [7] были рассмотрены звезды в довольно ограниченном диапазоне эффективных температур $T_{\text{эф}}$ - от 15300 до 24100 К; как видно из рис.1, этого оказалось достаточно, чтобы обнаружить тренд в содержании углерода с $T_{\text{эф}}$. Для построения аналогичной зависимости от $T_{\text{эф}}$ для кислорода или азота столь ограниченный диапазон $T_{\text{эф}}$ не подходит, так как фотоионизация ионов O II и N II происходит под действием более жесткого УФ излучения (табл. 1) и, следовательно, требует более высоких

Таблица 2

СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ХОЛОДНЫХ И ГОРЯЧИХ В-ЗВЕЗД ПО ДАННЫМ РАБОТЫ [7]

Объекты	$\log \epsilon(C)$
6 В-звезд с $T_{\text{эф}} < 18100$ К	8.46 ± 0.09
16 В-звезд с $T_{\text{эф}} > 18500$ К	8.25 ± 0.08

температур для обнаружения возможного тренда. Данные Дафлон и др. [24] оказались более подходящими для такого анализа, так как они охватывают область $T_{\text{эф}}$ от 19000 до 34000 К, т.е. включают не только ранние В-звезды, но и поздние О-звезды. Следует отметить, что исследованные в [24] 15 звезд имеют малые скорости вращения и в подавляющем большинстве далеки от завершения стадии ГП; поэтому можно ожидать, что их атмосферные содержания С, N и O, как и в работе [7], не успели измениться в процессе эволюции на ГП.

К сожалению, содержание углерода найдено в [24] только для 6 звезд, поэтому построение надежной зависимости $\log \epsilon(\text{C})$ от $T_{\text{эф}}$ здесь невозможно. Наиболее полные данные в [24] относятся к кислороду (15 звезд); они представлены на рис.2. Как и для углерода на рис.1, здесь наблюдается очевидная антикорреляция между $\log \epsilon(\text{O})$ и $T_{\text{эф}}$. Штриховая прямая, проведенная методом наименьших квадратов, свидетельствует, что понижение наблюдаемого содержания O при увеличении $T_{\text{эф}}$ от 19000 до 34000 К составляет около 0.4 dex. Представленные на рис.2 звезды можно разделить

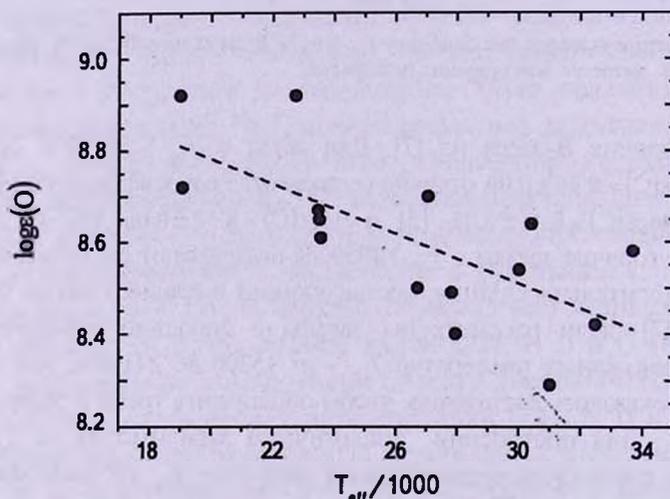


Рис.2. Содержание кислорода как функция $T_{\text{эф}}$ для 15 В- и О-звезд из работы [24]. Штриховая прямая проведена методом наименьших квадратов.

Таблица 3

СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ХОЛОДНЫХ И ГОРЯЧИХ В-ЗВЕЗД ПО ДАННЫМ РАБОТЫ [24]

Объекты	$\log \epsilon(\text{O})$
6 В-звезд с $T_{\text{эф}} < 25000$ К	8.75 ± 0.14
9 В-звезд с $T_{\text{эф}} > 26000$ К	8.51 ± 0.13

на две группы с относительно высоким и низким содержанием O; водораздел (divide) между ними расположен на $T_{\text{eff}} = 25000 - 26000$ К. Согласно табл.3, звезды с $T_{\text{eff}} < 25000$ К показывают хорошее согласие с солнечным содержанием; их среднее значение $\log \epsilon(\text{O}) = 8.75 \pm 0.14$ отлично согласуется с современными оценками для Солнца: $\log \epsilon(\text{O}) = 8.69 \pm 0.05$ [5] и $\log \epsilon(\text{O}) = 8.76 \pm 0.07$ [25]. С другой стороны, более горячие звезды с $T_{\text{eff}} > 26000$ К показывают систематический дефицит O относительно Солнца, составляющий в среднем около 0.2 dex.

Содержание азота определено в [24] для 13 звезд, т.е. для меньшего количества по сравнению с кислородом; кроме того, точность данных здесь немного ниже. Тем не менее, как видно из рис.3, и в этом случае наблюдается тренд с T_{eff} . Штриховая прямая, проведенная методом наименьших квадратов, показывает, что понижение наблюдаемого содержания N при увеличении T_{eff} от 19000 до 34000 К составляет 0.22 dex. Согласно табл. 4, среднее содержание $\log \epsilon(\text{N}) = 7.80 \pm 0.16$ для звезд с $T_{\text{eff}} < 25000$ К очень хорошо соответствует современным оценкам для Солнца: $\log \epsilon(\text{N}) = 7.83 \pm 0.05$ [5] и $\log \epsilon(\text{N}) = 7.86 \pm 0.12$ [26]. С другой стороны, для звезд с $T_{\text{eff}} > 26000$ К

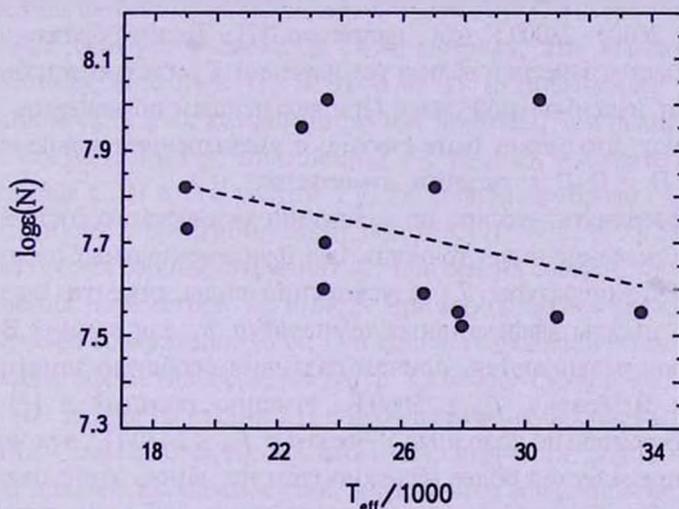


Рис.3. Содержание азота как функция T_{eff} для 13 В- и О-звезд из работы [24]. Штриховая прямая проведена методом наименьших квадратов.

Таблица 4

СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ХОЛОДНЫХ И ГОРЯЧИХ В-ЗВЕЗД ПО ДАННЫМ РАБОТЫ [24]

Объекты	$\log \epsilon(\text{N})$
6 В-звезд с $T_{\text{eff}} < 25000$ К	7.80 ± 0.16
7 В-звезд с $T_{\text{eff}} > 26000$ К	7.65 ± 0.19

наблюдается дефицит N относительно Солнца около 0.2 dex.

Итак, анализ работ [7] и [24] показал, что содержания C, N и O для относительно холодных В-звезд ГП совпадают с солнечными содержаниями; имеются в виду звезды с температурами $T_{\text{эф}} < 18100$ К в случае С и $T_{\text{эф}} < 25000$ К в случае N и O. Более горячие звезды ($T_{\text{эф}} > 18500$ К для С и $T_{\text{эф}} > 26000$ К для N и O) показывают систематический дефицит C, N и O относительно Солнца, составляющий в среднем 0.2 dex (дефицит оказался примерно одинаковым для всех трех элементов). Такой дефицит может быть результатом недооценки степени ионизации в не-ЛТР расчетах линий С II, N II и O II для сравнительно горячих звезд вследствие занижения ионизирующего УФ потока. Другими словами, может иметь место неучтенная в расчетах сверхионизация ионов С II, N II и O II.

Из сказанного выше следует, что сверхионизация становится заметной в случае С II при $T_{\text{эф}} > 18500$ К, а в случае N II и O II - при $T_{\text{эф}} > 26000$ К. Интересно отметить, что, согласно не-ЛТР расчетам линий С II, максимум эквивалентных ширин этих линий достигается при $T_{\text{эф}} = 20000 - 22000$ К; для линий N II максимум достигается при $T_{\text{эф}} = 24000 - 26000$ К, а для линий O II - при $T_{\text{эф}} = 26000 - 28000$ К (см., например, [7]). Таким образом, сверхионизация становится заметной вблизи тех значений $T_{\text{эф}}$, где соответствующие линии достигают максимальной силы. При дальнейшем повышении $T_{\text{эф}}$ эти линии ослабевают, что может быть связано с уменьшением концентрации ионов С II, N II и O II в звездных атмосферах.

Следует подчеркнуть, что при исследовании химического состава звезд первостепенное значение имеет точность двух фундаментальных параметров - эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ и ускорения силы тяжести $\log g$. Как отмечено в [7], шкалы эффективных температур $T_{\text{эф}}$ для ранних В-звезд у разных авторов различаются, причем различия особенно заметны для самых горячих В-звезд с $T_{\text{эф}} \geq 25000$ К. Именно поэтому в [7] были рассмотрены относительно холодные В-звезды с $T_{\text{эф}} \leq 24100$ К, для которых параметр $T_{\text{эф}}$ определяется более надежно (тем не менее, этого оказалось достаточно, чтобы обнаружить для углерода тренд с $T_{\text{эф}}$ см. рис.1).

Для дальнейшего обсуждения необходимо напомнить вкратце методику определения параметров $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ в работах [7] и [24], использованных при построении рис.1-3. В частности, для определения $T_{\text{эф}}$ в [7] были применены два фотометрических индекса, свободных от влияния межзвездного поглощения, а именно: индекс Q в системе UBV и индекс $[c_v]$ в системе $uvby$. Для определения ускорения силы тяжести $\log g$ в [7] была применена усовершенствованная методика, основанная на использовании звездных параллаксов (описание этой методики см. в [27] и [11]). Наблюдаемые параллаксы были взяты из новой редукции данных спутника HIPPARCOS [28]. Это позволило достигнуть беспрецедентной точности в определении

параметра $\log g$ для достаточно близких звезд [11]. Что касается работы [24], откуда взяты данные для построения рис.2 и 3, то здесь определение $T_{\text{эф}}$ основывалось на применении индекса Q в системе UBV , а также некоторых фотометрических индексов в системе $uvby$; для оценки параметра $\log g$ применялся профиль бальмеровской линии $H\gamma$.

4. *Искусственное повышение ионизации за счет параметров $T_{\text{эф}}$ и $\log g$.* С проблемой зависимости содержания C, N и O у ранних В-звезд ГП от их эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ исследователям приходилось сталкиваться и раньше. Например, еще 20 лет назад Гис и Ламберт [2] обнаружили тренд в содержаниях C, N и O с ростом $T_{\text{эф}}$ (см. рис.11 в [2]). Важно отметить, что здесь для оценки $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ применялась методика, сходная с упомянутыми выше работами [7] и [24] (использовались фотометрические индексы и бальмеровские линии). Чтобы избавиться от указанного тренда, эти авторы ввели поправку в 3.4% в найденные значения $T_{\text{эф}}$. Очевидно, что такое повышение $T_{\text{эф}}$ привело к увеличению УФ потока в соответствующих моделях атмосфер для исследуемых звезд и, как следствие, к усилению фотоионизации ионов C II, N II и O II, особенно заметному для самых горячих В-звезд. В свою очередь, это вызвало ослабление рассчитанных линий C II, N II и O II и повышение определяемых содержаний C, N и O, которое было тем заметнее, чем выше $T_{\text{эф}}$. Благодаря такому искусственному повышению $T_{\text{эф}}$ удалось избавиться от тренда в содержаниях C, N и O с ростом $T_{\text{эф}}$; т.е. неявным образом была устранена необходимость в сверхионизации ионов C II, N II и O II.

В некоторых работах последних лет применена совершенно иная методика определения параметров $T_{\text{эф}}$ и $\log g$. Примером может служить работа [6], где получены содержания C, N, O и еще четырех элементов для 20 В-звезд в диапазоне эффективных температур $T_{\text{эф}}$ между 15000 и 34000 К. Отметим, что это все звезды на стадии ГП с небольшими наблюдаемыми скоростями вращения ($v \sin i \leq 30$ км/с). Казалось бы, широкий диапазон $T_{\text{эф}}$ хорошо подходит для поиска зависимостей, аналогичных зависимостям, приведенным на рис.1-3. Однако тренда в содержаниях C, N и O в [6] найдено не было.

Принципиальное отличие работы [6] от [7] и [24] состоит в методе определения $T_{\text{эф}}$ и $\log g$, который здесь базировался исключительно на рассмотрении ионизационного равновесия (фотометрические индексы не рассматривались). Примененный метод ионизационного баланса предполагает, что для каждой звезды подбирались такие значения $T_{\text{эф}}$ и $\log g$, для которых содержания некоторого элемента, найденные для двух соседних стадий ионизации, должны совпадать. Были использованы линии следующих элементов в двух стадиях ионизации: He I-II (при $T_{\text{эф}} > 26000$ К), C II-III, O I-II (при $T_{\text{эф}} < 24000$ К), Ne I-II (при $T_{\text{эф}} > 22000$ К), Si III-IV и Fe II-III (при $T_{\text{эф}} < 24000$ К). В частности, для относительно горячих звезд,

наряду с He I-II и C II-III рассматривались пары Ne I-II и Si III-IV. Как и в случае He I и C II (табл.1), фотоионизация Ne I и Si III происходит под действием излучения в далекой УФ области спектра, т.е. и здесь возможно проявление сверхионизации. Действительно, потенциал ионизации Ne I составляет 21.56 эВ, а Si III - 33.49 эВ, чему соответствуют пределы ионизации $\lambda_0 = 575$ и 370 \AA . Из сказанного следует, что в [6] уже в самом методе определения T_{eff} и $\log g$ была заложена компенсация эффекта сверхионизации.

В частности, для 18 из 20 звезд, исследованных в [6], содержание углерода определено по линиям C II и C III; только для двух самых холодных звезд с $T_{\text{eff}} = 15800$ и 17500 K использованы исключительно линии C II. Та же пара ионов C II - C III рассматривалась и при определении параметров T_{eff} и $\log g$ для этих звезд. Эти параметры подбирались так, чтобы среднее содержание C, найденное по линиям C II, совпадало с содержанием, найденным по линиям C III. Вследствие большой чувствительности ионизации C II к температуре T_{eff} , небольшое увеличение T_{eff} и связанное с ним изменение $\log g$ привело к тому, что эффект сверхионизации стал необнаружимым. Действительно, если построить зависимость содержания C от T_{eff} для всех 20 звезд из [6], тренд с T_{eff} как на рис.1, не обнаруживается.

Содержание азота в [6] показывает большой разброс - около 0.5 dex (оно найдено в [6] только по линиям N II). Возможно, часть звезд, рассмотренных в [6], успела повысить содержание N в атмосфере в процессе эволюции на ГП. При таком разбросе никакого видимого тренда в содержании N с температурой T_{eff} не найдено.

Содержание кислорода в [6], напротив, показывает небольшой тренд с T_{eff} (отметим, что для звезд с $T_{\text{eff}} > 26000 \text{ K}$ содержание O найдено только по линиям O II, а для более холодных звезд - по линиям O I и O II). Если провести методом наименьших квадратов прямую линию, как на рис.2, оказывается, что содержание O при повышении температуры T_{eff} от 15000 до 34000 K понижается на 0.1 dex. Это существенно меньше, чем на рис.2, т.е. можно предположить, что в случае O II, в отличие от C II, сверхионизация в [6] была компенсирована не полностью. Это вполне объяснимо, если принять во внимание, что ионы O II ионизируются гораздо более жестким УФ излучением, чем ионы C II (см. табл.1), поэтому подбор параметров T_{eff} и $\log g$ для пары C II - C III может и не дать одновременно столь же хорошего согласия для пары O II - O III. Другими словами, для полного устранения эффекта сверхионизации в случае O II - O III потребовалось бы более высокое значение T_{eff} чем в случае C II - C III.

Таким образом, результаты работы [6], в частности; отсутствие тренда с T_{eff} для C и небольшой "остаточный" тренд для O можно объяснить тем, что примененный в [6] метод определения T_{eff} и $\log g$ позволил избавиться

полностью (в случае С) или частично (в случае О) от эффекта сверхионизации.

Подобную методику определения параметров $T_{\text{эф}}$ и $\log g$, основанную на ионизационном балансе Si II-III-IV, использовали также Морел и др. [29], рассмотревшие 8 звезд в довольно узкой области $T_{\text{эф}} = 22500 - 27500$ К. Таким образом, подобно рассмотренной выше работе [6], примененный здесь метод оценки $T_{\text{эф}}$ и $\log g$, по-видимому, способствовал устранению тренда в содержаниях С, N и О. Кроме того, как число звезд, так и диапазон $T_{\text{эф}}$ здесь были явно недостаточны для поиска тренда с $T_{\text{эф}}$. Тот же метод определения $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ был использован и в работе [30], где исследовано 18 звезд в двух скоплениях (NGC 3293 и NGC 4755) в области $T_{\text{эф}}$ от 16000 до 23500 К. Сравнение с рис.1-3 показывает, что диапазон $T_{\text{эф}}$ был здесь слишком узким; кроме того, метод оценки $T_{\text{эф}}$ и $\log g$, как и в работах [6] и [30], способствовал устранению возможного тренда.

Возникает предположение, что метод ионизационного баланса, использованный для определения параметров $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ в [6], [29] и [30], приводит к систематическому завышению $T_{\text{эф}}$ и соответствующему изменению $\log g$ по сравнению с традиционной методикой, применявшейся ранее. Чтобы проверить это предположение, можно сравнить значения $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ из работы [6] с результатами определения $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ по методу Напивоцки [31], основанному на использовании фотометрических индексов в системе $uvby-\beta$. Напомним, что индекс β характеризует поглощение в бальмеровской линии H β ; следовательно, метод [31] можно отнести к традиционным методам определения $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ у В-звезд. Следует отметить, что в работе [7] получено очень хорошее согласие в значениях $T_{\text{эф}}$ найденных для В-звезд с температурами $T_{\text{эф}}$ от 15300 до 24100 К по индексам Q , $[c]$ и параллаксам, с одной стороны, и с помощью метода [31] - с другой.

Расчеты по программе [31] для 20 звезд, рассмотренных в [6], выполнил С.И.Ростопчин (частное сообщение). Сравнение полученных результатов с данными [6] показало, что разности $\Delta T_{\text{эф}}$ и $\Delta \log g$ в значениях $T_{\text{эф}}$ и $\log g$, найденных двумя методами, демонстрируют систематическое различие между относительно горячими В-звездами с температурами $T_{\text{эф}} \geq 24000$ К и более холодными В-звездами с $T_{\text{эф}} < 24000$ К, т.е. наблюдается тренд в значениях $\Delta T_{\text{эф}}$ и $\Delta \log g$ с ростом $T_{\text{эф}}$. Интересно, что метод ионизационного баланса, примененный в [6], приводит к систематическому завышению не только эффективной температуры $T_{\text{эф}}$, но и ускорения силы тяжести $\log g$ для горячих В-звезд с $T_{\text{эф}} \geq 24000$ К. Величина $T_{\text{эф}}$ для таких звезд может быть завышена в [6] до 2300 К, а величина $\log g$ - до 0.5 dex. Следствием завышения обеих величин - как $T_{\text{эф}}$ так и $\log g$ - для горячих В-звезд должно быть завышение ионизации в расчетах С II, N II и O II и, в конечном итоге, увеличение определяемых содержаний С, N и О.

Возникает очевидное противоречие. С одной стороны, если используется

традиционная методика определения параметров $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ для ранних В- и поздних О-звезд, основанная на фотометрии и бальмеровских линиях, не-ЛТР расчеты линий С II, N II и О II дают такие содержания С, N и О, которые показывают тренд с ростом $T_{\text{эф}}$. Для устранения последнего приходится вводить сверхионизацию. С другой стороны, если метод определения $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ основан исключительно на рассмотрении ионизационного баланса, указанный тренд исчезает и сверхионизация не нужна, но при этом значения $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ для горячих звезд получаются систематически выше, чем в первом случае. По-видимому, причиной такого противоречия является использование стандартных моделей атмосфер, которые не вполне адекватны реальным звездным атмосферам.

5. *Обсуждение.* Как показано выше, тренд на рис.1-3 становится заметным лишь для достаточно горячих звезд. Если же рассматриваются относительно холодные звезды, для них в содержаниях $\log \epsilon$ наблюдается лишь разброс, который можно объяснить как ошибками определения, так и небольшими реальными вариациями $\log \epsilon$ от звезды к звезде. Конкретно имеются в виду В-звезды с эффективными температурами $T_{\text{эф}} < 18100$ К в случае углерода и $T_{\text{эф}} < 25000$ К в случае азота и кислорода. Можно предположить, что для таких звезд эффект сверхионизации мал, поэтому, с одной стороны, для них получаются неискаженные содержания С, N и О. С другой стороны, поскольку обсуждаются звезды, далекие от завершения стадии ГП, эти содержания С, N и О можно считать исходными для таких звезд. В табл.5 представлены средние значения $\log \epsilon(\text{C})$, $\log \epsilon(\text{N})$ и $\log \epsilon(\text{O})$ для относительно холодных В-звезд с эффективными температурами $T_{\text{эф}}$, указанными выше, согласно данным работ [7] и [24] (здесь частично использованы данные из табл.2-4). Из табл.5 следуют два вывода: 1) в случае N и O, где имеются данные обеих работ, между [7] и [24] наблюдается очень хорошее согласие; 2) результаты по содержаниям С, N и O для таких звезд очень хорошо согласуются с современными оценками для Солнца (последний столбец табл.5).

Таблица 5

СРЕДНИЕ НАЧАЛЬНЫЕ СОДЕРЖАНИЯ С, N И O В
В-ЗВЕЗДАХ ГП В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА, ПОЛУЧЕННЫЕ
ИЗ ДАННЫХ [7] И [24]

Элемент	Число звезд	$\log \epsilon$	Солнце
С	6	8.46 ± 0.09 [7]	8.43 ± 0.05 [5]
			8.50 ± 0.06 [8]
N	6	7.80 ± 0.16 [24]	7.83 ± 0.05 [5]
			7.86 ± 0.12 [26]
O	6	8.75 ± 0.14 [24]	8.69 ± 0.05 [5]
			8.76 ± 0.07 [25]
	20	8.72 ± 0.12 [7]	

Таким образом, подтверждается, что исходные содержания C, N и O у В-звезд ГП в начале их эволюции в среднем соответствуют солнечным значениям.

Следует подчеркнуть, что, согласно табл.5, нет никакого дефицита в исходном содержании углерода относительно Солнца; напомним, что в предыдущих работах для непроэволюционировавших В-звезд ГП получался дефицит C, не имевший убедительного объяснения. Как показано выше, при $T_{eff} > 18500$ К расчеты дают заниженную ионизацию C II, что приводит к занижению содержания $\log \epsilon(C)$. Таким образом, практически во всем диапазоне T_{eff} от 18000 до 30000 К, который занимают ранние В-звезды ГП, получалось заниженное содержание углерода. Отметим, что в случае N и O ситуация более благоприятная, так как там сверхионизация становится заметной лишь при $T_{eff} > 26000$ К.

Можно приблизительно оценить величину сверхионизации. Как отмечалось выше, чтобы устранить систематическое различие в содержаниях C, N и O между сравнительно холодными и более горячими В-звездами (см. табл.2-4), следует повысить содержания C, N и O для горячих звезд примерно на 0.2 dex или в 1.6 раза. Для этого в не-ЛТР расчетах достаточно уменьшить в 1.6 раза населенности всех уровней ионов C II, N II и O II; тогда указанное различие между горячими и холодными В-звездами исчезнет. Уменьшение населенностей уровней можно получить за счет повышения степени ионизации C II, N II и O II, которая, в свою очередь, может быть достигнута либо за счет искусственного завышения параметров T_{eff} и $\log g$ (см. выше), либо усиления ионизирующего излучения в далекой УФ области спектра. Чтобы усилить теоретический УФ поток, необходимо от стандартных моделей атмосфер В- и О-звезд перейти к более совершенным моделям.

Приведенная оценка величины сверхионизации (множитель ~ 1.6) является довольно грубой. Следует иметь в виду, что линии C II, N II и O II в видимой области спектра, о которых идет речь, образуются с довольно высоких уровней с энергией возбуждения 20 эВ и больше. Возможно, сверхионизация низких уровней и особенно основных состояний рассматриваемых ионов будет значительно выше. Для выяснения этого обстоятельства необходимы детальные не-ЛТР расчеты на основе усовершенствованных моделей атмосфер, учитывающих реальные условия в атмосферах В- и О-звезд.

Усовершенствование используемых моделей может быть связано, прежде всего, с применением сферических моделей вместо плоско-параллельных. Как отмечалось выше, сферические модели атмосфер лучше описывают наблюдаемый поток излучения в далекой УФ области для ранних В-звезд. Рассчитанный УФ поток в таких моделях усиливается за счет повышения температуры в области формирования лаймановского континуума (см. [20,21]), и это должно приводить к усилению ионизации ионов C II, N II и O II. Как видно из обзора [32],

в настоящее время существует несколько компьютерных программ, с помощью которых можно вычислять сферические модели атмосфер горячих звезд. К сожалению, при определении содержаний С, N и O по линиям C II, N II и O II по-прежнему используются модели с плоской геометрией. Еще одно усовершенствование, по крайней мере, для горячих гигантов и сверхгигантов, может быть связано с включением в расчеты звездного ветра, как в программе FASTWIND [33]. Напомним, что именно звездный ветер (точнее, ударные волны в нем [32]) рассматривается сейчас как необходимое условие для возникновения рентгеновского излучения у горячих звезд. Наконец, у некоторых O- и ранних B-звезд обнаружены магнитные поля порядка сотен гаусс и даже около 1500-1700 Гс (см., например, обзор [34]). Возможно, магнитное поле тоже вносит определенный вклад в строение атмосфер этих звезд. Таким образом, перечисленные эффекты (сферичность, звездный ветер и магнитное поле), будучи учтенными в расчетах моделей атмосфер, могли бы способствовать решению проблемы сверхионизации.

Обсуждая роль сверхионизации в определении содержаний С, N и O для горячих звезд, следует рассмотреть, хотя бы кратко, еще один легкий элемент, присутствующий в табл.1. Это гелий, содержание которого находится по линиям He I. Поскольку фотоионизация атомов He I, как и ионов C II, N II и O II, происходит под действием излучения в далекой УФ области ($\lambda < 504\text{\AA}$, см. табл.1), возможно, и в этом случае необходимо ввести в расчеты сверхионизацию. Чтобы проверить такое предположение, можно попытаться найти тренд в содержании гелия с температурой T_{eff} , подобный тому, что был найден выше для содержаний С, N и O (рис.1-3). Для этой цели воспользуемся не-ЛТР оценками содержания гелия He/H, полученными в [35] для 102 B-звезд ГП. Отметим, что He/H - это отношение "гелий/водород" по числу атомов. Эффективные температуры T_{eff} и другие параметры этих звезд были определены в [36], причем параметры T_{eff} и $\log g$ были найдены традиционным методом (использованы фотометрия и бальмеровские линии). Все эти звезды находятся на стадии ГП и расположены в окрестности Солнца радиусом 800 пк.

Согласно [35], содержание гелия в атмосферах исследованных B-звезд увеличивается в течение стадии ГП, причем повышение He/H тем заметнее, чем больше масса звезды и ее скорость вращения. В начале фазы ГП эти звезды имеют в среднем содержание гелия $\text{He}/\text{H} = 0.098 \pm 0.003$ [37], но к концу этой фазы они могут повысить He/H более, чем в два раза. Чтобы устранить этот эволюционный эффект, будем рассматривать только непроэволюционировавшие звезды, находящиеся в начале фазы ГП. Точнее говоря, рассмотрим звезды с относительным возрастом $t/t_{\text{MS}} \leq 0.30$, где t - возраст звезды и t_{MS} - время жизни звезды данной массы на ГП. Кроме того, исключим звезды с быстрым вращением, ограничившись объектами

с наблюдаемыми скоростями вращения $v \sin i \leq 130$ км/с.

В итоге из списка [35] удалось отобрать 18 ранних В-звезд ГП, отвечающих указанным требованиям. Построив для них зависимость He/H от T_{eff} , убеждаемся в том, что нет явного тренда в содержании гелия с T_{eff} , подобного тренду, найденному для содержаний C, N и O (рис.1-3). Таким образом, необходимость в сверхионизации как будто отпадает. Интересно отметить, что Гис и Ламберт [2] также не нашли тренда для He I, в отличие от C II, N II и O II (см. рис.11 в [2]). В чем причина такого отличия от ситуации, имеющей место в случае C, N и O? Как отмечалось выше, в не-ЛТР расчетах приходится учитывать два ионизационных процесса: ионизацию под действием столкновений и ионизацию под действием излучения или фотоионизацию. Атомы гелия в 3-4 раза легче, чем атомы C, N и O; поэтому можно предположить, что ионизация под действием столкновений в случае He I, в отличие от C II, N II и O II, преобладает над процессами фотоионизации.

6. Заключение. Цель настоящего исследования состояла в том, чтобы привлечь внимание к следующему факту, который имеет первостепенное значение, но который до последнего времени фактически игнорировался: фотоионизация ионов C II, N II и O II, по линиям которых обычно определяются содержания C, N и O в атмосферах ранних В-звезд и поздних O-звезд, происходит под действием излучения в далекой УФ области спектра; однако используемые в не-ЛТР расчетах линий C II, N II и O II теоретические УФ потоки, по-видимому, содержат существенные ошибки.

Действительно, анализ наблюдений ранних В-звезд в этой области привел к выводу, что теоретические УФ потоки, рассчитанные на основе стандартных моделей атмосфер, могут быть существенно занижены. Это приводит к недооценке степени ионизации C II, N II и O II в расчетах и, в конечном итоге, к занижению определяемых содержаний C, N и O. Приходится вводить в вычисления дополнительную ионизацию (сверхионизацию), чтобы устранить систематическое занижение указанных содержаний у самых горячих В-звезд, а также O-звезд.

Стандартные модели атмосфер, т.е. плоско-параллельные ЛТР-модели в гидродинамическом равновесии, до самого последнего времени использовались при исследовании содержаний C, N и O в ранних В-звездах и поздних O-звездах. Они применялись, во-первых, при определении фундаментальных параметров T_{eff} и $\log g$ и, во-вторых, в не-ЛТР расчетах линий C II, N II и O II. Оказалось, что определяемые содержания C, N и O зависят от подхода, использованного при оценке T_{eff} и $\log g$.

С одной стороны, если параметры T_{eff} и $\log g$ для горячих звезд находятся с помощью традиционной методики, когда эффективная температура T_{eff} оценивается по фотометрическим индексам, а ускорение силы тяжести в атмосфере $\log g$ - по бальмеровским линиям (или по

параллаксам, как в [7]), полученные содержания С, N и O показывают тренд с температурой T_{eff} . Систематическое занижение содержания углерода становится заметным при $T_{\text{eff}} > 18500$ К, а содержания азота и кислорода - при $T_{\text{eff}} > 26000$ К. При этом для относительно холодных В-звезд с меньшими значениями T_{eff} содержания С, N и O в среднем совпадают с солнечными содержаниями, но для более горячих звезд с указанными T_{eff} наблюдается дефицит С, N и O около 0.2 dex. Чтобы избавиться от тренда с температурой T_{eff} приходится вводить сверхионизацию С II, N II и O II для сравнительно горячих звезд, приводящую к уменьшению населенностей верхних уровней, с которых возникают исследуемые линии. Грубая оценка показывает, что населенности этих уровней должны быть понижены примерно в 1.6 раза.

С другой стороны, если параметры T_{eff} и $\log g$ находятся с помощью метода ионизационного баланса, когда, например, содержание С по линиям С II подгоняется к содержанию С по линиям С III, это приводит к завышению T_{eff} и $\log g$ для относительно горячих звезд с $T_{\text{eff}} \geq 24000$ К. При этом переоценка величины T_{eff} по сравнению с традиционной методикой может достигать 2300 К, а величины $\log g$ - 0.5 dex. Обе эти причины (завышение как T_{eff} , так и $\log g$) автоматически приводят к повышению ионизации С II, N II и O II.

Таким образом, при применении стандартных моделей атмосфер возникает неоднозначность в определении параметров T_{eff} и $\log g$ у горячих звезд и, как следствие, неоднозначность в полученных для них содержаниях С, N и O. Значения T_{eff} и $\log g$, найденные по фотометрическим индексам и бальмеровским линиям, не могут одновременно удовлетворять условию ионизационного баланса. Главная причина всех этих неувязок, вероятно, заключается в том, что стандартные модели дают для горячих звезд заниженный УФ поток, который приводит к занижению в расчетах степени ионизации С II, N II и O II.

Чтобы решить эту проблему, в исследованиях химического состава ранних В- и О-звезд следует перейти к использованию более сложных, но при этом и более реалистичных моделей атмосфер. Первые успехи могут быть достигнуты путем перехода от плоско-параллельных моделей к сферическим моделям. Определенное влияние может иметь включение в расчеты моделей атмосфер звездного ветра, а также магнитного поля, наблюдаемого у ряда О- и В-звезд.

НИИ Крымская Астрофизическая Обсерватория,
Украина, e-mail: lyub@crao.crimea.ua

POSSIBLE OVER-IONIZATION OF THE C II, N II
AND O II IONS IN ATMOSPHERES OF EARLY
B- AND LATE O-TYPE STARS

L.S.LYUBIMKOV

Problem of reliability of the C, N and O abundances derived from C II, N II and O II lines for early B- and late O-type stars on the MS (main sequence) evolutionary stage is considered. The consideration is based on the fact which is of special interest for this problem, namely: photoionization of the C II, N II and O II ions in atmospheres of such stars is the result of radiation in the far UV spectral region. It follows from observations that the actual flux in this region for hot stars can be significantly greater than the theoretical one; therefore, the C II, N II and O II over-ionization takes place in the real atmospheres of the stars as compared with the computed ionization obtained from standard model atmospheres. Underestimation of the computed ionization leads to the underestimation of the derived C, N and O abundances. This is confirmed by the observed dependence on the effective temperature T_{eff} : the C, N and O underabundance tends to observe as T_{eff} increases. It is shown that the over-ionization is especially appreciable for rather hot stars, namely for $T_{\text{eff}} > 18500$ K in the case of C II lines and for $T_{\text{eff}} > 26000$ K in the case of N II and O II lines. Systematic difference in the C, N and O abundances between such relatively hot stars and cooler B-type MS stars is about 0.2 dex. The relatively cool B-type MS stars ($T_{\text{eff}} < 18100$ K in the case of C II and $T_{\text{eff}} < 25000$ K in the case of N II and O II) show the distortionless C, N and O abundances; their mean values agree very well with contemporary values for the Sun. Therefore, the solar metallicity of the B- and O-type MS stars in the Sun's neighbourhood is confirmed. An explanation is presented for a small carbon deficiency obtained for early B-type MS stars in previous works. It is noted that when an alternative technique of the T_{eff} and $\log g$ determination is used which is based on consideration of the ionization balance (e.g., He I-II, C II-III, Ne I-II, Si III-IV), the problem of over-ionization is practically removed; however, such a technique leads to systematic overestimation of the T_{eff} and $\log g$ values. Solution of the problem of over-ionization can be obtained by passing to more perfect model atmospheres for early B- and late O-type stars, which take into consideration the sphericity and likely the stellar wind and magnetic field, too.

Key words: *stars: chemical composition*

ЛИТЕРАТУРА

1. J.Kilian, *Astron. Astrophys.*, **262**, 171, 1992.
2. D.R.Gies, D.L.Lambert, *Astrophys. J.*, **387**, 673, 1992.
3. K.Cunha, D.L.Lambert, *Astrophys. J.*, **426**, 170, 1994.

4. *S.M.Andrievsky, S.A.Korotin, R.E.Luck, L.Yu.Kostynchuk*, *Astron. Astrophys.*, **350**, 598, 1999.
5. *M.Asplund, N.Grevesse, A.J.Sauval, P.Scott*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **47**, 481, 2009.
6. *M.F.Nieva, N.Przybilla*, *Astron. Astrophys.*, **539**, A143, 2012.
7. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, D.B.Poklad, T.M.Rachkovskaya, S.I.Rostopchin*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **428**, 3497, 2013.
8. *E.Caffau, H.-G.Ludwig, P.Bonifacio et al.*, *Astron. Astrophys.*, **514**, A92, 2010.
9. *L.S.Lyubimkov, S.I.Rostopchin, T.M.Rachkovskaya, D.B.Poklad, D.L.Lambert*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **358**, 193, 2005.
10. *M.F.Nieva, S.Simon-Diaz*, *Astron. Astrophys.*, **532**, A2, 2011.
11. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, S.I.Rostopchin, T.M.Rachkovskaya, D.B.Poklad*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **402**, 1369, 2010.
12. *Д.Б.Поклад*, Изв. Крымской астрофиз. obs. (в печати).
13. *R.L.Kurucz*, *ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2 km/s grid*. Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophys. Obs., 1993.
14. *T.W.Berghöfer, J.H.M.M.Schmitt, J.P.Cassinelli*, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **118**, 481, 1996.
15. *T.W.Berghöfer, J.H.M.M.Schmitt, R.Danner, J.P.Cassinelli*, *Astron. Astrophys.*, **322**, 167, 1997.
16. *Y.Naze, P.S.Broos, L.Oskinova et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **194**, 7, 2011.
17. *N.Craig, M.Abbott, D.Finley et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **113**, 131, 1997.
18. *J.P.Cassinelli, D.H.Cohen, J.J.MacFarlane et al.*, *Astrophys. J.*, **438**, 932, 1995.
19. *D.Schaerer, A. de Koter*, *Astron. Astrophys.*, **322**, 598, 1997.
20. *J.P.Aufdenberg, P.H.Hauschildt, S.N.Shore, E.Baron*, *Astrophys. J.*, **498**, 837, 1998.
21. *J.P.Aufdenberg, P.H.Hauschildt, E.Baron*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **302**, 599, 1999.
22. *A.Gregorio, R.Stalio, L.Broadfoot et al.*, *Astron. Astrophys.*, **383**, 881, 2002.
23. *А.А.Боярчук, Л.С.Любимков, Н.А.Сахибуллин*, *Астрофизика*, **22**, 339, 1985.
24. *S.Dafon, K.Cunha, S.R.Becker, V.V.Smith*, *Astrophys. J.*, **552**, 309, 2001.
25. *E.Caffau, H.-G.Ludwig, M.Steffen et al.*, *Astron. Astrophys.*, **488**, 1031, 2008.
26. *E.Caffau, E.Maiorca, P.Bonifacio et al.*, *Astron. Astrophys.*, **498**, 877, 2009.
27. *Л.С.Любимков, Т.М.Рачковская, Д.Б.Поклад*, *Астрофизика*, **52**, 237, 2009.
28. *F. van Leeuwen*, *Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data*, Dordrecht, Springer, 2007.
29. *T.Morel, K.Butler, C.Aerts, C.Neiner, M.Briquet*, *Astron. Astrophys.*, **457**, 651, 2006.
30. *C.Trundle, P.L.Dufton, I.Hunter et al.*, *Astron. Astrophys.*, **471**, 625, 2007.
31. *R.Napiwotzki*, <http://www.astro.le.ac.uk/~rn38/uvbybeta.html>, 2004.
32. *J.Puls*, *Communications in Asteroseismology*, **158**, 113, 2009.
33. *J.Puls, M.A.Urbaneja, R.Venero et al.*, *Astron. Astrophys.*, **435**, 669, 2005.
34. *R.Walder, D.Folini, G.Meynet*, *Space Science Reviews*, **166**, 145, 2012.
35. *L.S.Lyubimkov, S.I.Rostopchin, D.L.Lambert*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **351**, 745, 2004.
36. *L.S.Lyubimkov, T.M.Rachkovskaya, S.I.Rostopchin, D.L.Lambert*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **333**, 9, 2002.
37. *Л.С.Любимков*, *Кинематика и Физика Небесных Тел*, **26**, №4, 32, 2010.