АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 13 ФЕВРАЛЬ, 1977 ВЫПУСК 1

О ВАРИАЦИЯХ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В АССОЦИАЦИЯХ И СКОПЛЕНИЯХ ЗВЕЗД КЛАССОВ О и В

Л. С. ЛЮБИМКОВ

Поступила 22 января 1976

Метод, предложенный в [3, 5] для оценки содержания гелия N(He)/N(H) в атмосферах звезд спектральных классов O6—B2, продолжен в область более поздних B-звезд. Это позволило 1) несколько уточнить значения N(He)/N(H) для O-ассоциаций и молодых скоплений, рассмотренных ранее, и 2) найти содержание гелия для ряда новых групп звезд. Всего исследовано 138 звезд спектральных классов O6.5—B8 и классов светимости V—III. Подтверждена обнаруженная в [4, 5] тенденция увеличения содержания гелия с возрастом соответствующих звездных групп.

1. *Введение.* Исследования последних лет показали, что содержание гелия N(He)/N(H) в атмосферах «нормальных» звезд ранних спектральных классов может несколько меняться при переходе от одних галактических скоплений и O-ассоциаций к другим. По-видимому, впервые на возможность таких изменений обратили внимание Х. Шипман и С. Стром [1], обнаружившие вариации в величине N(He)/N(H) порядка 0.02—0.03. Однако использованный этими авторами наблюдательный материал был недостаточно точен, поэтому их выводы нуждались в проверке. Позже Д. Петерсон и Х. Шипман [2] подробно исследовали ряд B-звезд в ассоциациях Lac OB1, Sco OB2 и скоплении NGC 2264 и нашли различия в средних значениях N(He)/N(H), превышающие 3σ, где σ—среднее квадратическое отклонение.

Дальнейшее изучение этой проблемы требовало более обширного статистического материала. Использовав предложенный нами метод [3], несколько усовершенствованный в случае ранних B-звезд, мы определили величину N(He)/N(H) примерно для 100 звезд спектральных классов O6.5—B2 и классов светимости V-III, принадлежащих O-ассоциациям и молодым скоплениям или являющихся звездами поля (см. [4, 5]). Оказалось, что содержание гелия увеличивается с возрастом t соответствую-

щих скоплений и ассоциаций от значения $N(He)/N(H)=0.09$—0.10 при $t=$ несколько млн. лет до значения $N(He)/N(H)=0.13$ при $t\approx 15$ *млн. лет*, причем величина 0.13 характерна также для звезд поля.

Результаты исследований Петерсона и Шипмана [2] и П. Ниссена [6] как будто подтверждают обнаруженную тенденцию. Действительно, из данных Петерсона и Шипмана для Lac OB1, Sco OB2 и NGC 2264 также следует, что более старой группе звезд соответствует большее содержание гелия. Согласно Ниссену [6], среднее значение $N(He)/N(H)$ у членов скопления Sco—Cen примерно на 0.02 выше, чем у членов более молодого скопления NGC 6231. Кроме того, содержание гелия в Sco—Cen оказалось таким же, как и у звезд поля, что согласуется с нашим выводом (см. [4, 5]). О результатах определения содержания гелия еще для четырех скоплений и ассоциаций Ниссен сообщил на III Европейской астрономической конференции (Тбилиси, июль 1975 г.). По его данным при переходе от одного скопления к другому величина $N(He)/N(H)$ может меняться на 0.04. Если сопоставить данные Ниссена с возрастом t соответствующих звездных групп, тогда выявляется та же тенденция роста $N(He)/N(H)$ с увеличением t. Заметим, что примененный Ниссеном метод позволяет надежно оценить лишь разницу в содержании гелия у различных звезд, в то время как абсолютные значения $N(He)/N(H)$ получаются несколько заниженными по сравнению с результатами других авторов.

Метод, предложенный в [3, 5], оказался применимым к звездам спектральных классов O6—B2 и классов светимости V—III. Для них достаточно знать спектральный подкласс, чтобы найти эффективную температуру $T_{эфф}$. При рассмотрении более поздних звезд такой путь определения $T_{эфф}$ становится неприемлемым, так как может приводить к большим ошибкам в величине $N(He)/N(H)$. Кроме того, для указанных звезд важно учитывать класс светимости. Тем не менее, как показано ниже, метод можно модифицировать таким образом, что область его применимости расширится вплоть до поздних B-звезд. Благодаря этому появится возможность изучения более старых, чем в [4, 5], звездных скоплений.

2. Метод оценки содержания гелия в атмосферах B-звезд. Основную формулу метода

$$\lg \frac{N(He)}{N(H)} = C\left| y + \lg \frac{W(4471)}{W(H_\gamma)} \right| - 1 \qquad (1)$$

оставим без изменений. Здесь W — эквивалентные ширины линий λ 4471 HeI и H_γ, а величины y и C находятся с помощью моделей звездных атмосфер. По определению

$$y = -\lg \frac{W(4471)}{W(H_\gamma)} \text{ при } \frac{N(He)}{N(H)} = 0.10. \qquad (2)$$

Вообще говоря, y зависит от эффективной температуры $T_{эфф}$ и ускорения силы тяжести g, однако при $T_{эфф} \geqslant 20000°$, как показано в [3], эту величину с достаточно высокой точностью можно представить в виде функции только одного аргумента, являющегося комбинацией $T_{эфф}$ и g. При $T_{эфф} < 20000°$ сделать это уже не удается, поэтому в [4, 5] мы ограничились рассмотрением звезд класса B2 и более ранних. Для этих звезд достаточно было знать спектральный подкласс, чтобы найти y и C.

Для звезд более поздних, чем B2, такой способ определения y и C является слишком грубым. Здесь прежде всего необходимо подобрать такие наблюдаемые параметры, которые позволили бы достаточно точно оценить величину $T_{эфф}$. В фотометрической системе UBV таким параметром может служить индекс

$$Q = (U - B) - 0.72\,(B - V), \tag{3}$$

который 1) не зависит от межзвездного покраснения и 2) в области $12\,000° \lesssim T_{эфф} \lesssim 25\,000°$ практически линейно связан с величиной $\theta_{эфф} = 5040/T_{эфф}$ (см., например, [7]). В четырехцветной системе *uvby* аналогичными свойствами обладает индекс

$$[c_1] = c_1 - 0.20\,(b - y), \tag{4}$$

где $c_1 = (u - v) - (v - b)$. Действительно, согласно Б. Стремгрену [8], этот индекс свободен от влияния межзвездного покраснения. Кроме того, используя расчеты Д. Михаласа [9], можно показать, что при фиксированном ускорении g величина $[c_1]$ линейно зависит от $\theta_{эфф}$. Этими свойствами индексов Q и $[c_1]$ мы и воспользуемся.

Как и в [4, 5], величину y будем вычислять по формуле (2) с помощью теоретических значений $W(H_\gamma)$ и $W(4471)$, найденных Михаласом и др. [9, 10] и основанных на уточненной теории уширения линий и на моделях атмосфер Михаласа [11], рассчитанных с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия. Чтобы метод был внутренне непротиворечив, те же модели необходимо использовать и при определении зависимости $\theta_{эфф}$ от Q или $\theta_{эфф}$ от $[c_1]$.

Сравнивая наблюдаемые эквивалентные ширины линий H_β и H_γ [12, 13], а также наблюдаемый фотометрический индекс $[c_1]$ с теоретическими значениями этих величин [9], мы оценили $T_{эфф}$ и $\lg g$ для 31 звезды спектральных классов B1.5—B7 и классов светимости V и IV. На основе этого материала методом наименьших квадратов было получено

$$\theta_{эфф} = 0.494 + 0.412\,Q; \tag{5}$$

$$\theta_{эфф} = 0.163 + 0.323\,[c_1]. \tag{6}$$

Фотометрические индексы Q и $[c_1]$ для каждой звезды определялись с помощью данных Д. Кроуфорда и др. [14].

Из (5) и (6), в частности, следует, что величины Q и $[c_1]$ в случае B-звезд можно связать линейным соотношением.

Зависимость $\theta_{эфф}$ от Q и от $[c_1]$ представлена на рис. 1. Подчеркнем, что числовые коэффициенты в (5) и (6) соответствуют сетке моделей Михаласа [11] и при использовании моделей других авторов положение прямых на рис. 1 может несколько измениться (см., например, [7]).

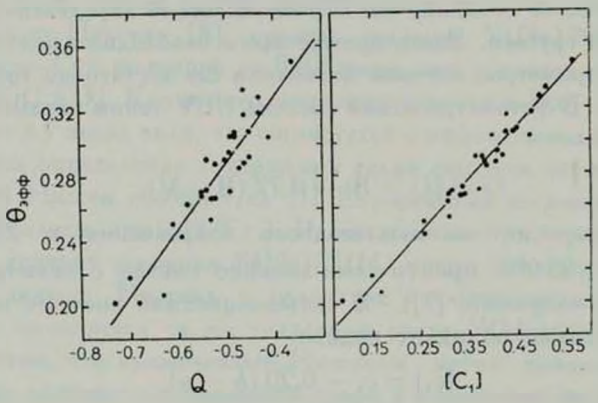

Рис. 1. Зависимость величины $\theta_{эфф} = 5040/T_{эфф}$ от фотометрических индексов Q и $[c_1]$. Прямыми линиями представлены соотношения (5) и (6).

Применяя соотношение (6), а также данные Михаласа и др. [9, 10], нетрудно получить следующую интерполяционную формулу:

$$y = 0.557 - 0.0819\,[c_1] + 1.583\,[c_1]^2, \qquad (7)$$

задающую связь между y и $[c_1]$ в интересующей нас области спектральных классов. С помощью (5) и (6) отсюда получаем аналогичную формулу, связывающую y и Q:

$$y = 2.136 + 4.033\,Q + 2.573\,Q^2. \qquad (8)$$

Напомним, что в основе вывода (7) и (8) лежат наблюдения звезд классов светимости V и IV. О тех соотношениях, которые имеют место в случае звезд класса светимости III, будет сказано ниже.

В равенстве (1) остается определить величину C. Как и в [3, 5], используем для этого результаты анализа звезд с аномальным содержанием гелия (у них величина N(He)/N(H) заметно отличается от 0.10). Список таких звезд, а также найденные для них значения C приведены в табл. 1.

Представим зависимость C от Q в интересующей нас области $T_{эфф}$ прямой линией. Применяя метод наименьших квадратов, с помощью табл. 1 получаем

$$C = 5.03 + 3.54\,Q. \qquad (9)$$

Отметим, что средний разброс указанных в табл. 1 значений C около прямой (9) составляет примерно 10%.

Таблица 1

ЗАВИСИМОСТЬ C ОТ Q ДЛЯ ЗВЕЗД С АНОМАЛЬНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ГЕЛИЯ

Звезда	$\lg \frac{N(He)}{N(H)}$	Источники	Q	C
α Sq I	−2.00	[15]	−0.42	3.20
HD 144 941	+1.28	[3, 16]	−0.75	2.58
HD 37 058	−1.43	[3, 17]	−0.62	3.18
3 Cen A	−1.83	[3, 17]	−0.50	3.45
HD 133 518	−0.105	[16]	−0.68	2.77
HR 5 206	−0.658	[16]	−0.65	2.19
HD 184 927	0.00	[18]	−0.69	2.23
ε Ori E	−0.20	[3, 19]	−0.73	2.27
3 Sco	−2.00	[17]	−0.54	3.98
HD 144 661	−2.00	[17]	−0.48	2.99

Из (5), (6) и (9) находим

$$C = 2.19 + 2.78\,[c_1]. \qquad (10)$$

Таким образом, величины y и C для B-звезд классов светимости V—IV вычисляются с помощью соотношений (7) и (10), если известен фотометрический индекс $[c_1]$, и с помощью соотношений (8) и (9), если известен индекс Q. На практике, особенно при исследовании большого числа звезд, вместо формул (7)—(10) удобнее пользоваться табл. 2, где приведены значения y и C в зависимости от $[c_1]$ и Q.

Подавляющее большинство звезд, рассмотренных нами, относится к классам светимости V—IV. Однако при оценке среднего содержания гелия в скоплении Плеяды из-за малого количества звезд, доступных для применения нашего метода, пришлось учесть также несколько звезд класса светимости III. При $T_{эфф} < 20000°$, как показано в [3], величина y заметно зависит от ускорения силы тяжести g, поэтому при переходе к классу светимости III коэффициенты в интерполяционных формулах (7) и (8) должны измениться. Изменение y, в свою очередь, приводит к небольшим изменениям в величине C.

Тем же путем, что и при выводе (7)—(10), оценив предварительно $T_{эфф}$ и $\lg g$ для 18 звезд, мы получили следующие соотношения для класса светимости III:

$$y = 0.648 - 0.654\,[c_1] + 2.289\,[c_1]^2; \qquad (11)$$

$$y = 2.498 + 5.458\,Q + 3.928\,Q^2; \quad (12)$$

$$C = 4.96 + 3.64\,Q; \quad (13)$$

$$C = 2.03 + 2.77\,[c_1]. \quad (14)$$

Отметим, что при построении интерполяционных формул (7) и (8), а также (11) и (12) учитывалось, что ускорение g у B-звезд классов светимости V—IV и отдельно III несколько меняется с $T_{эфф}$. В среднем же в области спектральных классов B2—B6 оказалось, что $\lg g = 3.5$ для звезд классов светимости V—IV и $\lg g = 3.1$ для звезд класса светимости III.

Таблица 2

ЗНАЧЕНИЯ y и C В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ $[c_1]$ И Q.

$[c_1]$	y	C	Q	y	C
0.10	0.565	2.47	−0.75	0.559	2.37
0.15	0.580	2.61	−0.70	0.574	2.55
0.20	0.604	2.75	−0.65	0.602	2.73
0.25	0.635	2.89	−0.60	0.642	2.91
0.30	0.675	3.02	−0.55	0.696	3.08
0.35	0.722	3.16	−0.50	0.763	3.26
0.40	0.778	3.30	−0.45	0.842	3.44
0.45	0.841	3.44	−0.40	0.934	3.61
0.50	0.912	3.58	−0.35	1.040	3.79
0.55	0.991	3.72	−0.30	1.158	3.97
0.60	1.078	3.86			
0.65	1.173	4.00			

Итак, построенный в [3, 5] метод оценки содержания гелия, примененный первоначально в интервале спектральных классов O6—B2, распространен в область более поздних B-звезд. Если для звезд классов O6—B2 величины y и C в соотношении (1) находятся по спектральному подклассу, то в области от B1.5 до B7—B8 для этой цели предложено использовать фотометрические индексы Q и $[c_1]$. Для звезд подклассов B1.5—B2 пригодны оба способа определения y и C.

Следует отметить, что при тех сравнительно небольших вариациях содержания гелия, которые обсуждаются ниже, распределение энергии в видимой части спектров B-звезд, а значит, и индексы Q и $[c_1]$ от величины N(He)/N(H) практически не зависят (более подробно этот вопрос рассмотрен в обзоре автора [20]).

3. Результаты вычислений. Расширение области применимости нашего метода позволило 1) несколько уточнить значения N(He)/N(H) для групп звезд, рассмотренных в [4, 5], и 2) получить оценку содержания гелия для ряда новых скоплений и ассоциаций. Результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3

СОДЕРЖАНИЕ ГЕЛИЯ В АТМОСФЕРАХ О- И В-ЗВЕЗД, ВХОДЯЩИХ В О-АССОЦИАЦИИ И РАССЕЯННЫЕ СКОПЛЕНИЯ ИЛИ ПРИНАДЛЕЖАЩИХ ПОЛЮ

Группа звезд	Число исследованных звезд	N (He)/N (H)	Возраст (*млн. лет*)
Ori OB1: в целом	14	0.108±0.007	—
подгруппы a, b	6	0.116±0.008	10
подгруппа c	8	0.102±0.011	6
Lac OB1: в целом	10	0.132±0.007	—
подгруппа a	5	0.142±0.011	16
подгруппа b	5	0.121±0.007	12
Sco—Cen: в целом	18	0.130±0.009	—
Sco OB2	12	0.118±0.011	10
Верхний Центавр	6	0.153±0.011	14
Cep OB2	16	0.132±0.010	—
Cep OB3	7	0.095±0.009	6
NGC 2264 (Mon OB1)	4	0.081±0.006	1
Per OB2	7	0.101±0.009	4
$\varkappa$ Per (Per OB3)	6	0.147±0.014	—
Cas—Tau	14	0.118±0.013	—
Плеяды	5	0.141±0.014	30
Звезды поля	35	0.132±0.008	—

Наблюдаемые эквивалентные ширины $W(H_\gamma)$ и W(4471) в соотношении (1) брались из литературы, причем использовались те же источники, что и в [3—5]. Вычисление индекса Q для большинства рассмотренных звезд проводилось с помощью данных каталога [21], а также данных Кроуфорда и др. [14]. В случае ассоциации Cep OB2, скопления NGC 2264 и одной из подгрупп звезд в Sco—Cen (Верхний Центавр) применялись результаты UBV-измерений [22, 23] и [24] соответственно. Что касается измерений в системе *uvby*, необходимых для вычисления индекса $[c_1]$, то здесь был использован каталог [25]. Заметим, что значения N(He)/N(H), найденные для одной и той же звезды по $[c_1]$ и по Q, обычно хорошо согласуются между собой.

Почти для всех групп звезд из [4, 5], исключая NGC 2244 и Cas OB6, было несколько уточнено среднее содержание гелия. Возможность такого уточнения связана прежде всего с увеличением числа исследованных звезд за счет звезд классов B2.5—B8 (из 138 рассмотренных звезд последние составляют примерно половину). Кроме того, при $20000° \lesssim T_{эфф} \lesssim 25000°$ величина N(He)/N(H) теперь может быть найдена не только по спектральному подклассу, как в [4, 5], но и по фотометрическим данным. Это позволило пересчитать содержание гелия для многих рассмотренных ранее звезд подклассов B1.5 и B2, попадающих в указанную область $T_{эфф}$. При этом выяснилось, что новые значения N(He)/N(H), как правило, близки к значениям, полученным прежним способом. Отметим, что если для какой-либо звезды содержание гелия можно было определить разными способами, тогда в качестве искомой величины N(He)/N(H) принималось среднее арифметическое.

Уточненные значения N(He)/N(H), приведенные в табл. 3, мало отличаются от найденных в [4, 5] даже в тех случаях, когда список исследованных звезд был заметно расширен (Lac OB1, звезды поля). Наибольшее расхождение составляет около 0.01, что сравнимо с величиной σ, средней квадратической ошибкой (последняя также существенно не изменилась). Таким образом, выводы работ [4, 5] остаются в силе. В частности, не только подтвердилось, но даже несколько улучшилось согласие между средним содержанием гелия в ассоциации Ori OB1 и у звезд AE Aur и μ Col (соответственно 0.105 и 0.110 [5]), которые, согласно А. Блаау [26], вылетели из этой ассоциации 2—3 *млн. лет* назад. Подтвердилось также согласие с оценками N(He)/N(H), выполненными для туманности Ориона.

Кроме уже рассмотренных в [4, 5] ассоциаций и скоплений, содержание гелия было найдено также для следующих систем: ассоциация Per OB2, скопление α Per (ассоциация Per OB3), группа звезд Cas—Tau и скопление Плеяды. Остановимся подробнее на последнем объекте, представляющем особый интерес.

В [4, 5] были исследованы ассоциации и скопления, средний возраст t которых колеблется примерно от 1 до 15 *млн. лет* (по данным Блаау [26]). Возраст скопления Плеяды, оцененный по эволюционным трекам наиболее ярких звезд, составляет около 30 *млн. лет* [27]. Таким образом, включение этого скопления в список рассмотренных объектов позволяет проследить изменения величины N(He)/N(H) на промежутке t, вдвое большем, чем в [4, 5].

Ярчайшие звезды в Плеядах имеют спектральные классы B6—B8, то есть лежат на самой границе области применимости нашего метода (указанная граница определяется тем обстоятельством, что расчеты Михаласа и др. [9—11], положенные в основу метода, были выполнены при $T_{эфф} \geqslant 15000°$). В связи с этим для анализа удалось отобрать лишь семь звезд

с известными эквивалентными ширинами $W(H_\gamma)$ и W(4471), а именно: 16—20 Tau, 23 Tau и 25 η Tau. Значения $W(H_\gamma)$ и W(4471) для них приведены у А. А. Боярчука [28], И. М. Копылова [12] и У. Зиннерстада [29].

Некоторые из этих звезд принадлежат классу светимости III. Как отмечалось выше, специально для этого случая были выведены соотношения (11)—(14). Кроме того, три звезды (17 Tau, 23 Tau и 25 η Tau) относятся к типу Be. Известно, что показатели цвета у Be-звезд, вообще говоря, отличаются от показателей цвета у обычных звезд класса B (см., например, [30]). А это, в свою очередь, может приводить к систематическим различиям в индексах Q и $[c_1]$. Чтобы выяснить этот вопрос, было проведено сравнение распределений величин Q и $[c_1]$ по спектральным подклассам у Be-звезд и нормальных B-звезд. Индексы Q и $[c_1]$ вычислялись с помощью данных Кроуфорда и др. [14, 31]. Оказалось, что в области B1—B3, в которую попадает свыше 80% Be-звезд [30], значения Q и $[c_1]$ у последних лежат систематически ниже, чем у обычных B-звезд, причем расхождение уменьшается при переходе от подкласса B1 к подклассу B3. С другой стороны, в подклассах B4—B8 систематические отличия между B- и Be-звездами отсутствуют. Как раз в эту область попадают три упомянутые выше Be-звезды, принадлежащие подклассам B6 и B7. Специальное исследование показало, что в подклассах B6—B7 отсутствует также систематическое различие в отношении $W(4471)/W(H_\gamma)$ между Be-звездами и нормальными B-звездами. Таким образом, трудно предположить, что исходные данные, используемые при определении содержания гелия у трех Be-звезд из скопления Плеяды, заметно искажены влиянием околозвездных оболочек. Отметим, что при выводе среднего значения N(He)/N(H) для других скоплений и ассоциаций Be-звезды обычно не учитывались.

Две звезды в Плеядах, 16 Tau и 20 Tau, показали значительный дефицит гелия. Если значения $W(H_\gamma)$ и W(4471) для них взять у Зиннерстада [29], тогда N(He)/N(H)=0.001 для 16 Tau и N(He)/N(H)=0.06 для 20 Tau. Однако, если для 20 Tau воспользоваться более точными данными С. Ш. Хуана и О. Струве [32], тогда для нее, как и для 16 Tau, получим N(He)/N(H)=0.001. Отметим, что линия λ 4471 у 20 Tau показывает нерегулярное колебания с характерным временем порядка 2-*х часов* [33]. Так как для анализа отбирались только «нормальные» звезды, две указанные звезды при выводе среднего содержания гелия в Плеядах были исключены, а значение N(He)/N(H), приведенное в табл. 3, найдено по пяти оставшимся звездам.

Как уже отмечалось, наиболее яркие звезды в Плеядах имеют спектральные классы B6—B8. В скоплениях более старых, чем Плеяды, B-звезды главной последовательности вообще не наблюдаются, так как время пребывания звезд класса B на главной последовательности меньше возраста

t рассматриваемых скоплений. В таких скоплениях могут присутствовать A-звезды, однако в спектрах последних уже нет заметных линий гелия. Из сказанного следует, что мы охватили практически всю область спектральных классов, в которой возможна оценка величины N(He)/N(H), и весь интервал t, на котором можно проследить изменения этой величины.

4. *Обсуждение результатов.* Из табл. 3 видно, что среднее содержание гелия меняется от одной группы звезд классов O и B к другой, причем в ряде случаев различие превышает 3σ. В [5] показано, что причиной такого расхождения не может быть неодинаковое распределение исследуемых звезд по скоростям вращения. К аналогичному выводу пришли Петерсон и Шипман [2]. Различия в содержании гелия, обнаруженные для разных групп звезд, также трудно объяснить разным распределением числа звезд по спектральным подклассам в этих группах (см. [5]). С другой стороны, в [4, 5] выявилась тесная связь между величиной N(He)/N(H) и возрастом t соответствующих звездных групп. Теперь мы имеем возможность рассмотреть зависимость N(He)/N(H) от t на основе более обширного материала, содержащегося в табл. 3.

Оценки возраста t, выполненные для одних и тех же ассоциаций и скоплений разными авторами, могут существенно различаться между собой. Для нас важно иметь однородную сводку данных, поэтому, как и в [4, 5], воспользуемся значениями t, содержащимися в статье Блаау [26]. Для Плеяд, как уже отмечалось, принят возраст $t=30$ *млн. лет*, приведенный у О. Эггена [27]. По-видимому, эта оценка лучше других соответствует системе данных Блаау (отметим, что предшествующие оценки давали величину $t\sim 100$ *млн. лет*). Значения t приведены в последнем столбце табл. 3.

Зависимость среднего содержания гелия в атмосферах звезд ранних спектральных классов от возраста соответствующих звездных групп представлена на рис. 2. Остановимся на главных выводах, вытекающих из рассмотрения этой зависимости.

Подтверждается обнаруженная в [4, 5] тенденция увеличения N(He)/N(H) с ростом t. Наименьшее значение N(He)/N(H)=0.08 получено для скопления NGC 2264, возраст которого также оказался наименьшим ($t=1$ *млн. лет*). Наибольшее значение N(He)/N(H)=0.14—0.15 характерно для тех групп, возраст которых $t\gtrsim 15$ *млн. лет*. Интересно, что возрасту $t\approx 15$ *млн. лет* (Верхний Центавр, Lac OBIa) и возрасту $t=30$ *млн. лет* (Плеяды) соответствует практически одно и то же содержание гелия. Если значение N(He)/N(H) найдено для Плеяд достаточно точно, тогда отсюда следует, что возрастание содержания гелия в атмосферах «нормальных» звезд ранних спектральных классов, лежащих вблизи главной последовательности, к моменту $t\approx 15$ *млн. лет* заканчивается.

На рис. 2 не представлено скопление α Per. Вероятно, по возрасту оно лежит между Sco OB2 и Плеядами (см. [34]). Тогда найденное для него значение N(He)/N(H)=0.15 вполне соответствует общей зависимости.

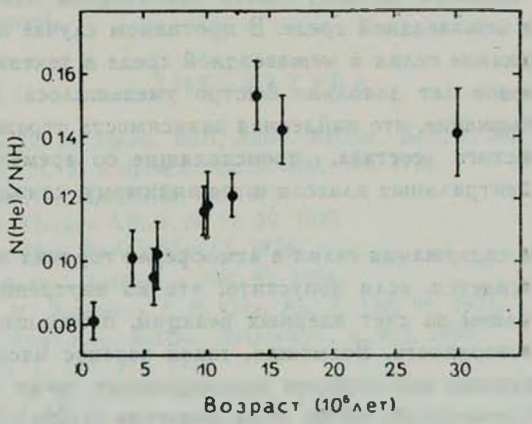

Рис. 2. Содержание гелия в группах звезд разного возраста.

Группа звезд Cas—Tau, по словам Блаау [26], возможно, является примером такой системы, звезды которой когда-то образовывали О-ассоциацию, однако за прошедшее с тех пор время успели сильно разойтись в пространстве, и сейчас мы с трудом обнаруживаем следы их общего происхождения. В этом случае средний возраст Cas—Tau должен заметно превышать 15 *млн. лет*. Однако родственность звезд, входящих в группу Cas—Tau, не подтверждается фотометрическими исследованиями [35], а в списке МАС [36] она отнесена к числу сомнительных ассоциаций. Если бы возраст звезд этой группы действительно был заметно больше 15 *млн. лет*, тогда в соответствии с найденной зависимостью мы должны были бы получить для нее N(He)/N(H)=0.14—0.15. Но результат оказался иным: N(He)/N(H)=0.12. Хотя различие здесь и невелико по сравнению с σ, тем не менее оно скорее подкрепляет сомнения в реальности этой группы, чем подтверждает предположение Блаау.

В [5] показано, что содержание гелия хорошо коррелирует с линейными размерами подгрупп звезд в О-ассоциациях. В среднем, чем больше размеры подгруппы, тем выше значение N(He)/N(H). Объяснение этой зависимости связано с тем обстоятельством, что размеры подгрупп звезд в ассоциациях, по-видимому, увеличиваются с возрастом (см., например, [26]). С помощью табл. 3 можно убедиться, что рассеянные скопления уже не подчиняются этому закону. Действительно, для скоплений Плеяды и NGC 2264 получены совершенно разные средние значения N(He)/N(H) (соответственно 0.14 и 0.08), в то время как диаметры их примерно одинаковы (~ 5 *пс*). Таким образом, зависимость содержания гелия от разме-

ров соответствующих звездных группировок носит менее общий характер, чем зависимость N(He)/N(H) от t.

Как отмечено в [5], различия в содержании гелия, присущие группам звезд разного возраста, не могут быть результатом изменения величины N(He)/N(H) в межзвездной среде. В противном случае пришлось бы принять, что содержание гелия в межзвездной среде в течение последних пятнадцати миллионов лет довольно быстро уменьшалось. Более вероятным кажется предположение, что найденная зависимость отражает реальные изменения химического состава, происходящие со временем в атмосферах звезд ранних спектральных классов и, по-видимому, связанные со звездной эволюцией.

Увеличение содержания гелия в атмосферах горячих звезд с их возрастом легко объясняется, если допустить, что из внутренних слоев звезды, обогащенных гелием за счет ядерных реакций, небольшая часть вещества выносится на поверхность. Возможно, такой перенос массы связан со слабым перемешиванием, при котором эволюционные треки звезд заметно не меняются. Как отмечалось выше, если значение N(He)/N(H) для Плеяд найдено достаточно точно, тогда рост содержания гелия продолжается не более 15 *млн. лет* (по шкале Блаау [26]). Следовательно к этому моменту обмен веществом между внутренними и внешними слоями звезды прекращается.

Другое возможное объяснение найденной зависимости связано с процессами диффузии, подобными тем, которыми пытаются объяснить аномалии химического состава у Ap-звезд.

В заключение следует подчеркнуть, что обсуждавшиеся выше результаты относятся к обычным звездам спектральных классов O6—B8 и классов светимости V—III. Вместе с тем известно относительно небольшое количество пекулярных звезд ранних спектральных классов, показывающих значительный избыток или дефицит гелия. Причины таких аномалий не всегда еще достаточно уверенно выяснены.

Крымская астрофизическая
обсерватория

ON THE HELIUM ABUNDANCE VARIATIONS IN THE ASSOCIATIONS AND CLUSTERS OF OB STARS

L. S. LYUBIMKOV

The method proposed in [3, 5] for helium abundance determination in atmospheres of O6-B2 stars is extended to the region of later B stars. As a result of this procedure 1) more accurate N(He)/N(H) values are obtained for O-associations and young clusters considered

earlier and 2) helium abundance is determined for some new groups of hot stars. On the whole 138 stars of spectral types O6.5-B8 and luminosity classes V—III are investigated. The conclusion of previous works [4, 5] that helium abundance tends to increase with the age of stellar groups is confirmed.

ЛИТЕРАТУРА

1. *H. L. Shipman, S. E. Strom*, Bull. Amer. Astron. Soc., 1, 362, 1969.
2. *D. M. Peterson, H. L. Shipman*, Ap. J., 180, 635, 1973.
3. *Л. С. Любимков*, Изв. КрАО, 52, 49, 1974.
4. *Л. С. Любимков*, Письма АЖ, 1, № 11, 29, 1975.
5. *Л. С. Любимков*, Изв. КрАО, 55, 112, 1976.
6. *P. E. Nissen*, Astron. Astrophys., 36, 57, 1974.
7. *R. Schild, D. M. Peterson, J. B. Oke*, Ap. J., 166, 95, 1971.
8. *B. Strömgren*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 4, 433, 1966.
9. *D. Mihalas*, Ap. J., 176, 139, 1972.
10. *D. Mihalas, A. J. Barnard, J. Cooper, E. W. Smith*, Ap. J., 190, 315, 1974.
11. *D. Mihalas*, Non-LTE Model Atmospheres for B and O Stars, NCAR Tech. Notes STR-76. Boulder, Colorado, 1972.
12. *И. М. Копылов*, Изв. КрАО, 20, 123, 1958.
13. *D. Crampton, A. Leir, F. Younger*, Publ. Dom. Astrophys. Obs., Victoria, 14, 151, 1973.
14. *D. L. Crawford, J. V. Barnes, J. C. Golson*, A. J., 76, 1058, 1971.
15. *O. Vilhu*, Ann. Acad. Sci. Fennicae, Ser. A, VI, Physica, No. 394, 1972.
16. *P. S. Osmer, D. M. Peterson*, Ap. J., 187, 117, 1974.
17. *J. Norris*, Ap. J. Suppl., 23, 213, 1971.
18. *N. A. Higginbotham, P. Lee*, Astron. Astrophys., 33, 277, 1974.
19. *D. A. Klinglesmith, K. Hunger, R. C. Bless, R. L. Millis*, Ap. J., 159, 513, 1970.
20. *Л. С. Любимков*, Астрофизика, 11, 553, 1975.
21. *V. M. Blanco, S. Demers, G. G. Douglass, M. P. Fitzgerald*, Publ. US Naval Obs., 21, 1, 1968.
22. *S. C. Simonson*, Ap. J., 154, 923, 1968.
23. *M. F. Walker*, Ap. J. Suppl., 2, 365, 1956.
24. *A. Guttierrez-Moreno, H. Moreno*, Ap. J. Suppl., 15, 459, 1968.
25. *E. Lindemann, B. Hauck*, Astron. Astrophys. Suppl., 11, 119, 1973.
26. *A. Blaauw*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 2, 213, 1964.
27. *O. J. Eggen*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 3, 235, 1965.
28. *А. А. Боярчук*, Изв. КрАО, 17, 89, 1957.
29. *U. Sinnerstad*, Stockholms Obs. Ann., 21, No. 6, 1961.
30. *А. А. Боярчук*, в сб. «Явления нестационарности и звездная эволюция», Наука, М., 1974, гл. 3.
31. *D. L. Crawford, J. V. Barnes, J. C. Golson*, A. J., 76, 621, 1971.
32. *S. S. Huang, O. Struve*, Ap. J., 123, 231, 1956.
33. *O. Struve, J. Sahade, C. R. Lynds, S. S. Huang*, Ap. J., 125, 115, 1957.
34. *B. N. G. Guthrie*, Publ. Roy. Obs. Edinburgh, 3, 83, 1963.
35. *D. L. Crawford*, Ap. J., 137, 523, 1963.
36. *J. Ruprecht*, Trans. IAU, 12B, 347, 1966.