М. А. КАЗАРЯН, К. В. ВАРТАНЯН

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗВЕЗД ТИПА ВОЛЬФ-РАЙЕ И O_f

Произведено спектрофотометрическое исследование некоторых, сравнительно ярких звезд Вольф-Райе и O_f, входящих в состав ассоциации вокруг Р Лебедя. Список исследованных звезд, их спектральные типы и фотовизуальные величины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Звезда	Sp	m _{pv}
HD 192103	WC7	7. ^m 94
HD 192163	WN6	7.40
HD 192639	O _f	7.02
HD 192641	WC7+Be	7.94
HD 193077	WN5+O6	7.98
HD 193576	WN6+O6	8.00

Спектрограммы получены с декабря 1965 г. по июнь 1966 г. на 8—12" телескопе системы Шмидта с объективной призмой (дисперсия у H_γ 420 Å/мм) Бюраканской обсерватории.

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ГРАДИЕНТЫ И БАЛЬМЕРОВСКИЕ СКАЧКИ

Спектрофотометрические градиенты и бальмеровские скачки определялись по методу, изложенному в [1]. Спектрофотометрический градиент относится к интервалу λ 4100—4700 Å.

В качестве звезд сравнений использовались HD 192102, 192766, 193063 и 193247. Все они принадлежат к спектральному типу A0. Калибровка спектрограмм осуществлялась по снимкам, полученным лабораторным трубочным фотометром.

Полученные спектрофотометрические градиенты исправлены за межзвездное поглощение по формуле, приведенной в [2]:

$$\Phi^{\circ} = \Phi + 0,921\bar{\lambda}(A_c - A), \quad (1)$$

где $\bar{\lambda}$ — средняя длина волны исследуемого участка в микронах (в нашем случае $\bar{\lambda} = 0,44\mu$), A_c и A — межзвездные поглощения (на $\lambda = 4400\text{\AA}$) звезды сравнения и исследуемой звезды соответственно, которые определялись по формуле П. П. Паренаго. При этом для расстояния звезд было принято расстояние ассоциации вокруг Р Лебеда 1100 пс, полученное В. А. Амбарцумяном и Б. Е. Маркаряном [3].

Для звезды HD 192639 поправка за межзвездное поглощение вычислена с помощью величины поглощения этой звезды в фотовизуальных лучах ($A_v = 1^m.98$), полученной Холлом [4].

Таблица 2

Ф, D и Φ° для звезд Вольф-Райе и Of

Звезда	Φ	T_c	D	n	Φ°	T_c°	$\bar{\Phi}$ [5]	T_{B-V}
HD 192103	1.43 ± 0.06	10500	0.11 ± 0.05	4	0.79	25000	1.51	9600
HD 192163	1.55 ± 0.09	9500	0.12 ± 0.05	9	0.91	19000	1.63	7500
HD 192639	1.46 ± 0.04	10300	0.13 ± 0.05	6	0.78	25500	—	—
HD 193077	1.68 ± 0.13	8600	0.15 ± 0.04	7	1.04	15500	1.95	7200
HD 193576	1.61 ± 0.06	9200	0.17 ± 0.07	9	0.97	17000	1.92	6300

В табл. 2 приведены результаты измерений: спектрофотометрические градиенты Φ и соответствующие им температуры T_c , бальмеровские скачки D и число измеренных спектров n (вместе с Φ и D приведены среднеквадратические ошибки градиентов и бальмеровских скачков соответственно), спектрофотометрические градиенты Φ° , исправленные за межзвездное поглощение и соответствующие им температуры T_c° . Для сравнения там же приведены спектрофотометрические градиенты $\bar{\Phi}$, вычисленные С. В. Рублевым [5], и температуры T_{B-V} . Температуры T_{B-V} вычислены нами с помощью значений $(B-V)_{cor}^{\circ}$, полученных Пайпером [6] с учетом влияния эмиссионных полос на показатель цвета $B-V$, при этом предположив, что эти звезды излучают как абсолютно черное тело.

По своему характеру T_{B-V} близки к эффективным температурам. Как и следовало ожидать, они оказались более низкими, чем спектрофотометрические температуры T_c . Из табл. 2 видно, что полученные нами спектрофотометрические градиенты близки к результатам, полученным С. В. Рублевым.

Звезда HD 193576 (V 444) является затменно переменной. Спектрофотометрические температуры этой звезды, по данным разных авторов, отличаются друг от друга в три раза. В [7] показано, что изменения спектрофотометрической температуры V 444 следует за фазой. Наблю-

дается понижение цветовой температуры в фотографической и ультрафиолетовой областях в фазе 0,4. Однако за время наших наблюдений изменения спектрофотометрической температуры не обнаружено.

Бальмеровские скачки у всех рассматриваемых звезд получаются такими, как у ранних звезд В.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИОННЫХ ПОЛОС

Относительные интенсивности эмиссионных полос исследованных звезд Вольф-Райе, кроме HD 192639, определялись по методу, описанному в [8]. Результаты вычислений приведены в табл. 3—7. Для звезд HD 192103, 192163, 192639, 193077 интенсивности эмиссионных полос определялись относительно линий 4861 H β , HeII, представляющих собой полосу линий водорода и ионизованного гелия.

Таблица 3

Интенсивности эмиссионных полос HD 192103 (W C7)

Полоса	Линия	I_{λ}	Полоса	Линия	I_{λ}
	6578 CII, CIII } 6563 HI, HeII } 6528 HeII, CIII }	6	4150—4050	4122 HeI, CIII, OV } 4113 SIII, SiIV } 4099 HI, HeII, NIII } 4076 CII, SiIV } 4066 CIII }	3
5950—5600	5876 HeI, CIII } 5816 CIV, CIII } 5759 CIII } 5696 CIII, AlIII }	30	3950—3910	3929 HeII, CII, CIV, SIII	3,0
4890—4840	4861 HI, HeII	1,0	3900—3860	3888 HeI, HeII, CIII	2
4760—4620	4686 HeII, CIV } 4653 CII, CIV, NIII } 4618 CII, NV }	36	3780—3680	3764 NIII, OIII } 3576 OIII, SIII } 3734 OIV } 3724 CIV, OIV } 3717 OIII, SIII, AlIII } 3707 HeI, OIII, SIII, AlIII } 3689 CIV }	12
4600—4530	4557 OV } 4545 HeII, NII }	1,0			
4480—4430	4482 MgII, AlIII } 4469 HeI, SIII } 4441 HeI, CIV }	2	3630—3600	3609 HeI, CIII, AlIII	4
4360—4310	4337 HI, HeII, NII, SIII } 4319 CII, CIII }	2	3590—3530	3663 CIV, OIV	7

В случае HD 193576 водородные линии были настолько слабыми, что их невозможно было отличить от флуктуаций непрерывного спектра, поэтому относительные интенсивности для этой звезды определены по отношению к полосе, близкой к 4686 HeII

Для HD 192641 относительные интенсивности определялись начиная с $\lambda > 4557$, вследствие наложения спектра другой звезды на коротковолновую часть ее спектра.

Таблица 4

Интенсивности эмиссионных полос HD 192163 (WN 6)

Полоса	Линия	J_{λ}	Полоса	Линия	J
4910—4820	6564 H α , HeII	5,3	4230—4190	4201 HeI, NIII	0,4
	4861 H α , HeII, NIII	1,0	4140—3990	4099 H α , HeII, NIII	
4740—4590	4686 HeII	7,2		4056 NIV	4024 HeI, HeII
	4635 NII, NIII		3990—3920	3970 H α , HeI, OIII, SIII	
4590—1450	4599 NV	1,0		3900—3860	3891 H α , HeI, HeII
	4541 HeII, NIII		3780—3700	3754 NIII, NIV, OIII, SIII	1
4400—4300	4512 NIII, NV, OV	0,7		3738 OIV	
	4477 HeI, OIII, NV, SIII		3520—3450		
	4392 HeI				
	4359 NIII, SIII				
	4340 H α , HeII, NIII, NV				

Таблица 5

Интенсивности эмиссионных полос HD 192641 (WC7 + Be)

Полоса	Линия	J_{λ}
5950—5710	6578 CII, CIII	6
	6563 H α , HeII	
	6528 HeII, CIII	
4900—4830	5876 HeI, CIII	5
	5816 CIV, CIII	
	5759 CIII	
4780—4640	4861 H α , HeII	1
4780—4640	4746 CII, OVI	8
	4686 HeII, CIV	
	4653 CII, CIII, CV, NII	

Таблица 6

Интенсивности эмиссионных полос HD 193077 (WN5 + O6)

Полоса	Линия	J_{λ}	Полоса	Линия	J_{λ}
4890—4840	6564 H α , HeII	2	4140—4070	4099 H α , HeII, NIII	0,7
	4861 H α , HeII, NIII	1	4070—4020	4056 NIV	
4740—4610	4686 HeII	4		4024 HeI, HeII	0,6
	4635 NII, NIII		3999 NII, NIII, OV		
4590—4470	4541 HeII, NIII	1,0		3970 H α , HeII, OIII, SIII	2
	4512 NIII, NV, OV		4010—3840	3926 HeII, NIII, SIII	
4370—4320	4477 HeI, OIII, NV, SIII	0,7		3891 H α , HeI, HeII	2
	4359 NIII, SIII		3500—3440	3857 HeII, SIII	
	4340 H α , HeII, NIII, NV			3483 NIV, OIV	2
			3457 OIII, NIV		

В дальнейших вычислениях используется отношение $J_{4686}/J_{H\beta}$. Однако при дисперсии нашей призмы линия 4686 HeII сливается с линиями 4653 CII, CV и 4618 CII, NV-углеродкой последовательности, и с линиями 4635 NII, NIII и 4559 NV-азотной последовательности.

Таблица 7
Интенсивности эмиссионных полос
HD 193576 (WN6 + O6)

Полоса	Линия	J_{λ}
4740 - 4590	4585 HeII	1
	4635 NII, NIII	
4590 - 4480	4541 HeII, NIII	0,3
	4512 NIII, NV, OV	
4140 - 4070	4099 HI, HeII, NIII	0,1
4070 - 4010	4056 NIV	0,1
	4024 HeI, HeII	
3510 - 3440	3483 NIV, OIV	0,8
	3457 OIII, NIV	

Для звезд HD 192103 и HD 192163 доля интенсивности линии 4686 HeII оценивалась отделением ее от суммарной полосы вблизи этой линии на спектрограммах, приведенных в работе Андерхилл [9]. Спектрограммы приводятся в шкале интенсивности. Поскольку эти спектры получены с довольно большой дисперсией (30 А/мм у H_{γ}), то отделение производилось достаточно легко.

Таблица 8

HD 192103 (WC7)			HD 192163 (WN6)		
$J_{\text{сум.}}$	J_{4686}	$J_{4653+4618}$	$J_{\text{сум.}}$	J_{4686}	$J_{4635+4599}$
1,0	0,2	0,8	1,0	0,7	0,3

Из табл. 8, в которой приведены результаты вычислений, видно, что доля интенсивности J_{4686} от суммарной у HD 192163 (типа WN) больше, чем у HD 192103 (типа WC), где $J_{\text{сум.}}$ у обеих звезд принята за единицу.

ЦВЕТОВЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ЛАЙМАНОВСКОГО КОНТИНУУМА, ОПТИЧЕСКИЕ ТОЛЩИНЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБОЛОЧЕК

Предполагая, что участок $\lambda < 912 \text{ \AA}$ описывается одной планковской температурой, а оптическая толщина за границей дважды ионизованного гелия больше единицы, можно найти истинную температуру звезд Вольф-Райе, комбинируя формулы Занстра и В. А. Амбарцумяна, а

также определить оптическую толщину оболочки τ_c в частотах L_c -излучения. В [10] приводится соотношение для определения T_* . Однако его можно упростить, используя, как это делает Занстра [11], значение A_i только для одной из линий водорода или ионизованного гелия, т. е.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = 0,90 \frac{J_{4686}}{J_{H\beta}} q_i A_i \frac{x_i^3}{e^{x_i} - 1}, \quad (2)$$

где

$$q_i = \frac{\text{число квантов } B_n + B_{nc}}{\text{число квантов в } H_i}. \quad (3)$$

Числовые значения q_i , хотя и слабо, но зависят от электронной температуры и определяются на основе рекомбинационной теории свечения планетарных туманностей. Они даются в виде таблицы [11] как для водородных, так и для линий ионизованного и нейтрального гелия.

При использовании линий ионизованного гелия 4684 HeII будем иметь (в предположении, что оптическая толщина оболочки звезд Вольф-Райе за границей ионизации дважды ионизованного гелия больше единицы):

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = q(4686) A(4686) \frac{x_{4686}^3}{e^{x_{4686}} - 1}. \quad (4)$$

Причем $q(4686) = 10,5$ при $T_e = 15000$.

Наконец, при использовании линий нейтрального гелия Аллер и Занстра [12] дают подобную формулу, также предполагая, что оптическая толщина за границей ионизации гелия больше единицы. В этом случае нами использовалась линия 5876 HeI, для которой $q(5876) = 9,09$. Для применения формул (2) и (4) по результатам наблюдений определялись $J_{4686}/J_{H\beta}$ и $A(4686)$.

Для звезд HD 192103 и HD 192163 в величины $J_{4686}/J_{H\beta}$ и $A(4686)$ вводились поправки согласно данным табл. 8. Те же поправки были приняты и для остальных звезд. Величины $A(5876)$ для звезд HD 192103 и HD 192163 также определялись по спектрограммам, полученным Андерхилл [9]. После того как определены T_* или T_{4686} из уравнений (2) или (4), соответственно можно вычислить τ_c с помощью формулы

$$(1 - e^{-\tau_c}) \int_{x_0}^{\infty} \frac{x^2 dx}{e^x - 1} = q(H\beta) A(H\beta) \frac{x_{H\beta}^3}{e^{x_{H\beta}} - 1}, \quad (5)$$

где $q(\text{H}_2) = 12,44$ при $T_e = 70000$. Величины $A(\text{H}_2)$ определялись для четырех звезд из наших спектрограмм, а для HD 192103 и HD 192163 они были найдены также и из спектрограмм, приведенных в табл. 9. В табл. 9 приведены вычисленные по формулам (2) и (4) температуры T_* и T_{4686} . Там же приведены температуры T_{5876} и значения T_{4686} и T_{HeI} , найденные Билсом [13] и Воронцовым-Вельяминовым [14]. В последнем столбце этой таблицы даются τ_c . Из табл. 9 видно, что значения T_{4686} , полученные нами и Билсом, как и следовало ожидать, близки к значениям T_* . Близкими оказываются также T_{5876} и T_{HeI} , значения которых гораздо меньше T_* . Это результат того, что $\tau(\text{HeI})$ за границей однажды ионизованного гелия меньше единицы.

Таблица 9
Температура T_* , T_{4686} , T_{5876} и оптические толщины τ_c для звезд Вольф-Райе

Звезда	T_*	T_{4686}	T_{5876}	T_{4686} [13]	T_{HeI} [14]	τ_c
HD 192103	66000	60000	38000	66500	33000	0.006
HD 192163	76000	74000	34000	71000	32000	0.02
HD 192641	66000	69000	—	—	—	0.005
HD 193077	55000	71000	—	—	29000	0.003
HD 193576	—	63000	—	—	29000	—

Нашей очередной задачей является определение электронной концентрации у основания оболочек звезд Вольф-Райе, исходя из полученной оптической толщины оболочек. Это можно определить с помощью ионизационной формулы водорода. Однако здесь надо учитывать относительное количество гелия и водорода, поскольку в оболочках этих звезд обильный элемент, гелий, является основным поставщиком электронов. С другой стороны, в оболочках этих звезд существование зоны дважды и однажды ионизованного гелия, а также III дает возможность определить радиус зоны дважды ионизованного гелия, r_1 , при использовании отношения интенсивностей линий ионизованного и нейтрального гелия. Затем определяется относительное количество гелия и водорода $n_{\text{He}}^0/n_{\text{H}}^0$, исходя из отношения интенсивностей ионизованного гелия и водорода.

Именно таким путем определялись r_1 и $n_{\text{He}}/n_{\text{H}}$ С. Г. Слюсаревым [15], который для расчетов этих величин приводит в работе соответствующие формулы. При наших вычислениях мы применяли эти же формулы, где использовались интенсивности линий 4542 HeII, 4686 HeII, 4471 HeI и 4861 HI. Эти интенсивности были взяты из работ Аллера [16], Билса [13] и Воронцова-Вельяминова [14]. Для некоторых звезд они были определены по спектрограммам, приведенным в работе Андерхилл [9], а также по нашим наблюдениям.

Параметры β_{ik} (доля энергии данной линии, покидающей оболочку), присутствующие в формулах, вычислялись С. Г. Слюсаревым для конкретных значений r и n_c . В нашем случае они определялись, исходя из полученных значений оптических толщин.

После определения r_1 можно найти n_1^0 — плотность нейтрального водорода у основания оболочки звезд Вольф-Райе, используя следующую простую формулу:

$$\tau_c = x_c n_1^0 \frac{r_0 r_1}{r_0 + r_1}. \quad (6)$$

Последнюю легко получить из выражения τ_c , если принять квадратичный закон убывания плотности. В формуле (6) r_0 — радиус звезды, для которой принимается $r_0 = 5 R_{\odot}$ [17]. Результаты вычислений приведены в табл. 10. Там же приводятся значения n_{He}^0 , n_{H}^0 и n_c^0 , которые определялись с помощью ионизационной формулы водорода. При этом принималось, что $T_c = T_*$, а значения T_* брались из табл. 9.

Отношение n_{He}/n_H впервые было определено В. А. Амбарцумяном [18] по интенсивностям линий 4686 HeII и HI. Согласно В. А. Амбарцумяну, $\frac{n_{He}}{n_H} > 1,8$.

При вычислении n_1^0 нужно использовать радиус зоны III, который больше r_1 , однако значение n_1^0 почти не изменяется, если вместо радиуса зоны III принимать значения, большие, чем те, которые приведены в табл. 10.

Таблица 10

Концентрации n_{He}^0 , n_H^0 , n_c^0 , n_1^0 и r_1 для звезд Вольф-Райе

Звезда	n_{He}^0/n_H^0	n_{He}^0	n_H^0	n_c^0	r_1/r_0	n_1^0
HD 192103	11	6×10^{12}	5.5×10^{11}	1.2×10^{13}	4	3.4×10^3
HD 192163	8	7×10^{12}	8.6×10^{11}	1.4×10^{13}	10	1.0×10^4
HD 192641	18	6.8×10^{12}	3.8×10^{11}	1.4×10^{13}	4	2.8×10^3
HD 193077	33	4.2×10^{12}	1.3×10^{11}	8.4×10^{12}	7	1.6×10^3

Таким образом, мы получаем, что концентрация электронов у основания оболочек звезд Вольф-Райе порядка 10^{13} см⁻³. Эта оценка электронной концентрации получается на порядок выше оценки Аллера [16].

Сравнивая спектрофотометрические температуры и температуры T_* , T_{4686} и T_{5876} (табл. 9) звезд Вольф-Райе, мы видим, что во всех случаях спектрофотометрические температуры ниже цветовых для области длин волн короче 912 А.

15 декабря 1968 г.

ՄԻ ՔԱՆԻ ՎՈՂՖ-ՌԱՅԵԻ ԵՎ ՕԲ ՏԻՊԻ ԱՍՏՂԵՐԻ
ՍՊԵԿՏՐՓՈՒՄԵՏՐԱՓԱԿԱՆ ՌԵՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Կատարված է P Կարապի շուրջը գտնվող աստղասփյուռի մի քանի
Վոլֆ-Ռայեի և Օբ տիպի աստղերի սպեկտրալուսաչափական ուսումնասիրու-
թյուն:

Որոշվել են նրանց սպեկտրալուսաչափական ջերմաստիճանները և ա-
ռաքման ջերտերի հարաբերական ինտենսիվությունները: Ջանստրայի և
Վ. Ն. Համբարձումյանի բանաձևերի կոմբինացիայով որոշվել են աստղերի
իրական ջերմաստիճանները, որոշվել են նաև L_c -ճառագայթներում թաղանթ-
ների օպտիկական խորությունները, երկու անգամ խոնացված հելիումի տի-
րությունների շառավիղները և թաղանթների հիմքերի մոտ էլեկտրոնային խո-
րությունները:

M. A. KAZARIAN, K. V. VARTANIAN

SPECTROPHOTOMETRIC INVESTIGATION OF SOME
WOLF-RAYET AND OF TYPE STARS

S u m m a r y

Spectrophotometric investigation of some Wolf-Rayet and Of type
stars in the association around P Cyg have been made.

The spectrophotometric temperatures and the relative intensities
of emission bands of these stars were obtained.

The true temperatures of these stars were obtained with the com-
bination of Zanstra's and Ambartzumian's formulae.

The optical thicknesses of the shells for L_c -radiation, the radius of
the twice ionized helium zone and the electron densities at the bottom
of the shells have been calculated as well.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. M. A. Казарян, Сообщения Бюраканской обсерватории, 39, 35, 1967.
2. В. П. Архипова, АЖ, 40, 71, 1965.
3. В. А. Ажбарцумян, Б. Е. Маркарян, Сообщения Бюраканской обсерватории, 2,
3, 1949.
4. J. S. Hall, Publication Naval observatory, 17, 1958.
5. С. В. Рублев, АЖ, 40, 100, 1963.

6. *D. M. Ruder*, *Ap. J.*, 144, 13, 1966.
7. *Н. Л. Иванова, Р. Х. Оганесян, Р. А. Епремян*, *Астрофизика*, 1, 397, 1965.
8. *Н. Л. Иванова, М. А. Казарян, Р. Х. Оганесян*, *Сообщения Бюраканской обсерватории*, 29, 25, 1961.
9. *A. V. Underhill*, *Publication Dominion Astr. observatory*, 11, 209, 1960.
10. *Г. А. Гурзядян*, *Планетарные туманности*, М., 1962.
11. *Н. Zanstra*, *BAN*, 15, 237, 1960.
12. *L. H. Aller and H. Zanstra*, *BAN*, 15, 249, 1960.
13. *C. S. Beals*, *Publication Dominion Astr. observatory*, 6, 93, 1938.
14. *Б. А. Воронцов-Вельяминов*, *АЖ*, 23, 3, 1946.
15. *С. Г. Слюсарев*, *АЖ*, 32, 346, 1955.
16. *L. H. Aller*, *Ap. J.*, 97, 135, 1943.
17. *В. А. Амбарцумян и др* *Теоретическая астрофизика*, М., 1952.
18. *В. А. Амбарцумян*, *Циркуляр Пулковской обсерватории*, № 7, 1, 1933.