

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 16

АВГУСТ, 1980

ВЫПУСК 3

УДК 629.78:523.8

О МАКРОСТРУКТУРЕ СПЕКТРОВ ГОРЯЧИХ ЗВЕЗД В УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

С. С. РУСТАМБЕКОВА

Поступила 2 ноября 1979

На основе наблюдательного материала Ориона-2 были получены новые результаты, касающиеся макроструктуры непрерывных спектров 26 горячих звезд В2—А3 в ультрафиолете, в области 2000—3700 Å. В частности, получено новое доказательство того, что депрессия непрерывного спектра в области около 2400 Å действительно неодинакова у разных звезд строго одного и того же спектрального подкласса и класса светимости и может колебаться в значительных пределах. Сама депрессия возникает в результате дополнительного поглощения в собственном околозвездном облаке [5]. Поэтому наблюдаемый разброс в величинах депрессии (глубина H_0 или эквивалентная ширина D_0) интерпретируется как разброс в мощности (оптической толщины) околозвездного облака при переходе от одной звезды к другой. Представлен список тех горячих звезд, наличие околозвездных облаков у которых можно считать вероятным.

1. *Введение.* Один из важных выводов, который был сделан на основе наблюдательного материала космических обсерваторий ОАО-2 и Орион-2, относится к макроструктуре непрерывных спектров горячих звезд в ультрафиолете, в области 2000—3000 Å; оказывается, она далеко непостоянна у всех сходных звезд и может меняться при переходе от одной звезды к другой строго одного и того же спектрального подкласса [1—3]. Позднее этот вывод получил убедительное подтверждение по данным наблюдений другой орбитальной обсерватории — TD-1 [4]. Стало очевидным, что существует неизвестный доселе источник непрозрачности, который находится либо в фотосфере звезды, либо же на пути от звезды до наблюдателя. К тому же степень самой непрозрачности может быть разной у разных звезд, а часто отсутствует вовсе.

Недавно был проведен довольно подробный количественный анализ [5], касающийся этого вопроса, в ходе которого удалось установить сле-

дующее: наблюдаемое разнообразие в макроструктуре непрерывных спектров в ультрафиолете горячих звезд является следствием дополнительно поглощения, которое испытывает выходящее из фотосферы излучение звезды в собственном околозвездном облаке. Важным моментом в этом анализе является выявление огромной роли резонансных линий, принадлежащих нейтральным и ионизованным металлам; по сути дела ими и обусловлено поглощение в облаке. Если локальная концентрация резонансных линий будет достаточно велика, то в результате их слияния могут возникнуть широкополосные депрессии в отдельных областях непрерывного спектра.

Особо примечательна депрессия непрерывного спектра в области с центром около 2400 А и шириною 100—300 А. Оказывается, максимум числа резонансных линий в огромном диапазоне длин волн, от 2000 А до 10000 А, приходится как раз на область 2300—2400 А [5]. Этим, по-видимому, следует объяснить тот факт, что именно депрессия на 2400 А является наиболее легко обнаруживаемой, а ее мощность может варьировать в дальнейшем депрессию на 2400 А в качестве индикатора для выявления околозвездного облака в каждом конкретном случае в отдельности. Следующим этапом может быть, по крайней мере в принципе, возможность определения некоторых параметров околозвездного облака по наблюдаемой мощности депрессии на 2400 А.

Настоящая работа посвящена дальнейшему анализу депрессии непрерывных спектров около 2400 А на основе однородного наблюдательного материала Ориона-2. В частности, мы ставим цель дать по мере возможности однозначный ответ на вопрос о присутствии или отсутствии околозвездного облака вокруг каждой из изученных нами 26 звезд классов В2-А3 в отдельности. Понутно будет проведено сравнение найденных нами распределений энергии в спектрах этих звезд в области 2000—3700 А с различными теоретическими моделями — Михаласа [6] в случае звезд классов В2—В9, Курукз и др. [7] — в случае А0—А3.

2. *Наблюдательный материал и его измерения.* Все 26 звезд классов В2—А3, выбранные нами для изучения, рассеяны в областях неба, внутри окружностей диаметром 5°, вокруг звезд α Aur, β Aur, γ Cas, ϵ Ori и ζ Tau. Основные данные кадров, сфотографированных в декабре 1973 г. менисковым телескопом Ориона-2 с объективной призмой, приведены в табл. 1. Список же изученных нами звезд приведен в табл. 2, где спектральные классы для 10 звезд указаны по данным [8, 9], а для остальных 16 звезд, отмеченных звездочкой, спектральные классы и классы светимости были найдены нами на основе наблюдательного материала, полученного в 1978 г. в Абастуманской обсерватории. В табл. 2 приведены также избытки цвета E (В—V) по [10], когда они имелись, и определен-

Таблица 1

ДАННЫЕ О НАБЛЮДАТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ

Область	Кадр	Экспозиция (мин)
α Aur	F 21	18.4
β Aur	F 13	15.5
γ Cas	F 16, F 17, F 18	1; 16; 2; 5
ε Ori	F 6	18
ζ Tau	F 3, F 4, F 5, F 22, F 23, F 24	11.4; 20; 1; 1.3; 16; 1.3

ные избытки цвета по имеющимся данным о показателе цвета $B-V$ и нормальному показателю цвета звезды того или иного спектрального класса [11], а также расстояния звезд, найденные по известной визуальной величине и по среднему значению абсолютной светимости [12—14]. В последнем столбце таблицы указано число спектрограмм, обработанных для данной звезды; оно колеблется от одной до шестнадцати для сравнительно ярких звезд. Среднеквадратичные ошибки в случае измерения шести спектрограмм составляют 12—15% для области 2000—2500 Å и 10—12% для 2500—3700 Å. Всего обработано и измерено 102 спектрограммы для всех 26 звезд. Микрофотометрические записи спектрограмм получены на саморегистрирующем микрофотометре ИФО-451 с 50-кратным увеличением. Характеристическая и редуционная кривые, принятые в качестве рабочих при обработке всех спектрограмм, полученных Орионом-2, взяты из [2].

Результатом наших измерений являются относительные распределения энергии в ультрафиолетовых спектрах каждой из исследованных звезд; они представлены в графической форме на рис. 1—6. Во всех случаях интенсивность излучения F_λ выражена в звездных величинах Δm_λ , причем интенсивность на $\lambda = 3200$ Å принята за единицу, то есть, $\Delta m = -2.5 \times \lg(F_\lambda/F_{3200})$. Представленные на рис. 1—6 распределения энергии уже исправлены за влияние межзвездного поглощения — либо по известной или найденной для данной звезды величине $E(B-V)$ и известной зависимости $X_\lambda = E(\lambda - V)/E(B-V)$ [15, 16], либо же в случае отсутствия $E(B-V)$, по расстоянию данной звезды и средней величине коэффициента межзвездного селективного поглощения a_λ на 1 кпс; использованные в данном случае величины a_λ затабулированы в [17].

Заметим, что предварительные результаты по нахождению распределений энергии в ультрафиолетовых спектрах шести горячих звезд из области ζ Тау ранее были представлены в [18].

3. *Обсуждение результатов измерений.* Здесь будет проведено как сопоставление найденных нами распределений энергии в ультрафиолете с

ДАННЫЕ ОБ ИССЛЕДОВАННЫХ ЗВЕЗДАХ

Область неба	Звезда HD	Спектр. класс	V	E(B - V)	r (пс)	n
ε Ori	37756	B2IV—B3V	4.93	+0.03	—	16
	36741	B2V	6.59	+0.04	—	4
	36392	B3V	7.54	+0.18	—	4
β Aur	40160	B3V*	7.2	—	500	2
ζ Tau	36589	B6V	6.01	+0.07	—	5
β Aur	40326	B6V*	8.1	—	650	2
ε Ori	37958	B8	6.67	+0.02	—	4
ζ Tau	38063	B8V*	8.7	—	440	3
β Aur	40694	B8V*	8.5	—	450	2
	40754	B8V*	8.8	—	400	2
γ Cas	41522	B8V*	8.9	—	600	2
	5408	B9V	5.55	0.00	—	4
β Aur	7157	B9	6.64	+0.07	—	6
	40830	B9V*	7.9	—	263	2
ζ Tau	41591	B9V*	8.4	—	330	2
	38192	B9V*	8.0	—	320	3
γ Cas	37939	B9V*	8.3	—	320	3
	37925	B9V*	8.4	—	330	3
ζ Tau	3519	A0	6.74	+0.03	—	6
	6382	A0	8.28	+0.16	—	3
α Aur	37740	A0V*	8.2	—	280	3
γ Cas	ГЛАКА 577**	A0V*	10.01	+0.06	—	1
β Aur	6416	A3	6.54	—	70	6
	5813	A3V*	7.1	—	120	6
β Aur	3881	A3V*	7.5	—	140	6
	41847	A3V*	7.5	—	200	2

** Оганесян О. В., Сообщ. БАО 48, 14, 1976.

теоретическими моделями, так и, даже главным образом, анализ характера депрессии непрерывного спектра около 2400 Å с целью выявления околозвездного облака, если оно существует, либо же однозначного доказательства его отсутствия вокруг данной звезды. Остановимся на каждом подклассе в отдельности.

Звезды классов B2—B3. Распределения энергии в ультрафиолете спектров четырех звезд этого класса, входящих в наш список, приведены

на рис. 1. Три из этих звезд (HD 36392, 37756, 36741) являются членами звездной ассоциации Ориона OB1 [8]; их спектральные классы и абсолютные звездные величины приведены также в [19]. Две звезды (HD 37756 и HD 36741) наблюдались также орбитальной обсерваторией TD-1; данные о распределении энергии в их коротковолновых спектрах представлены в [10] и находятся в хорошем согласии с полученными нами распределениями.

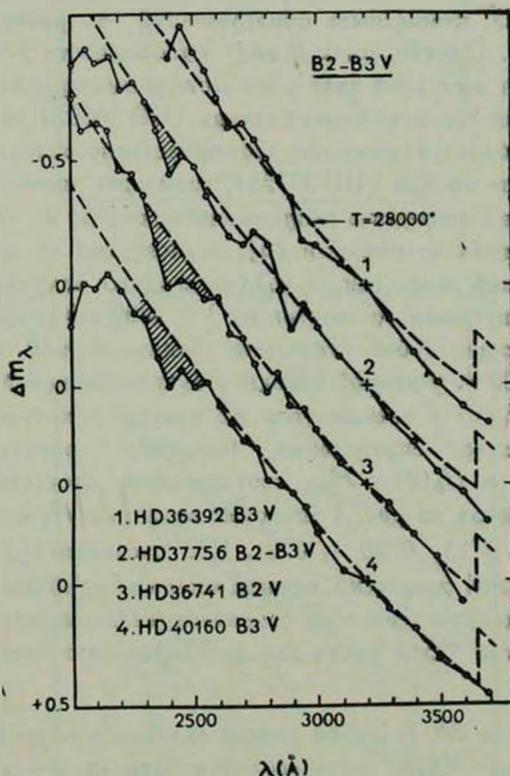


Рис. 1. Макроструктура ультрафиолетовых спектров группы из четырех звезд классов B2—B3 по данным Ориона-2.

Далее, найденные нами распределения оказались в хорошем согласии с теоретической моделью Михаласа при $T_{\text{эфф}} = 28000^\circ$ и $\lg g = 4.0$ (звезда V класса светимости) [6]. Отметим, что эта эффективная температура является несколько завышенной для звезд данного спектрального класса. Однако такое поведение, оказывается, характерно и для других звезд в Орионе [20].

Перейдем к основному вопросу — депрессии непрерывного спектра на 2400 А. Как видим, эта депрессия на рис. 1 далеко не одинакова у всех четырех звезд; она отсутствует (в пределах ошибок измерений) у первой

сверху звезды (HD 36392), становится заметной у второй звезды (HD 37756), усиливается в спектре третьей звезды (HD 36741) и достигает наибольшей величины у HD 40160 (здесь и на последующих рисунках звезды приводятся сверху вниз по мере усиления депрессии на 2400 Å).

Конечно, всем звездам, в том числе классов В2—В3, присущи некие естественные депрессии H_{\min} на 2400 Å, обусловленные поглощением излучения в их собственных фотосферах. В случае звезд В2—В3 эта депрессия не так сильна, чтобы быть обнаруженной в распределении первой звезды на рис. 1. Однако, имея в виду однородность условий получения спектрограмм для всех этих звезд, мы можем имеющуюся картину истолковать следующим образом: первая звезда (HD 36392) полностью лишена околос звездного облака, а последние две определенно обладают такими облаками. У второй же звезды (HD 37756), возможно, имеется слабое облако.

Количественно депрессию непрерывного спектра на 2400 Å можно характеризовать двумя величинами [5], зависящими от оптической толщины облака t_0 : глубиной депрессии $H_0(t_0)$ (в звездных величинах и по отношению к уровню непрерывного спектра на $\lambda = 2400$ Å) и мощностью депрессии, представляющей собой отношение эквивалентной ширины депрессии $D_0(t_0)$ на 2400 Å у данной звезды к эквивалентной ширине естественной депрессии $D_0(0)$ у звезды того же класса, у которой облако отсутствует. При таком определении, например, предельные значения $D_0(t_0); D_0(0) = 1$ и $H_0(0) = H_{\min}$ соответствуют отсутствию облака. Для последних трех звезд на рис. 1 числовые величины H_0 оказались равными соответственно 0^m15 , 0^m20 и 0^m21 . Что касается D_0 , то, не зная величину естественной депрессии, примем в первом приближении за таковую величину наблюдаемой депрессии (эквивалентной ширины) второй звезды (HD 37756). Тогда будем иметь для последних двух звезд: $D_0 = 2.2$ и 3.4 соответственно.

Звезды класса В6. В нашем списке оказалось всего две звезды этого класса; найденные нами распределения энергии в ультрафиолете в их спектрах приведены на рис. 2. Оба распределения хорошо представляются теоретической моделью при $T_{\text{эфф}} = 15700^\circ$ и $\lg g = 4$ [6]. Что касается депрессии на 2400 Å, то она довольно сильная у обеих звезд; ее глубина оказалась равной 0^m37 и 0^m42 соответственно. Не имея никаких данных о величине естественной депрессии, трудно оценить величину D_0 для каждой из них. Скорее всего у обеих звезд имеются околос звездные облака почти одинаковой мощности.

Звезды класса В8. В нашем списке имеется пять звезд этого класса; найденные распределения энергии в ультрафиолете для них представлены на рис. 3. Во всех случаях наблюдения оказались в хорошем согласии с теорией при $T_{\text{эфф}} = 12600^\circ$.

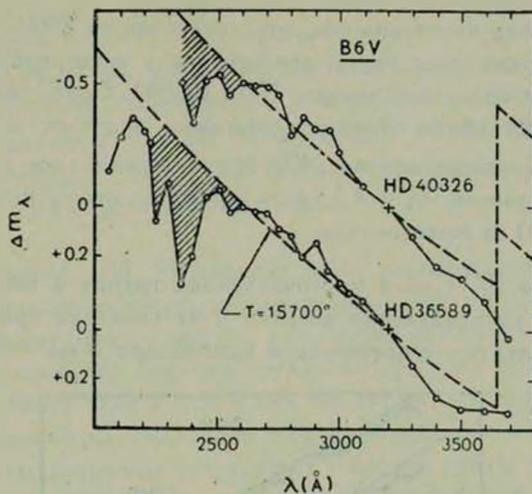


Рис. 2. Макроструктура ультрафиолетовых спектров для двух звезд спектрального класса B6 по данным Ориона-2.

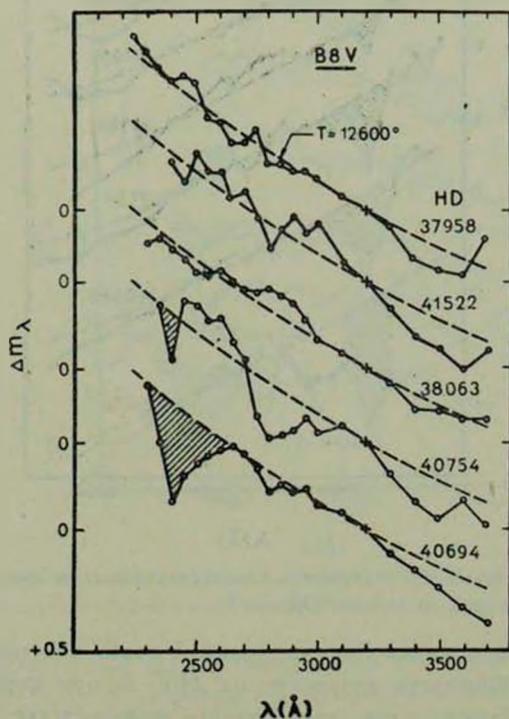


Рис. 3. Макроструктура ультрафиолетовых спектров для пяти звезд класса B8 по данным Ориона-2.

Эта группа звезд интересна тем, что депрессия на 2400 Å отсутствует вовсе в случае первых трех звезд, еле заметна у четвертой звезды и необычайно сильна у последней звезды (HD 40694). Сразу можно сказать, что как раз эта последняя обладает довольно мощным околос звездным облаком; глубина депрессии на 2400 Å у нее оказалась равной $0^m.40$, а относительная мощность $D_0 = 4.5$, если принять депрессию у четвертой звезды (HD 40754) за естественную.

Звезды класса B9. Самая многочисленная группа в нашем списке — сразу семь звезд; распределения энергии в их спектрах представлены на рис. 4, и все они следуют теоретической кривой при $T_{\text{эфф}} = 11200^\circ$. Рис. 4

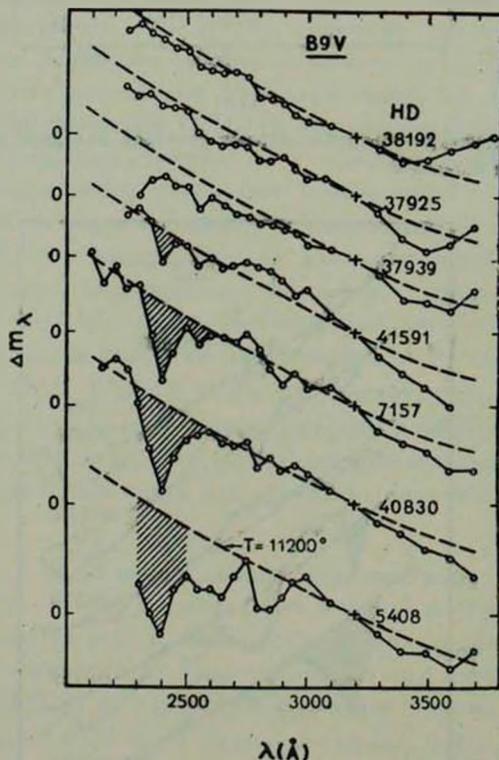


Рис. 4. Последовательность ультрафиолетовых спектров семи звезд класса B9 с меняющейся макроструктурой по данным Ориона-2.

может служить красноречивой иллюстрацией тому, как происходит плавное наращивание мощности депрессии на 2400 Å при переходе от одной звезды к другой. Вместе с тем, этот рисунок подтверждает сделанный ранее вывод об отсутствии полной однородности в макроструктуре спектров горячих звезд в ультрафиолете, у звезд одного и того же класса.

У первых сверху трех звезд, как видим, нет сколь-нибудь заметных следов депрессии на 2400 А. У третьей появляется слабый намек на нее, и, постепенно нарастая, депрессия достигает наибольшей силы у последней звезды. Глубина депрессии H_0 у последних четырех звезд оказалась равной последовательно 0^m12 , 0^m30 , 0^m35 и 0^m48 . Приняв депрессию у четвертой звезды (HD 41591) за естественную, будем иметь для D_0 : 3,8, 5,0, 8,0 для последних трех звезд.

Звезды класса A0. Найденные нами распределения энергии в спектрах пяти звезд этого класса представлены на рис. 5. Сравнение с теорией на этот раз проведено с моделью, рассчитанной Курукзом и др. [7] с учетом влияния линий поглощения металлов. Согласно наблюдений с теорией при $T_{\text{эфф}} = 10000^\circ$ и $\lg g = 4,3$, как мы видим, в общем-то неплохое. Что касается депрессии на 2400 А, то здесь картина такая же, что и в предыдущих случаях: депрессия отсутствует у первой сверху звезды, появляется она у второй — третьей звезд и достигает наибольшей силы у последней, где $H_0 = 0,34$.

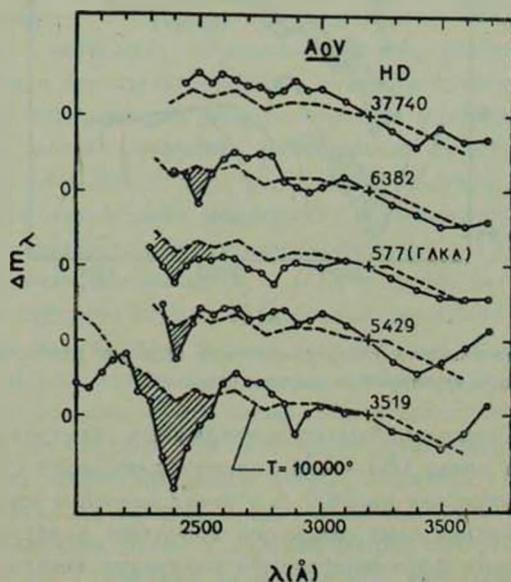


Рис. 5. Последовательность ультрафиолетовых спектров для пяти звезд класса A0 с меняющейся макроструктурой по данным Ориона-2.

Звезды класса A3. Для четырех звезд этого класса найденные нами распределения (рис. 6) оказались в неплохом согласии с этой же моделью [7] при $T_{\text{эфф}} = 8800^\circ$ и $\lg g = 4,3$; отклонения носят локальный характер, хотя и трудно сейчас дать объяснение этому. Звездам класса A3,

судя по теоретической модели, присуща довольно мощная естественная депрессия на 2400 Å, вызванная поглощением в самой фотосфере звезды. Наши наблюдения также указывают на наличие сильной депрессии в этом месте у всех четырех звезд. Что касается самих отклонений между наблюдаемыми и теоретическими депрессиями, то они не так уж велики у последней звезды (HD 41847), чтобы можно было говорить с определенностью о наличии или отсутствии околосветных облаков вокруг этих звезд. Однако некоторая, хотя и слабая, тенденция наращивания депрессии при переходе от первой звезды к четвертой все-таки заметна. По-видимому, у этой последней не очень мощное околосветное облако все-таки есть.

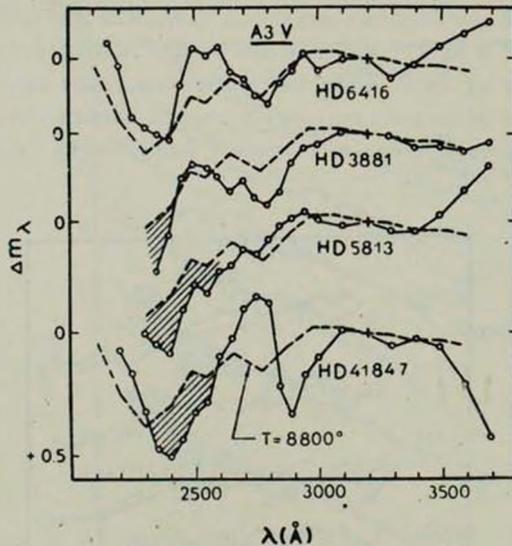


Рис. 6. Последовательность ультрафиолетовых спектров для четырех звезд класса А3 с меняющейся макроструктурой по данным Орiona-2.

4. *Некоторые выводы.* Анализ непрерывных спектров в ультрафиолете для 26 горячих звезд (В2—А3) подтверждает ранее сделанный вывод о непостоянстве депрессии на 2400 Å у звезд одного и того же спектрального класса. Поскольку сама депрессия возникает в результате дополнительного поглощения фотосферического излучения звезды при прохождении через собственное околосветное облако, то наблюдаемый разброс в величинах мощности депрессии на 2400 Å у звезд одного и того же спектрального класса следует истолковывать как свидетельство присутствия вокруг этих звезд облаков с существенно разными мощностями.

У некоторых звезд облака могут отсутствовать вовсе. В табл. 3 представлен список тех звезд, у которых присутствие околосветных облаков не вызывает сомнения.

Таблица 3

ЧИСЛОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕПРЕССИИ (H_0 и D_0)
НА 2400 А ДЛЯ ЗВЕЗД, ОБЛАДАЮЩИХ ОКОЛОЗВЕЗДНЫМИ
ОБЛАКАМИ

Звезда HD	Спектр. класс	H_0	D_0
36741	B2	0.20	2.2
40160	B3	0.21	3.4
40326	B6	0.37	—
36589	B6	0.42	—
40694	B8	0.40	4.5
7157	B9	0.30	3.8
40830	B9	0.35	5.0
5408	B9	0.48	8.0
3519	A0	0.34	4.0
41847	A3	0.20:	1.1:

Конечно, общее число звезд, проанализированных нами (на основе наблюдательного материала Ориона-2), далеко недостаточно для того, чтобы можно было бы сделать выводы статистического характера, однако, имея в виду однородность использованного материала и случайность подборки звезд, можно допустить возможность присутствия достаточно мощных облаков по крайней мере у половины горячих звезд.

Что касается нахождения физических и геометрических параметров околозвездных облаков по методу, предложенному в [5], и по наблюдаемым характеристикам депрессии H_0 и D_0 (табл. 3), то это задача особая и ее следует рассмотреть отдельно. Основная трудность здесь предвидится в нахождении нуля-пункта, то есть величины «естественной» депрессии на 2400 А для каждого подкласса в отдельности, что требует привлечения наблюдательного материала в большем количестве, либо же более детальный учет линий поглощения при построении теоретических моделей.

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую благодарность Р. А. Бартая за помощь в получении наземного наблюдательного материала с целью спектральной классификации интересующих нас звезд и профессору Г. А. Гурзядяну за интересные дискуссии, имевшие место при выполнении настоящей работы.

ON THE MACROSTRUCTURE OF SPECTRA OF HOT STARS
IN ULTRAVIOLET

S. S. RUSTAMBEKOVA

New results based on the observational material of Orion-2 concerning the macrostructure of continuous spectra in ultraviolet (2000—3000 Å) for 26 hot stars (B2—A3) are presented. Particularly, an additional evidence is received confirming the non-constant character of continuous spectra depression near 2400 Å; its magnitude may be quite different on stars strongly of one and the same spectral and luminosity classes. The depression originates as a result of additional absorption of stellar radiation in its own circumstellar cloud [5]. Hence, the observed variety in the magnitudes of the depression (depth H_0 or equivalent width I_0) may be interpreted as a scatter in the power (optical depth) of circumstellar cloud around different stars. A list of hot stars possessing circumstellar clouds with a high probability is presented.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Gros, D. Sucotte, F. Praderie, R. M. Bonnet, *Astron. Astrophys.*, 27, 167, 1973.
2. Дж. Б. Оганесян, *Сообщ. Бюраканской обс.*, 48, 68, 1976.
3. А. С. Акопян, *Сообщ. Бюраканской обс.*, 48, 197, 1976.
4. A. B. Underhill, K. A. van der Hucht, *Astron. Astrophys.*, 54, 393, 1977.
5. Г. А. Гурздян, С. С. Рустамбекова, *Astrophys. Space sci.*, 69, 269, 1980.
6. D. Mihalas, *Ap. J., Suppl. ser.*, 9, No. 92, 321, 1965.
7. R. L. Kurucz, E. Peytremann, E. H. Avrett, *Blanketed Model Atmospheres for Early Type Stars*, Smithsonian Institution Press, Washington, 1974.
8. W. H. Warren, Jr. J. E. Hesser, *Ap. J. Suppl. ser.*, 34, No. 2, 115, 1977.
9. V. M. Blanco, S. Demers, G. G. Douglass, M. P. Fitzgerald, *Publ. U. S. Naval Obs.*, second ser., 1968, p. 21.
10. C. Jamar, H. D. Macau, G. L. Thompson, L. Houziaux, R. Wilson, *Ultraviolet Bright Star Spectrophotometric Catalogue*, ESA, SR-27, 1967.
11. В. Л. Страйжис, *Многоцветная фотометрия звезд*, Изд. Моклас, Вильнюс, 1967, стр. 105.
12. C. W. Allen, *Astrophys. Quant.* The Athlone Press, 1973, p. 200
13. A. Slettebak, *Ap. J.*, 138, No. 1, 118, 1963.
14. D. C. Morton, T. F. Adams, *Ap. J.*, 151, 611, 1967.
15. K. Nandy, G. I. Thompson, C. Jamar, A. Monfils, R. Wilson, *Astron. Astrophys.*, 44, 195, 1975.
16. A. D. Code, J. Davis, R. C. Bless, R. Hanbury Brown, *Ap. J.*, 203, 417, 1176.
17. Г. А. Гурздян, Р. Х. Оганесян, *Астрофизика*, 11, 397, 1975.
18. С. С. Рустамбекова, *Сообщ. Бюраканской обс.*, 48, 101, 1976.
19. A. Helmut, H. A. Abt, H. Levato, *P.A.S.P.*, 89, 797, 1978.
20. R. E. Schild, F. Chaffee, *Ap. J.*, 169, 529, 1971.