

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХГИГАНТА O3If Cyg OB2 №7 ПО СПЕКТРАМ УМЕРЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

О.В.МАРЬЕВА¹, Р.Я.ЖУЧКОВ²

Поступила 18 мая 2012

Принята к печати 22 июня 2012

Мы рассмотрели возможность использования спектров с умеренным спектральным разрешением для определения параметров атмосфер горячих звезд с помощью численного моделирования. В качестве пробного объекта мы выбрали звезду Cyg OB2 №7 и провели ее спектроскопию на Российско-Турецком телескопе РТТ150 ($\lambda/\Delta\lambda = 2500$). С помощью кода SMFGEN была построена модель атмосферы Cyg OB2 №7. Мы впервые зарегистрировали в спектре Cyg OB2 №7 линии NIV $\lambda\lambda 7103.2 - 7129.2$ и использовали их для определения физических параметров в ветре. Темп потери массы, измеренный по линии Na, выше темпа потери массы, измеренного по ветровым линиям, что говорит о неоднородности ветра, вызванной, по-видимому, вращением.

Ключевые слова: *атмосферы звезд; фундаментальные параметры; звезды ранних типов; Cyg OB2 №7*

1. **Введение.** Благодаря внеатмосферным наблюдениям, еще в 60-е годы XX в. в ультрафиолетовых спектрах O-звезд были обнаружены линии с P Cyg профилем, свидетельствующие о наличии сверхзвукового ветра. Это открытие позволило оценить темп потери массы за счет звездного ветра. Дальнейшие исследования показали, что массивные звезды ($> 50 M_{\odot}$) в виде ветра теряют существенную часть своего вещества (почти половину) на стадии Главной Последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рассела. Со временем ветровые линии (или детали профилей) были обнаружены и в видимом диапазоне при наземных наблюдениях с высоким спектральным разрешением.

Следующим важным шагом для астрофизики стало открытие нового метода определения расстояний - использование отношения светимости звезды к ветровому моменту (см. [1], - так называемый WLR-метод ("wind momentum-luminosity relation")). Но, как показывает мониторинг спектров избранных O-сверхгигантов, ветры горячих звезд неоднородны и переменны во времени (см., например, [2]). Поэтому в задаче определения светимостей важно получить средние, статистически достоверные характеристики ветровых деталей в спектрах немногочисленных O-сверхгигантов. Значительная доля этих звезд доступна наблюдениям только с умеренным спектральным разрешением. Кроме этого, следует иметь в виду, что коротковолновые

спектры могут быть ослаблены за счет межзвездного и околозвездного поглощения.

В данной работе предпринята попытка моделирования избранных линий в наиболее доступном варианте наблюдений - с умеренным спектральным разрешением, в красном диапазоне длин волн. В качестве тестового объекта выбран сверхгигант O3If. Суг OB2 №7, спектр которого в синей части имеет значительное покраснение ($A_v = 5.4$ [3]). Благодаря тому, что звезда входит в ассоциацию Суг OB2 [4, 5], мы можем получить независимую оценку светимости.

В следующем разделе мы опишем данные наблюдений и их обработку. В разделе 3 расскажем о построении модели, обсудим полученные результаты и сравним их с предыдущими работами. Выводы изложены в разделе 4.

2. Наблюдения и обработка данных. В феврале-марте 2012г. были проведены наблюдения Суг OB2 №7 на 1.5-м Российско-Турецком телескопе RTT150, установленном на горе Бақырлытепе (высота 2500 м) в Турции, национальная обсерватория ТЮБИТАК. Спектр в широком диапазоне длин волн ($4200 + 8000 \text{ \AA}$) был получен на подвесном приборе TFOSC (TUBITAK Faint Object Spectrograph and Camera¹) в фокусе Кассегрена. Спектральное разрешение $\lambda/\Delta\lambda = 2500$. В суммарном спектре отношение сигнала к уровню шумов $S/N = 100$ для синего участка (5000 \AA) и 200 для красной области (7000 \AA). Как было сказано выше, спектр объекта сильно поглощен в коротковолновом диапазоне. Для уверенного моделирования слабых линий требуется довольно высокое (более 100) отношение S/N , что, в нашем случае, реализовывалось только для красной области спектра с $\lambda > 5000 \text{ \AA}$. В этой области мы и будем рассматривать спектр.

Редукция и обработка производилась стандартным образом в пакете DECH [6].

В полученном спектре наблюдаются эмиссионные линии: CIV $\lambda\lambda 5801.3$, 5812, NIV $\lambda\lambda 6214$, 6219. А также, мы впервые зарегистрировали в спектре Суг OB2 №7 линии - NIV $\lambda\lambda 7103.2 - 7129.2$, которые возникают при переходе из состояния $1s^2 2s 3d$ в $1s^2 2s 3p$. Эти эмиссионные линии характерны для спектров ранних звезд Вольфа-Райе азотной последовательности (WN) и используются для спектральной классификации WN. По опубликованным спектрам O-звезд в области $7000 + 8000 \text{ \AA}$ можно сделать вывод, что NIV $\lambda\lambda 7103.2 - 7129.2$ присутствуют только в спектрах сверхгигантов O2 - O5. Как показывают модельные расчеты, эти линии формируются при $T > 38000 \text{ K}$ [7].

3. Результаты моделирования. Для определения физических параметров атмосферы Суг OB2 №7, мы использовали программу CMFGEN, созданную J.D.Hillier [8]. В этой программе уравнения переноса в сфери-

¹ www.iug.tubitak.gov.tr/rtr150_tfosc.php

чески расширяющейся среде решаются или в соболевском приближении, или в сопутствующей системе координат (CoMoving Frame приближение). В CMFGEN учитывается покровный эффект, Оже-ионизация, клампинг (мелкомасштабная неоднородность среды). Для каждой модели задается гидростатический радиус звезды R_* , светимость L_* , масса M , темп потери массы \dot{M} , терминальная скорость ветра v_∞ и содержание элементов Z_i .

В качестве исходной модели мы взяли модель звезды AV 83 (O7 Iaf), рассчитанную в работе Hillier et al. [9], и стали плавно изменять параметры L_* , R_* и \dot{M} .

В наших расчетах мы полагали, что:

- Объемный филлинг фактор f_∞ , величина характеризующая неоднородность среды, как и в исходной модели, равен 0.1.
- Скорость ветра изменяется с радиусом по β -закону и $v_\infty = 3080$ км/с (значение взято из работы Nettero et al. [10]).
- В атмосфере содержатся H, He, C, N, O, S, Si, P и Fe.
- Содержание S, Si, P и Fe - солнечное.
- Содержание H, He, C, N, O - такое же, как в исходной модели ($[X(N)/X(N)_\odot] \sim 3$, $[X(C)/X(C)_\odot] \sim 0.08$, $[X(O)/X(O)_\odot] \sim 0.09$).

Для точного определения светимости, мы использовали фотометрические данные. Рассчитанный модельный спектр мы сначала пересчитывали на расстояние до ассоциации Cyg OB2 (1.5 кпк [11]), а затем добавляли межзвездное поглощение с помощью программы fm-unred (W.Landsman), которая использует кривые поглощения, построенные в работе Fitzpatrick

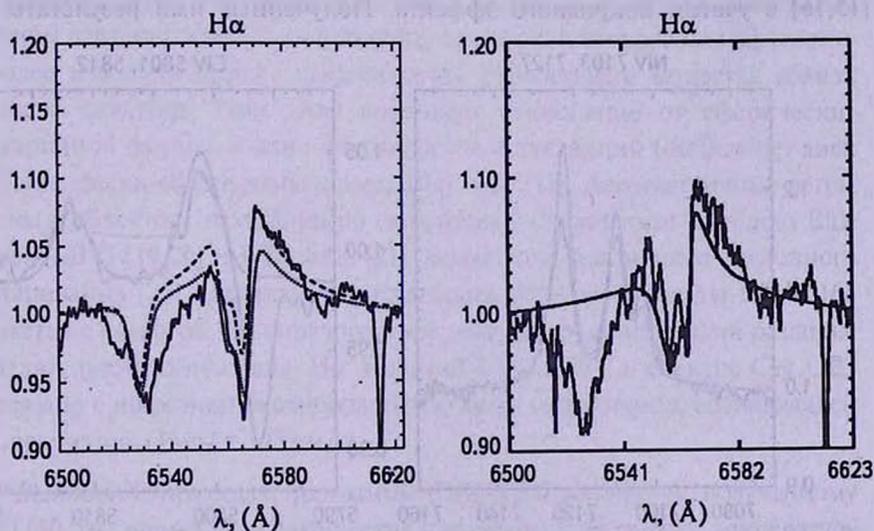


Рис.1. Слева: сравнение наблюдаемого профиля $H\alpha + HeII$ 16560 (сплошная линия) с моделями, полученными в данной работе. Пунктирная линия - модель с $\beta=1$ и $\dot{M}_d = 2 \times 10^{-6} M_\odot/\text{год}$, штриховая - модель с $\beta=1$ и $\dot{M}_d = 2.5 \times 10^{-6} M_\odot/\text{год}$. Слева от $H\alpha$ наблюдается еще одна линия $HeII$ 16527, справа - DIB $\lambda 6113$. Справа: сравнение теоретического и наблюдаемого профиля $H\alpha + HeII$ 16560 из работы [14].

[12]. $A_\nu = 5.4$, эта величина взята из работы [3]. После чего расчетные спектры мы сворачивали с кривой пропускания фильтра V и сравнивали с наблюдаемой m_ν ($m_\nu = 10^{m.5}$ [13]).

В результате, для описания наблюдаемого спектра (профиль $\text{Na} + \text{HeII} \lambda 6560$) мы построили модель с $L_* = (1.1 \pm 0.1) \times 10^6 L_\odot$, $R_* = 16.5 R_\odot$, $T_* = 44 \pm 1 k K$, $\beta = 1$. R_* - радиус звезды, соответствующий внутренней границе атмосферы, расположенный, приблизительно на $\tau \sim 20$. T_* - эффективная температура на радиусе R_* , связанная со светимостью соотношением $L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T_*^4$. Темп потери массы $\dot{M}_{cl} = (3 \pm 0.5) \times 10^{-6} M_\odot / \text{год}$. Неклампированный темп потери (\dot{M}_{uncl}) массы связан с клампированным (\dot{M}_{cl}) соотношением: $\dot{M}_{uncl} = \dot{M}_{cl} \cdot f^{-1/2}$.

На рис.1 показано сравнение расчетного и наблюдаемого профиля $\text{Na} + \text{HeII} \lambda 6560$. Скорость вращения звезды $V \sin I = 105 \text{ км/с}$ [14]. Для того чтобы учесть вращение звезды и спектральное разрешение прибора ($\Delta\lambda = 2 \text{ \AA}$), мы свернули расчетный спектр с гауссианой, полуширина (FWHM) которой равна 2.65 \AA .

Однако, для того чтобы описать профили ветровых линий CIV $\lambda\lambda 5801.3, 5812$ и NIV $\lambda\lambda 7103.2 - 7129.2$, нам пришлось построить модель с более пологим скоростным законом $\beta = 2$ (рис.2) и более низким темпом потери массы $\dot{M}_{cl} = (3 \pm 2) \times 10^{-7} M_\odot / \text{год}$.

Сравним полученные результаты с предыдущими исследованиями Cug OB2 №7. Нептего et al. [14] исследовали спектр Cug OB2 №7 в широком диапазоне длин волн ($4000 + 6700 \text{ \AA}$) с помощью программы FASTWIND [15,16] с учетом покровного эффекта. Полученные ими результаты для

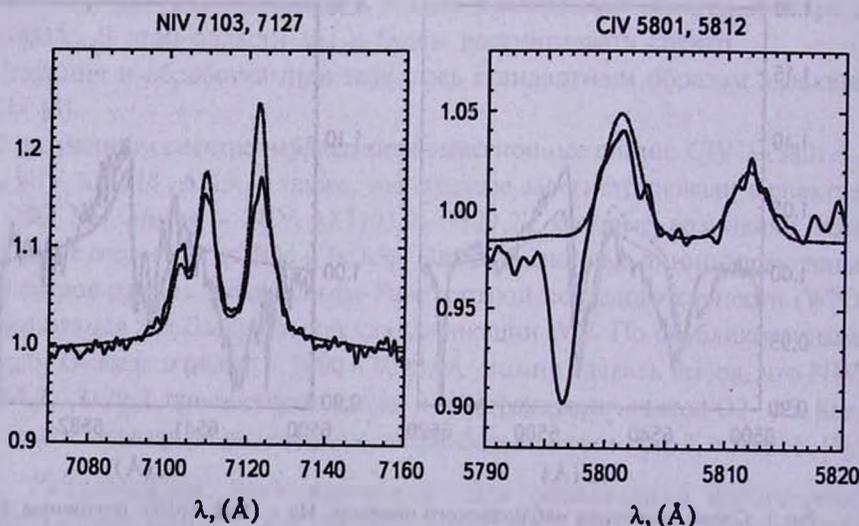


Рис.2. Слева приведен профиль NIV $\lambda\lambda 7103.2 - 7129.2$, справа - CIV $\lambda\lambda 5801.3, 5812$. Наша модель ($\beta = 2$, $\dot{M}_{cl} = 6 \times 10^{-7} M_\odot / \text{год}$) показана штрихпунктирной линией. В наблюдаемом спектре присутствуют DIB $\lambda\lambda 5797.03, 5809.10$.

линии $H\alpha$ приведены справа на рис.1. В табл.1 собраны параметры наших моделей и параметры, полученные в работе [14]. $R_{2/3}$ - радиус, на котором оптическая глубина τ становится равной 2/3, $T_{\text{эф}}$ - эффективная температура объекта на $R_{2/3}$ (при гипотезе лучистого равновесия). Мы видим, что наши

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

	T_e [кК]	R_e [R_{\odot}]	$T_{\text{эф}}$ [кК]	$R_{2/3}$ [R_{\odot}]	L_e [$10^4 L_{\odot}$]	$\dot{M}_{\text{мисл}}$ [$10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$]	v_{∞} км/с	β
Модель 1 $H\alpha$	45	16.5	44.5	17	1	7.9	3080	1
Модель 2 NIV, CIV	45	16.5	44.5	17.3	1	0.95	3080	2
Cyg OB2 №7*	45.5	14.6			0.813	9.86	3080	0.9

* Эти данные взяты из работы [14].

оценки, полученные по линии $H\alpha$, хорошо согласуются с измерениями [14]. Стоит отметить, что в работе [14] моделирование азотных и углеродных эмиссионных линий не проводилось. Таким образом, обнаруженное нами различие в параметрах, определенных по линии $H\alpha$ и ветровым линиям, не противоречит предыдущим работам.

Вращение звезд ранних типов, ветры которых сформировались под действием давления излучения в линиях, приводит к интересным эффектам. Наиболее известен эффект накапливания оттекающего вещества вблизи плоскости экватора. При этом возникает отклонение от сферически-симметричной формы, и даже формируется истекающий (outflowing) диск [17]. Такие диски обнаружены у звезд В[e] и Be [18]. Асимметричные ветры найдены у объектов, эволюционно связанных с O-звездами: Luminous Blue variables (LBV) [19,20] и WR-звезд [21]. Более того, с помощью численного моделирования [22] показали, что плотность ветра ρ_{WR} звезды HD 45166 изменяется с широтой. Мы предполагаем, что обнаруженное нами различие в моделях, построенных для $H\alpha$ и линий CIV и NIV в спектре Cyg OB2 №7, связано с широтной неоднородностью ветра сверхгиганта, возникающей из-за вращения ($V \sin I = 105$ км/с).

4. **Выводы.** С помощью программы CMFGEN по спектру, полученному на РТТ150, мы определили физические параметры (светимость, температуру и темп потери массы) одной из самых горячих звезд нашей Галактики Cyg OB2 №7. Атмосфера объекта обогащена азотом. Мы показали, что ветер Cyg OB2 №7 неоднородный. Cyg OB2 №7 - еще одна звезда, у которой обнаружена зависимость плотности ветра от широты.

Хорошее согласие параметров Cyg OB2 №7, определенных в данной работе, с параметрами, измеренными по спектрам в более широком диапазоне длин волн [14], говорит о том, что, применяя надежные коды, такие как CMFGEN, по спектрам умеренного разрешения в красной области можно достаточно точно оценивать параметры атмосфер горячих звезд. В спектрах горячих звезд в красной области присутствуют линии, формирующиеся в звездном ветре. Таким образом, при наличии матрицы, чувствительной в красном диапазоне, спектры умеренного разрешения можно использовать не только для исследования сильных фотосферных линий, но и для изучения ветровых особенностей, при мониторинге спектральной переменности.

О.Марьева благодарит John D.Hillier за его прекрасную программу CMFGEN, которая применялась для анализа данных, а также С.В. Карпова за помощь в проведении расчетов. Работа О.М. поддержана программой "Кадры" (госконтракт 14.740.11.0800) и Российским Фондом Фундаментальных исследований (грант РФФИ-11-02-00319-а). Р.Ж. благодарит за поддержку Российский Фонд Фундаментальных исследований (грант РФФИ-10-02-01145), ТЮБИТАК и КФУ за частичную поддержку в использовании РТТ-150.

¹ Специальная астрофизическая обсерватория,
Россия, e-mail: olga.maryeva@gmail.com

² Кафедра астрономии и космической геодезии Казанского
(Приволжского) федерального университета,
Россия, e-mail: zhr@ksu.ru

MEDIUM RESOLUTION OPTICAL SPECTROSCOPY OF O3If Cyg OB2 №7

O.V.MARYEVA¹, R.Ya.ZHUCHKOV²,

We considered a possibility of using medium resolution spectroscopy for studies of extremely luminous stars. We chose Cyg OB2 №7 as a test object and obtained its spectrum at Russian - Turkish telescope RTT150 ($\lambda/\Delta\lambda = 2500$). Using the radiative transfer code CMFGEN, we determined the physical parameters of the stellar atmosphere. We first detected NIV $\lambda\lambda 7103.2 - 7129.2$ lines in the spectrum of Cyg OB2 №7. These lines were used to estimate of physical conditions at the wind. The mass loss rate determined from H α is higher than the rate determined using winds lines. It is evidence of hetero-

geneous of wind, which is created by rotating.

Key words: *stars:atmospheres:early-types stars:fundamental parameters - individual:Cyg OB2 №7*

ЛИТЕРАТУРА

1. *R.P.Kudritzki, J.Puls, D.J.Lennon et al.*, *Astron. Astrophys.*, 350, 970, 1999.
2. *S.P.Owocki*, *Astrophys. Space Sci.*, 221, 3, 1994.
3. *D.C.Kiminki, H.A.Kobulnicky, K.Kinemuchi et al.*, *Astrophys. J.*, 664, 1102, 2007.
4. *V.G.Klochkova, E.L.Chentsov, A.S.Miroshnichenko*, in *Proceedings of the International Astronomical Union "Active OB stars:structure, evolution, mass loss and critical limits"* 272, 400, 2011.
5. *V.G.Klochkova, E.L.Chentsov*, *Astron. Rep.*, 48, 1005, 2004.
6. *Г.А.Галазутдинов*, DECH 2.0, Препринт Специальн. астрофиз. обсерв., 1996.
7. *O.V.Maryeva, V.G.Klochkova, E.L.Chentsov*, отправлена в печать.
8. *D.J.Hillier, D.L.Miller*, *Astrophys. J.*, 496, 407, 1998.
9. *D.J.Hillier, T.Lanz, S.R.Heap et al.*, *Astrophys. J.*, 588, 1039, 2003.
10. *Herrero, J.Puls, L.J.Corrал et al.*, *Astron. Astrophys.*, 366, 623, 2001.
11. *A.M.Mel'nik, A.K.Dambis*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 400, 518, 2009.
12. *E.L.Fitzpatrick*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 111, 63, 1999.
13. База данных Simbad, <http://http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
14. *Herrero, J.Puls, F.Najarro*, *Astron. Astrophys.*, 396, 949, 2002.
15. *A.E.Santolay-Rey, J.Puls, A.Herrero*, *Astron. Astrophys.*, 323, 488, 1997.
16. *J.Puls*, *Astron. Astrophys.*, 435, 669, 2005.
17. *Henny J.G.L.M.Lamers, Joseph P.Cassinelli*, *Introduction to Stellar Winds*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, June 1999.
18. *F.-J.Zickgraf, B.Wolf, O.Sihal et al.*, *Astron. Astrophys.*, 143, 421, 1985.
19. *J.H.Groh, D.J.Hillier, A.Damineli*, *Astrophys. J.*, 638, L33, 2006.
20. *J.H.Groh, T.I.Madura, S.P.Owocki et al.*, *Astrophys. J.*, 716, L223, 2010.
21. *T.J.Harries, D.J.Hillier, I.D.Howarth*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 296, 1072, 1998.
22. *J.H.Groh, A.S.Oliveira, J.E.Steiner*, *Astron. Astrophys.*, 485, 245, 2008.