

УДК 524.423-355/17

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА СВЕРХГИГАНТА Cyg OB2 №7

© 2013 О. В. Марьева*, В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 25 августа 2012 года; принята в печать 24 сентября 2012 года

Приведены результаты моделирования спектра сверхгиганта O3 If* Cyg OB2 №7 в широком диапазоне длин волн. В отсутствие предположения о локальном термодинамическом равновесии определены физические параметры и химический состав атмосферы. В атмосфере наблюдается избыток азота $X(N)/X(N)_{\odot} = 3.2$ и недостаток углерода и кислорода $X(C)/X(C)_{\odot} = 0.08$, $X(O)/X(O)_{\odot} = 0.09$. Линии в спектре объекта разделяются на три группы, описать которые единой моделью не удается. Модели, описывающие каждую из этих групп, различаются темпом потери массы и законом изменения скорости ветра. Таким образом, с помощью численного моделирования получены указания на неоднородность ветра. Кроме того, в данной работе рассмотрены особенности использованной программы CMFGEN, исследована чувствительность результатов расчетов к изменению различных параметров.

Ключевые слова: *звёзды: химсостав—звёзды: ветер, истечение вещества—звёзды: сверхгиганты—звёзды: индивидуальные: Cyg OB2 №7*

1. ВВЕДЕНИЕ

Массивные горячие звезды — одна из важных составляющих звездного населения. Теряя массу в виде мощного звездного ветра и взрываясь как сверхновые в конце своей жизни, O-звезды влияют на динамическую и химическую эволюцию родительских галактик. Они являются основным источником фотонов, ионизирующих окружающую межзвездную среду. Так как массивные звезды являются прародителями звезд Вольфа-Райе (WR) и голубых переменных звезд высокой светимости (Luminous Blue Variables, LBV), исследуя O-звезды, мы получаем возможность проверить справедливость существующих эволюционных теорий. Надежное определение параметров массивных горячих звезд важно для понимания происходящих в них процессов, для уточнения теории звездных ветров, индуцированных давлением излучения, для исследования межзвездной среды и других астрофизических задач.

В двухтысячных годах начался новый этап в развитии теории звездных атмосфер. Это связано как с беспрецедентным ростом количества и качества спектрофотометрических данных, так и с многократным увеличением мощности вычислительных машин и разработкой эффективных и надежных численных методов. Кроме того, благодаря проектам “Opacity Project” [1], “IRON Project” [2–4] и “OPAL” [5, 6] значительно

улучшилась точность атомных данных и увеличился их объем.

До начала XXI века для исследований O-звезд использовались плоско-параллельные модели атмосфер. Хотя в таких моделях не учитывались эффекты, связанные со сферичностью атмосферы, но по тщательно отобранным линиям можно было измерить фундаментальные параметры O-звезд. При этом спектральные линии, формирующиеся в ветре, оставались неописанными. В результате, к началу XXI века накопился целый ряд нерешенных проблем [7]. Вот некоторые из них.

- Как и при моделировании более холодных звезд, не все линии He I удавалось описать численно. Для устранения некоторых расхождений между наблюдениями и результатами моделирования стали учитываться дилуция [8] и микротурбулентная скорость [9, 10].
- Массы звезд, полученные при моделировании спектров, оказались значительно ниже ожидаемых эволюционных масс [11]. Различие в основном связано с ошибками в оценках поверхностной гравитации. Учет сферичности атмосферы, покровного эффекта¹

¹Покровный эффект или бланкетирование — влияние поглощения за счет связанно-связанных переходов на физическое строение звездной атмосферы и спектр выходящего излучения.

*E-mail: olga.maryeva@gmail.com

и ветра сократил различие, но полностью не устранил его.

- Некоторые важные для определения параметров атмосферы линии формируются в основании ветра и подвержены влиянию пространственного распределения скорости ветра [12–14]. Особенно сильно это влияние проявляется в плотных ветрах Of-звезд [15].
- Даже вблизи Главной последовательности у звезд наблюдается повышенное содержание гелия [11]. Очевидно, что для точного определения доли He необходимы более сложные модели.

Многочисленные работы, посвященные исследованию O-звезд, показали, что модели нужно строить с учетом:

- значительного отклонения от локального термодинамического равновесия (ЛТР),
- наличия сильного оттока массы в виде звездного ветра,
- покровного эффекта.

К настоящему времени разработано несколько компьютерных программ, предназначенных для построения моделей с учетом вышеперечисленных эффектов, — CMFGEN [16], FASTWIND [17, 18], WM-BASIC [19], POWR [20, 21], TLUSTY [22].

Данная работа посвящена исследованию одной из самых горячих звезд нашей Галактики Cyg OB2 №7, классифицированной как O3 If_{*} (индекс f_{*} означает, что в спектре объекта линия He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ наблюдается в эмиссии, а эмиссионная линия N IV $\lambda 4058 \text{ \AA}$ сильнее, чем комплекс линий N III $\lambda \lambda 4634, 4640, 4642 \text{ \AA}$ [23]). По данным каталога Sota et al. [24], в нашей Галактике известно пять Of_{*} звезд: Cyg OB2 №7, Cyg OB2 №22, HD 93129 AaAb, Pismis 24-1AB и Pismis 24-17. Изучаемая звезда принадлежит ассоциации Cyg OB2, исследования ярчайших звезд которой проводятся на 6-метровом телескопе БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН (САО РАН) с 2001 года [25–27]. Стоит отметить, что сверхгиганты O3–O5 — ключевые объекты для описания эволюции этой ассоциации.

В данной работе мы проводим моделирование спектра *Cyg OB2 №7* с помощью кода CMFGEN [16] в широком диапазоне длин волн. Для этого мы используем как уже опубликованные спектры в ультрафиолетовом (УФ) и инфракрасном (ИК) диапазонах, так и вновь полученные на БТА в оптическом диапазоне.

В следующем Разделе 2 описаны данные наблюдений Cyg OB2 №7 и способы обработки. В Разделах 3 и 4 рассказывается об особенностях кода CMFGEN и рассматривается чувствительность модельных спектров к изменению различных параметров. О сравнении модельных и наблюдаемых спектров речь пойдет в Разделе 5, а в Разделе 6 проводится обсуждение полученных результатов и сопоставление их с результатами ранее опубликованных работ.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Один из спектров Cyg OB2 №7 получен в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА САО РАН с эшелльным спектрографом НЭС [28, 29] 9 июня 2011. Наблюдения проведены с использованием резателя изображений [29] и ПЗС-матрицы 2048 × 2048 пикселей. Регистрируемый спектральный диапазон 4800–6200 \AA , разрешение $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$, отношение $S/N \geq 100$. Экстракция одномерных векторов из двумерных эшелле-спектров выполнена с помощью контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS, модифицированного в [30]. Удаление следов космических частиц проводилось совместной обработкой двух спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась с использованием спектров Th-Ag лампы с полым катодом.

Кроме того, в нашей работе мы используем спектр умеренного разрешения, полученный в диапазоне 4200–8000 \AA на 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150 с фокальным редуктором TFOSC. Анализ данного спектра описан в работе Марьевой и Жучкова [31].

Для исследования в ультрафиолете мы используем спектры в диапазоне 1150–1700 \AA из архива Multimission Archive at STScI (MAST). Они были получены на космическом телескопе имени Хаббла (HST) со спектрографом STIS и опубликованы в [32]. Спектральное разрешение $\lambda/\Delta\lambda \sim 1000\text{--}1500$, $S/N = 19$. Поскольку в данной работе для определения температуры объекта нам важно сравнить наклоны наблюдаемого и расчетных спектров (см. Раздел 5.1), мы используем ненормированный спектр со STIS.

Для исследования спектра в ближнем инфракрасном диапазоне мы используем нормированные спектры из архива VizieR. Данные спектры были получены на телескопе SUBARU со спектрографом IRCS [33]. Спектральное разрешение $\lambda/\Delta\lambda \sim 12000$, $S/N \sim 200\text{--}300$. Несмотря на то, что эшелльные порядки не перекрываются, все яркие линии в диапазонах 1.62–17.5 мкм и 2.06–2.4 мкм присутствуют в спектре, за исключением $P\alpha$. Мы

Таблица 1. Основные параметры исходной модели

$L_* = 3.5 \times 10^5 L_\odot$	$R_{2/3} = 18.5 R_\odot$
$T_{\text{eff}} = 32800 \text{ K}$	$\dot{M} = 7.5 \times 10^{-7} M_\odot/\text{год}$
$V_\infty = 940 \text{ км/с}$	$\beta = 2$
$f_\infty = 0.1$	$h = 0.05 R_* \text{ (log } g = 3.25)$
$V_{\text{phot}} = 1.0 \text{ км/с}$	$V_{\text{core}} = 0.01 \text{ км/с}$
$\frac{N(\text{He})}{N(\text{H})} = 0.2$	$[X(\text{He}) = 0.44]$
$\frac{N(\text{C})}{N(\text{H})} = 3.76 \times 10^{-5}$	$\left[\frac{X(\text{C})}{X(\text{C})_\odot} \right] = 0.08$
$\frac{N(\text{N})}{N(\text{H})} = 2.58 \times 10^{-4}$	$\left[\frac{X(\text{N})}{X(\text{N})_\odot} \right] = 1.8$
$\frac{N(\text{O})}{N(\text{H})} = 6.32 \times 10^{-5}$	$\left[\frac{X(\text{O})}{X(\text{O})_\odot} \right] = 0.06$

не проводили никакой дополнительной редукции спектров. Подробное описание спектров и их обработки дано в [34].

3. ПРОГРАММА CMFGEN

Для определения физических параметров и химического состава атмосферы Cyg OB2 №7 мы используем не-ЛТР код CMFGEN, созданный D. J. Hillier [16]. В этой программе уравнения переноса в сферически расширяющейся среде решаются в сопутствующей системе координат. Для одновременного решения уравнений переноса и уравнений статистического равновесия применяется метод частичной линеаризации. В отличие от метода полной линеаризации, в нем рассматривается связь между полем излучения и локальными населенностями уровней элементов только в соседних узлах решетки. Метод линеаризации, используемый в CMFGEN, учитывает перекрытие энергетических уровней (предполагается, что высокие уровни в горячей или плотной среде уширены и сливаются в континуум) и изменения уровня континуума с частотой. Также в CMFGEN учитывается покровный эффект и влияние Оже-ионизации — эмиссии электрона с одного из внутренних электронных уровней атома, происходящей под действием жесткого излучения (безызлучательный вариант).

Для каждой модели задаются радиус звезды R_* , соответствующий внутренней границе атмосферы и расположенный приблизительно на $\tau \sim 20$, светимость L_* , темп потери массы \dot{M} , коэффициент заполнения f , предельная скорость ветра V_∞ , масса звезды M_* и содержание элементов Z_i .

При расчете спектров в программе CMFGEN используется концепция “сверх-уровней”, впервые предложенная L. S. Anderson [35, 36]. Она заключается в том, что уровни с близкими энергиями и похожими свойствами рассчитываются как один “сверх-уровень”. Тогда в уравнение населенностей входит только населенность этого “сверх-уровня”, а населенности отдельных уровней определяются из предположения, что их коэффициенты отклонения от ЛТР такие же, как и соответствующие коэффициенты “сверх-уровня”, к которому они относятся.

При определении параметров атмосферы учитывается мелкомасштабная неоднородность среды или клампинг [37]. Предполагается, что ветер состоит из сгустков, характеризуемых объемным коэффициентом заполнения (филлинг-фактором) $f(r)$, что между этими сгустками вещества нет, и что размер этих сгустков мал по сравнению со средней длиной свободного пробега фотона. Неоднородность возрастает по мере удаления от звезды — объемный филлинг-фактор изменяется по закону:

$$f(r) = f_\infty + (1 - f_\infty) \exp[-V(r)/V_c].$$

Здесь f_∞ — объемный фактор заполнения на бесконечности, а V_c — скорость ветра, при которой клампинг становится существенным. Учет неоднородности изменяет темп потери массы: неклампированный темп потери массы (\dot{M}_{uncl}) связан с клампированным (\dot{M}_{cl}) соотношением

$$\dot{M}_{\text{uncl}} = \dot{M}_{\text{cl}} / \sqrt{f}.$$

4. ИСХОДНАЯ МОДЕЛЬ И СЕТКА МОДЕЛЕЙ

Прежде чем перейти непосредственно к моделированию атмосферы Cyg OB2 №7, мы исследовали изменение модельных спектров при варьировании различных параметров. В качестве исходной модели использовалась модель звезды AV 83 (O7 Iaf⁺), рассчитанная в работе [7]. Основные параметры исходной модели приведены в Таблице 1. Здесь $R_{2/3}$ — радиус, на котором оптическая глубина τ становится равной 2/3, а T_{eff} — эффективная температура на $R_{2/3}$, связанная со светимостью $L_* = 4\pi R_{2/3}^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$. Предполагается что в атмосфере содержатся H, He, C, N, O, S, Si, P и Fe.

При расчете структуры плотности в атмосферах O-звезд очень важен закон изменения скорости ветра с расстоянием от центра звезды. В исходной модели предполагается, что скорость изменяется по закону:

$$V(r) = \frac{V_{\text{phot}} + (V_\infty - V_{\text{phot}})(1 - R_*/r)^\beta}{1.0 + (V_{\text{phot}}/V_{\text{core}} - 1) \exp[-(r - R_*)/h]},$$

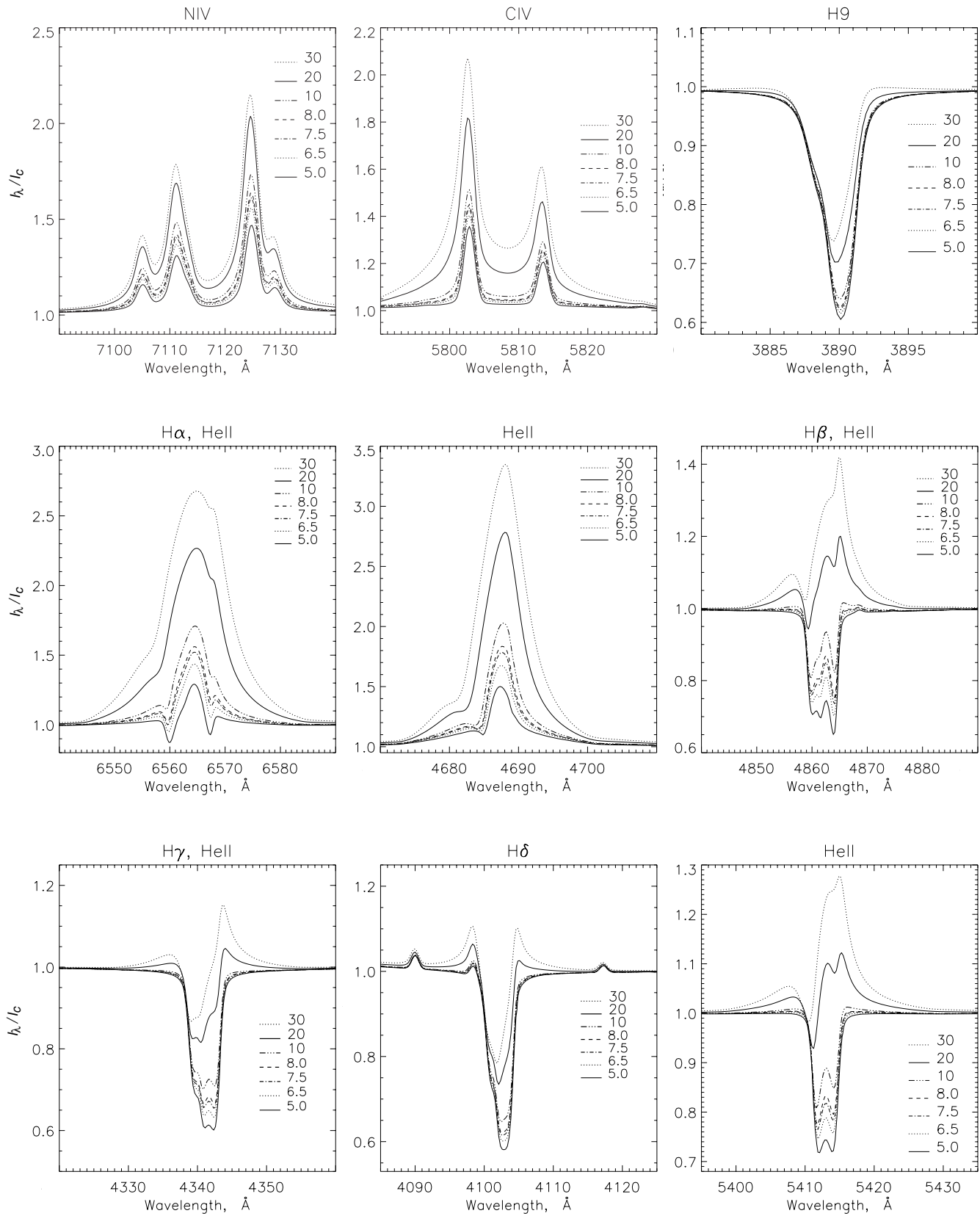


Рис. 2. Изменение профиля оптических линий с ростом темпа потери массы \dot{M}_{cl} от 5×10^{-7} до $3 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$ при постоянной величине $T_* = 45\,000$ К. Темп потери массы указан для каждого профиля в единицах $10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$.

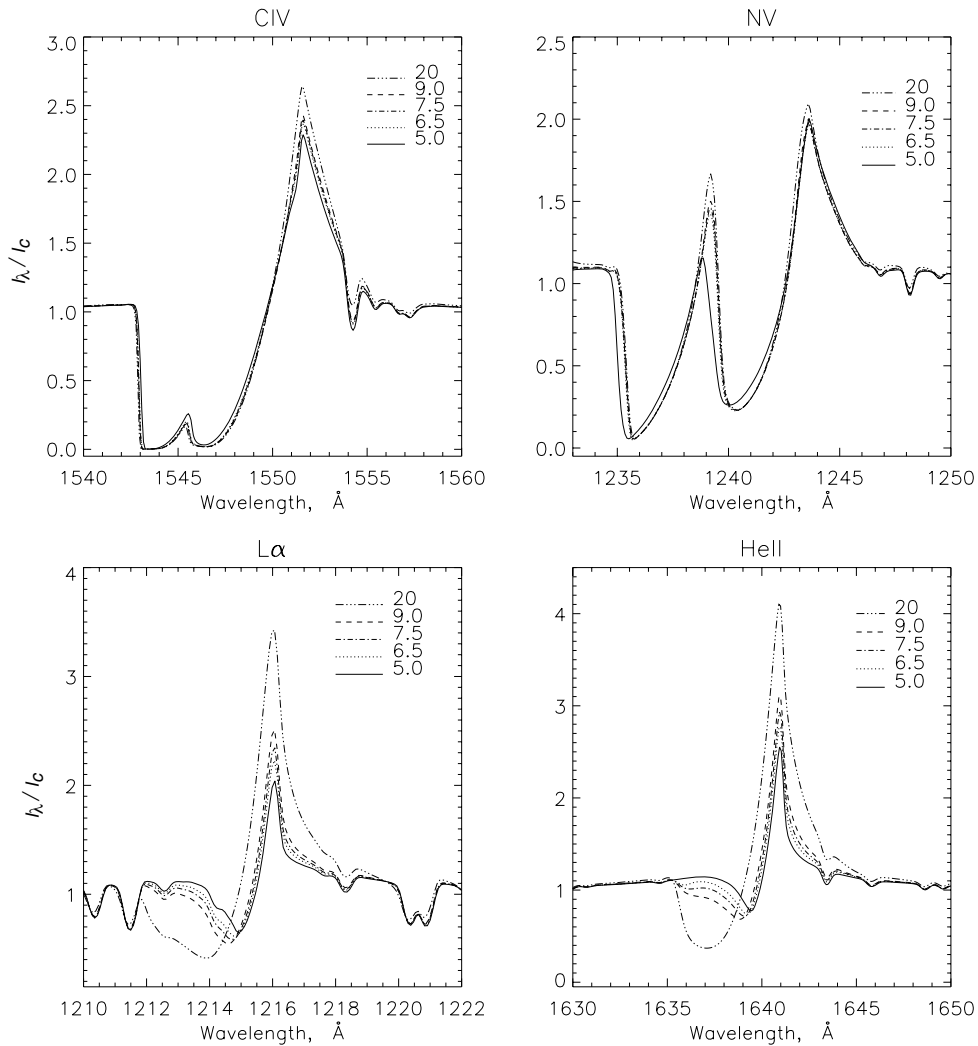


Рис. 3. Изменение профилей ультрафиолетовых линий с ростом темпа потери массы от 5×10^{-7} до $2 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$ (\dot{M} справа сверху).

где h — шкала высот, V_{phot} — свободный параметр, позволяющий рассчитывать модели с постоянной шкалой высот, β — показатель степени, определяющий наклон скоростного закона, а V_{core} — скорость ветра в нижней точке атмосферы, с которой начинается построение модели. Предполагая, что поток вещества изотермический, и пренебрегая отклонениями от плоско-параллельной атмосферы, получим, что h связана с ускорением силы тяжести g соотношением:

$$h = \frac{kT(1 + \gamma)}{g(1 - \Gamma)\mu m_{\mu}},$$

где γ — среднее число электронов на атом, m_{μ} — атомная единица массы, μ — средняя масса атома в единицах m_{μ} и Γ — отношение давления излучения к g . Так как T и Γ изменяются с расстоянием от звезды, h может существенно изменяться в фото-

сфере. В более удобном виде:

$$h = 1.2 \times 10^{-3} \frac{(1 + \gamma)}{\mu(1 - \Gamma)} \frac{T}{g} R_{\odot}.$$

Изменяя светимость и радиус звезды при постоянных значениях темпа потери массы ($\dot{M}_{\text{cl}} = 7.5 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$) и предельной скорости ветра ($V_{\infty} = 940 \text{ км/с}$), мы построили сетку моделей с разной эффективной температурой T_{eff} .

На Рис. 1 показаны модельные спектры с разной T_{eff} в диапазонах 4000–4500 и 4500–5000 \AA . Видно, что модели физически правдоподобны: при увеличении T_{eff} возрастают интенсивности линий высокого возбуждения. Например, при $T_{\text{eff}} = 38\,000 \text{ К}$ появляется линия N IV $\lambda 4057.8 \text{ \AA}$, которая усиливается с ростом температуры. Линии N III $\lambda 4634.1, 4640.6, 4641.8 \text{ \AA}$ при $T_{\text{eff}} \simeq 32\,000 \text{ К}$

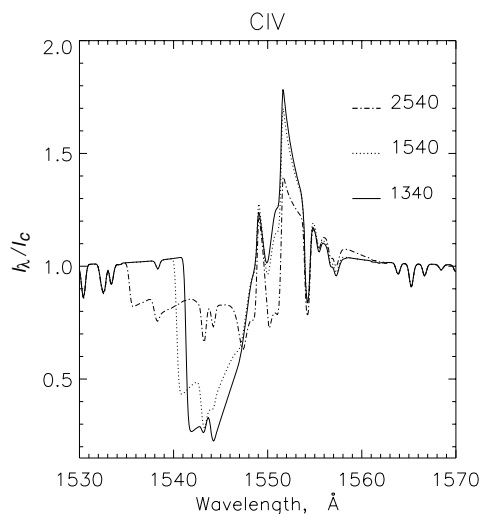


Рис. 4. Изменение профиля линий CIV $\lambda\lambda$ 1548.2, 1550.8 Å в зависимости от скорости ветра V_∞ при постоянной величине $\dot{M}_{cl} = 3 \times 10^{-7} M_\odot/\text{год}$ (V_∞ в км/с справа сверху).

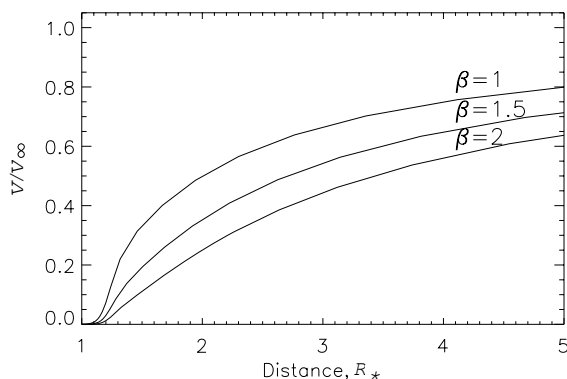


Рис. 5. Изменение скорости ветра с увеличением расстояния от поверхности звезды для нескольких значений β .

превращаются из абсорбционных в эмиссионные. Модели с $T_{\text{eff}} \geq 32\,000$ К можно классифицировать как Of [38, 39], так как начиная с данной температуры линия He II λ 4686 Å наблюдается в эмиссии.

В модельных спектрах с $T_* < 30\,000$ К (T_* — эффективная температура на внутренней границе атмосферы на радиусе R_*) у линий H β виден сложный P Cyg профиль (Рис. 1), который не встречается у обычных В-сверхгигантов. Подобные профили в модельных спектрах демонстрируют и линии H α и He I λ 5876 Å. Появление таких форм линий можно объяснить высоким темпом потери массы в исходной модели. Если для горячих сверхгигантов с эффективной температурой больше 38 000 К значение $7.5 \times 10^{-7} M_\odot/\text{год}$ является типичным

темпом потери массы, то для более холодных звезд с $T_* < 30\,000$ К этот темп слишком высок.

Для того чтобы проследить, как ведут себя линии при изменении темпа потери массы, мы рассчитали модели с \dot{M}_{cl} в диапазоне $(3-30) \times 10^{-7} M_\odot/\text{год}$ при постоянной температуре $T_* = 45\,000$ К и скорости ветра $V_\infty = 940$ км/с. На Рис. 2 показано изменение профилей избранных линий в оптическом диапазоне. Видно, что при увеличении \dot{M}_{cl} у линий N IV $\lambda\lambda$ 7103.2–7129.2 Å и C IV $\lambda\lambda$ 5801.3–5812 Å усиливаются крылья. Такие линии, как H α , H β , H γ , He II λ 5411 Å, превращаются из абсорбционных в эмиссионные.

На Рис. 3 показано изменение профилей ультрафиолетовых линий с ростом \dot{M}_{cl} . Линии дублета C IV $\lambda\lambda$ 1548, 1551 Å в модельных спектрах сливаются в сильную линию с P Cyg профилем.

Видно, что резонансные линии C IV $\lambda\lambda$ 1548, 1551 Å и N V $\lambda\lambda$ 1239, 1243 Å при $V_\infty = 940$ км/с насыщены уже при $5 \times 10^{-7} M_\odot/\text{год}$, и дальнейшее увеличение \dot{M}_{cl} почти не влияет на их профиль. Профили C IV λ 1548, 1551 Å существенно изменяются при вариациях V_∞ (см. рис. 4). При повышении предельной скорости ветра линия становится ненасыщенной.

Из литературы известно [40], что ветры горячих звезд быстро ускоряются, и уже на расстоянии $r = 4.1R_*$, т.е. на $3.1R_*$ над поверхностью звезды, скорость ветра приближается к $0.8V_\infty$, т.е. $\beta \simeq 0.8$. На Рис. 5 показаны графики изменения скорости ветра для нескольких значений β .

Мы построили модели с тремя разными β . На Рис. 6 показано изменение линий при возрастании β от единицы до двух. Видно, что с уменьшением β изменяется глубина линии H β , и при $\beta = 1$ появляются крылья. Линия He II λ 5411 Å, не показанная на рисунке, меняется аналогичным образом. Линия H α превращается из эмиссионной в абсорбционную при увеличении β . Такие линии, как N V $\lambda\lambda$ 4604.14, 4620.50 Å, N IV $\lambda\lambda$ 5200.60, 5204.28 Å, N IV λ 5736.93 Å, нечувствительны к изменению параметра β .

Рассмотрев изменение модельных спектров в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах при изменении входных данных, перейдем к определению параметров атмосферы Cyg OB2 №7.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ Cyg OB2 №7

Herrero et al. [32] по ультрафиолетовым линиям определили, что предельная скорость ветра Cyg OB2 №7 равна 3080 км/с, и оценили температуру звезды $T_* = 45\,000$ К [41]. Поэтому из построенной сетки моделей мы взяли самую горячую

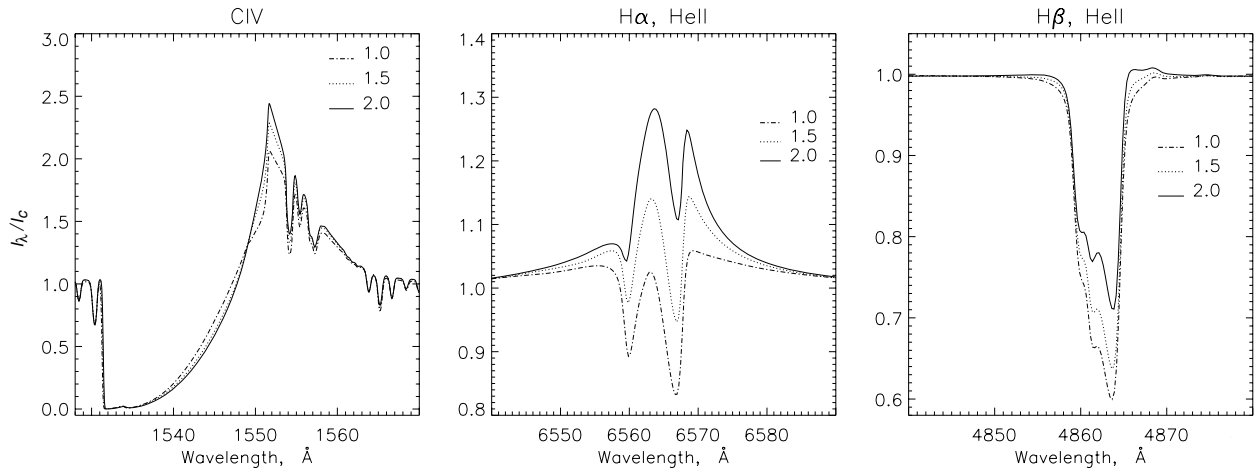


Рис. 6. Изменение профилей линий C IV, H α и H β при изменении параметра β (величина β справа сверху).

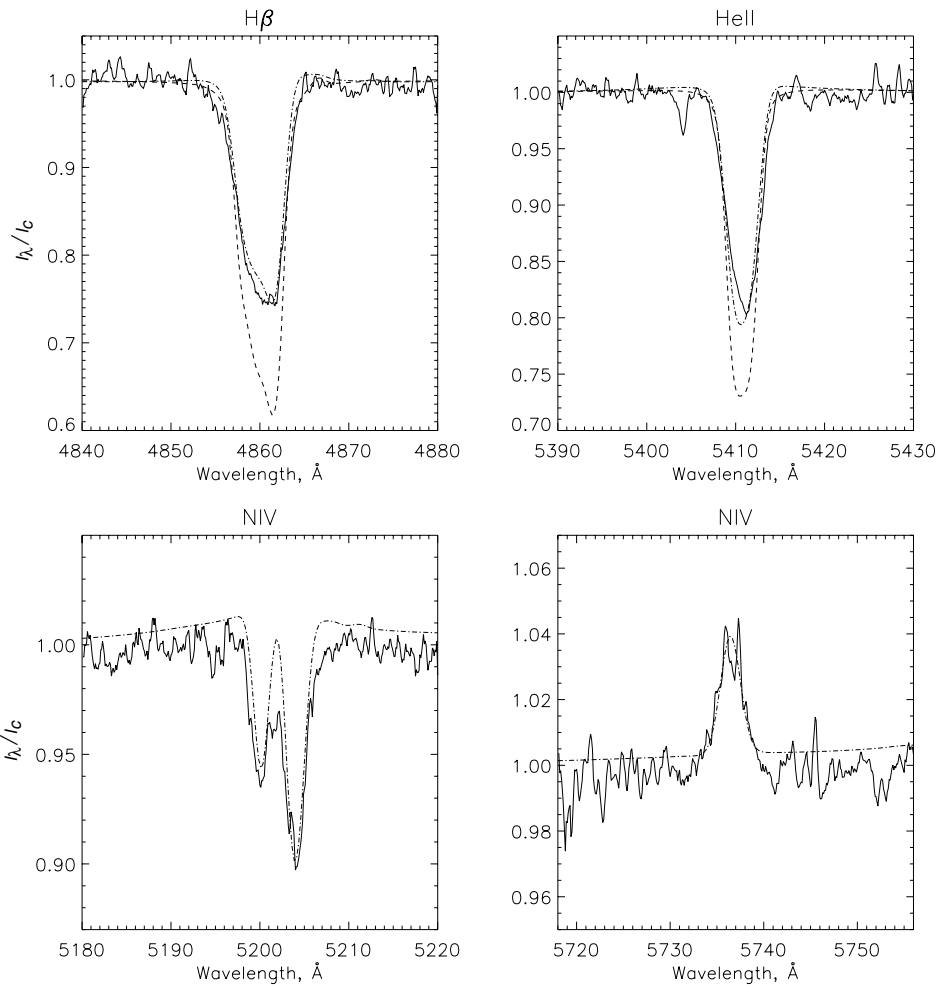


Рис. 7. Сравнение профилей избранных линий с лучшими модельными спектрами. Сплошной линией показан наблюдаемый профиль, пунктирной — модель с $\beta = 1$, штрихпунктирной — модель с $\beta = 2$.

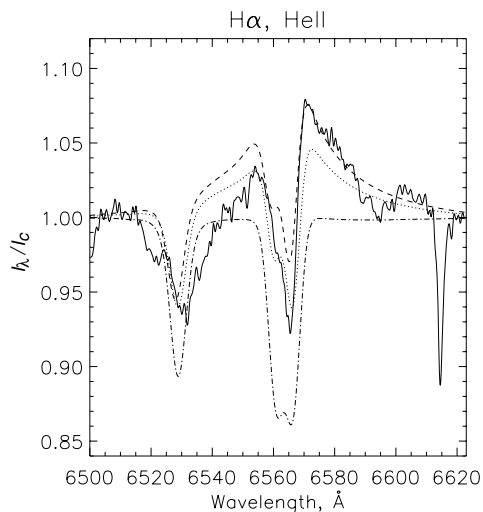


Рис. 8. Сравнение наблюдаемого профиля $H\alpha + He II \lambda 6560 \text{ \AA}$ (сплошная линия) с модельными. Пунктирная линия — модель с $\beta = 1$ и $\dot{M}_{cl} = 2 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, штриховая — модель с $\beta = 1$ и $\dot{M}_{cl} = 2.5 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, штрихпунктирная — $\beta = 2$, $\dot{M}_{cl} = 6 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$. Слева от $H\alpha$ наблюдаются линии DIB $\lambda 6521, 6537 \text{ \AA}$ и $He II \lambda 6527 \text{ \AA}$, а справа — DIB $\lambda 6613 \text{ \AA}$.

модель с $T_* = 45000 \text{ K}$ и подняли значение V_{∞} до 3080 км/с . Получилось, что при данном темпе потери массы линии $C IV \lambda\lambda 1548$ и 1551 \AA становятся ненасыщенными. Как было показано выше, глубина этих линий сильно зависит от темпа потери массы, поэтому мы повысили величину \dot{M}_{cl} до $(1-3) \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$. В итоге получили модель, в общих чертах описывающую наблюдаемый спектр: в модельном спектре присутствуют все основные спектральные линии, с профилями, похожими на наблюдаемые.

Затем мы перешли к уточнению параметров атмосферы. Для точного определения светимости объекта были вычислены звездные величины Cyg OB2 №7 в фильтрах U, B, V и R по модельным спектрам и сравнены с наблюдениями. Чтобы по модельным спектрам получить звездные величины, сначала пересчитали потоки на расстояние до ассоциации Cyg OB2 (1.5 кпк по данным [42]²).

Полученные потоки скорректировали за межзвездное поглощение с помощью IDL програм-

²Kiminki et al. [43], полагая, что абсолютная звездная величина Cyg OB2 №7 равна $M_V = -6.35$, получили расстояние до звезды $D = 2 \text{ кпк}$, хотя большинство объектов из ассоциации Cyg OB2, согласно их расчетам, находится на расстоянии 1.7 кпк . Kharchenko et al. [44] оценили расстояние до Cyg OB2 в 1.5 кпк . Их оценку подтвердили Mel'nik and Dambis [42]. Это значение мы и используем в наших расчетах.

Таблица 2. Сравнение наблюдаемых фотометрических величин с расчетными. Данные наблюдений взяты из базы данных SIMBAD [46]

	V	$U - B$	$B - V$	$V - R$
Cyg OB2 №7	10.50	0.3	1.44	-0.1
Model	10.56	0.8	1.74	1.64

Таблица 3. Содержание химических элементов в финальной модели. Z_i/Z_{\odot} — отношение содержания элемента к солнечному

Элемент	Доля по числу атомов	Массовая доля	Z_i/Z_{\odot}
H	1.0	0.5×10^{-1}	0.8
He	0.200	0.4×10^{-1}	1.6
C	3.8×10^{-5}	2.5×10^{-4}	0.08
N	4.5×10^{-4}	3.5×10^{-3}	3.18
O	9.75×10^{-5}	8.6×10^{-4}	0.09

мы FM-UNRED (W. Landsman), которая использует кривые поглощения, построенные в работе Fitzpatrick [45]. Величина межзвездного поглощения $A_V = 5.4$ была взята из работы Kiminki et al. [43]. После этого рассчитанные спектры были свернуты с кривыми пропускания стандартных фильтров U, B, V и R .

В Таблице 2 приведены наблюдаемые и рассчитанные для светимости $L_* = 10^6 L_{\odot}$ и $T_{\text{eff}} = 45000 \text{ K}$ фотометрические величины. По данным таблицы хорошо видно, что модель существенно отличается от наблюдений в R фильтре. Возможно, это связано с тем, что вокруг объекта существует пылевая оболочка.

В Таблице 3 приведено определенное содержание основных пяти элементов. Содержание остальных — S, Si, P и Fe — считалось солнечным. Содержание азота мы оценивали, главным образом, по абсорбционным линиям $N IV \lambda\lambda 5200.60, 5204.28 \text{ \AA}$, а содержание углерода — по эмиссионным $C IV \lambda\lambda 5801.3, 5812 \text{ \AA}$. Ультрафиолетовые линии $C IV \lambda\lambda 1548, 1551 \text{ \AA}$ и эмиссионные линии $N IV$ для определения химического состава не использовались, потому что они формируются в ветре и зависят от параметров расчета. Обычно содержание углерода в атмосферах O-звезд определяют по линии $C III \lambda 5696 \text{ \AA}$ [47], но в спектре Cyg OB2 №7 эта линия не наблюдается из-за высокой температуры объекта.

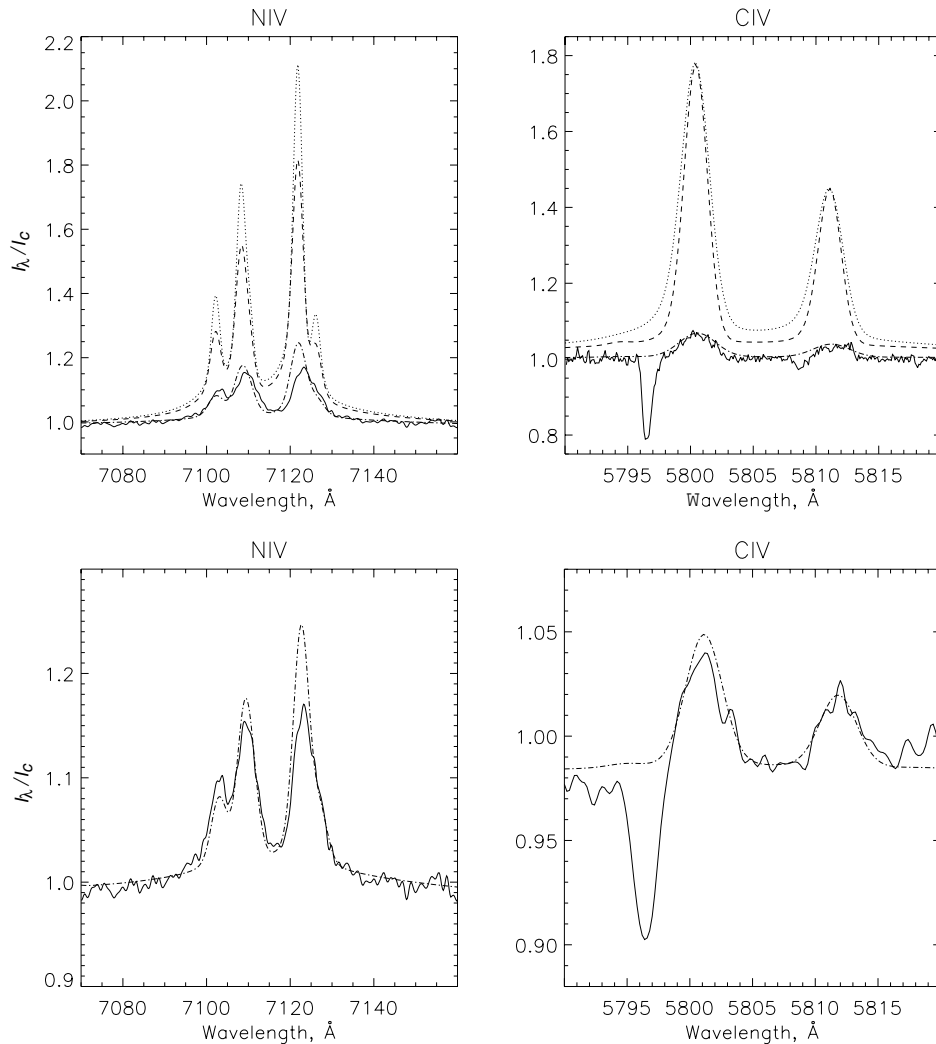


Рис. 9. Сверху: наблюдаемый спектр в сравнении с различными моделями. Пунктирная линия — модель с $\beta = 2$, описывающая линии типа $N\beta$, штриховая — модель с $\beta = 1$, описывающая $N\alpha$. Внизу: профили $C\text{IV } \lambda\lambda 5801.3, 5812 \text{ \AA}$ и $N\text{IV } \lambda\lambda 7103.2\text{--}7129.2 \text{ \AA}$ в сравнении с моделью с $\dot{M}_{cl} = 3 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$.

5.1. Сравнение профилей отдельных линий

Лучше всего наблюдаемый спектр в оптическом диапазоне описывается моделью со следующими параметрами: $L_* = (1 \pm 0.1) \times 10^6 L_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 43.4 \pm 1 \text{ kK}$, $\dot{M} = (1.5 \pm 0.5) \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$. Далее будем называть эту модель Моделью 1.

Для учета скорости вращения Cyg OB2 №7 $v \sin i = 105 \text{ км/с}$ [41] мы свернули расчетный спектр с гауссианой, полуширина (FWHM) которой равна 1.75 \AA . На Рис. 7 показаны избранные линии из спектра Cyg OB2 №7 и наша Модель 1, посчитанная для двух значений β . Видно, что модель с $\beta = 2$ лучше описывает наблюдаемые профили.

Благодаря тому, что спектр, полученный на РТТ-150, в красной части доходит до 8000 \AA , мы

смогли исследовать профиль $N\alpha$ и группу линий $N\text{IV } \lambda\lambda 7103.2\text{--}7129.2 \text{ \AA}$. Чтобы учесть не только вращение звезды, но и спектральное разрешение прибора $\Delta\lambda = 2 \text{ \AA}$, мы свернули модельные спектры с гауссианой $\text{FWHM} = 2.65 \text{ \AA}$.

Из Рис. 8 видно, что линии $N\alpha + \text{He II}$ лучше описываются моделью с крутым скоростным законом ($\beta = 1$) (Модель 2).

Для описания линий $N\text{IV } \lambda\lambda 7103.2\text{--}7129.2 \text{ \AA}$ и $C\text{IV } \lambda\lambda 5801.3, 5812 \text{ \AA}$ мы взяли Модель 3, аналогичную Модели 1, но имеющую более низкий темп потери массы $\dot{M} = (7 \pm 1) \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ (см. Рис. 9).

Стоит отметить, что в спектре Cyg OB2 №7 присутствуют редкие эмиссионные линии $N\text{IV } \lambda\lambda 6212, 6215, 6220 \text{ \AA}$, которые возникают при

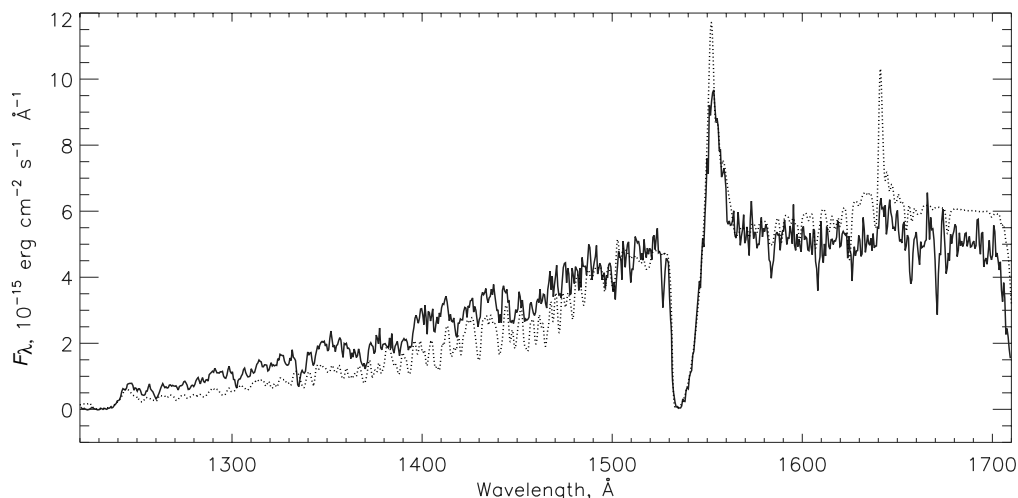


Рис. 10. Сравнение модельного спектра (пунктирная линия) с наблюдаемым (сплошная линия), полученным на телескопе Хаббла. Модельный спектр ($\dot{M} = 2 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, $\beta = 2$) свернут с гауссианой с $\text{FWHM} = 15 \text{ \AA}$, пересчитан на расстояние до ассоциации Cyg OB2 и скорректирован за межзвездное поглощение.

Таблица 4. Модельные параметры Cyg OB2 №7

	T_* , kK	R_* , R_{\odot}	T_{eff} , kK	$R_{2/3}$, R_{\odot}	L_* , $10^6 L_{\odot}$	\dot{M}_{uncl} , $10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$	V_{∞} , км/с	β
Модель 1 (H β)	45	16.4	43.2	17.7	1	6.3	3250	2
Модель 2 (H α)	45	16.4	44.4	17	1	9.5	3250	1
Модель 3 (NIV, CIV)	45	16.4	43.7	17.4	1	2.2	3250	2

переходах между уровнями высоких энергий (энергия нижнего уровня — 60.45 эВ, а верхнего — 62.45 эВ). Эти линии отсутствуют в модельных спектрах, так как соответствующие им переходы ($4s^3S-4p^3P^0$) не были включены в расчеты. Мы полагаем, что неучет этих линий не влияет существенно на результат моделирования в целом.

Таким образом, линии в оптическом диапазоне можно разделить на три группы (Таблица 4), описать которые единой моделью не удастся. Этот результат мы еще обсудим в Разделе 6.

На Рис. 10 показан участок спектра в ультрафиолетовом диапазоне в единицах потока и рассчитанный нами спектр. Модельный спектр хорошо описывает все основные линии в УФ части спектра Cyg OB2 №7, практически совпадают и наклоны спектров. По линиям CIV $\lambda\lambda 1548, 1551 \text{ \AA}$ мы уточнили значение скорости ветра, и в нашей финальной модели $V_{\infty} = 3250 \text{ км/с}$.

При построении модели мы ориентировались главным образом на оптический диапазон. При

этом спектр Модели 1 соответствует наблюдаемому спектру и в ультрафиолетовом диапазоне. Сравним модельный спектр с наблюдаемым в инфракрасном диапазоне (см. рис. 11). Модель 1 с $\dot{M} = 2 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$ и $\beta = 2$ хорошо описывает линии HeII+H $\lambda 1.64, 1.68, 2.34 \text{ мкм}$ и линии HeII $\lambda 1.69, 2.26 \text{ мкм}$. Неописанными остаются линии NV $\lambda 2.1 \text{ мкм}$ и NIII $\lambda 2.11 \text{ мкм}$. Линии SV $\lambda 1.71, 1.72 \text{ мкм}$ присутствуют и в модельном, и в наблюдаемом спектре, но при этом в модели они в эмиссии, а в наблюдаемом спектре — в абсорбции. Эти различия, вероятно, связаны с тем, что спектры горячих звезд менее изучены в инфракрасной области, пока мало спектральных атласов O-звезд с высоким или умеренным разрешением в длинноволновом диапазоне, и соответственно, недостаточно данных о переходах, соответствующих линиям, наблюдаемым в спектре.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе мы применили не-ЛТР программу SMFGEN для моделирования атмосферы

в плоскости экватора и возникновению истекающего диска [40], как у В[e] звезд [50]. Bjorkman and Cassinelli [51] создали полуаналитическую модель “сжатого ветрового диска” (“wind compressed disk”) и показали, что плотность ветра должна изменяться с широтой. Petrenz and Puls [52] исследовали влияние вращения на профили спектральных линий. Они показали, что вращение изменяет скоростную структуру и распределение плотности в ветре, что скорость во вращающемся ветре изменяется немонотонно. Асимметричные ветры найдены у объектов, связанных с O-звездами эволюционно: LBV [53, 54] и WR звезд [55]. Более того, с помощью численного моделирования Groh et al. [56] показали, что плотность ветра qWR звезды HD 45166 изменяется с широтой. Мы полагаем, что наличие в спектре Cyg OB2 №7 групп линий, демонстрирующих разный темп потери массы, связано с неоднородностью ветра, вызванной быстрым вращением ($v \sin i = 105$ км/с [41]). Cyg OB2 №7 — еще одна горячая звезда, у которой обнаружена зависимость плотности ветра от широты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят J. D. Hillier за предоставленную возможность использования кода CMFGEN. Авторы также выражают признательность В. Е. Панчуку и М. В. Юшкину за проведение наблюдений на спектрографе НЭС и первичную обработку данных, и Р. Я. Жучкову за спектр, полученный на РТТ-150, С. В. Карпову за помощь в проведении расчетов и Н. Ф. Войханской за помощь в работе над рукописью. В работе использованы данные из архивов Multimission Archive at STScI (MAST), VizieR и базы данных SIMBAD. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект No. 11-02-00319-а, 12-07-00739-а) и программы “Кадры” (госконтракт 14.740.11.0800). Наблюдения на 6-м телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт 14.518.11.7070).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. J. Seaton, *Journal of Physics B — Atomic and Molecular Physics* **20**, 6363 (1987).
2. D. G. Hummer, K. A. Berrington, W. Eissner, et al., *Astronom. and Astrophys.* **279**, 298 (1993).
3. S. N. Nahar, *ASP Conf. Ser.* **288**, 651 (2003).
4. A. K. Pradhan, H. L. Zhang, S. N. Nahar, et al., *Bull. of the American Astronom. Soc.* **28**, 1367 (1996).
5. C. A. Iglesias and F. J. Rogers, *Astrophys. J.* **371**, 408 (1991).
6. C. A. Iglesias and F. J. Rogers, *Astrophys. J.* **464**, 943 (1996).

7. D. J. Hillier, T. Lanz, S. R. Heap, et al., *Astrophys. J.* **588**, 1039 (2003).
8. S. A. Voels, B. Bohannan, D. C. Abbott, and D. G. Hummer, *Astrophys. J.* **340**, 1073 (1989).
9. K. C. Smith and I. D. Howarth, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **299**, 1146 (1998).
10. M. R. Villamariz and A. Herrero, *Astronom. and Astrophys.* **357**, 597 (2000).
11. A. Herrero, R.-P. Kudritzki, J. M. Vilchez, et al., *Astronom. and Astrophys.* **261**, 209 (1992).
12. R. Gabler, A. Gabler, R.-P. Kudritzki, et al., *Astronom. and Astrophys.* **226**, 162 (1989).
13. D. Schaerer and W. Schmutz, *Astronom. and Astrophys.* **288**, 231 (1994).
14. F. Sellmaier, J. Puls, R.-P. Kudritzki, et al., *Astronom. and Astrophys.* **273**, 533 (1993).
15. A. Herrero, J. Puls, and M. R. Villamariz, *Astronom. and Astrophys.* **354**, 193 (2000).
16. D. J. Hillier and D. L. Miller, *Astrophys. J.* **496**, 407 (1998).
17. J. Puls, M. A. Urbaneja, R. Venero, et al., *Astronom. and Astrophys.* **435**, 669 (2005).
18. A. E. Santolay-Rey, J. Puls, and A. Herrero, *Astronom. and Astrophys.* **323**, 488 (1997).
19. A. W. A. Pauldrach, T. L. Hoffmann, and M. Lennon, *Astronom. and Astrophys.* **375**, 161 (2001).
20. W.-R. Hamann and G. Gräfener, *Astronom. and Astrophys.* **410**, 993 (2003).
21. W.-R. Hamann, G. Gräfener G., and A. Liermann A. *Astronom. and Astrophys.* **457**, 1015 (2006).
22. T. Lanz and I. Hubeny, *Astrophys. J. Suppl.* **146**, 417, (2003).
23. N. R. Walborn, *Astrophys. J.* **215**, 53, (1977).
24. A. Sota, J. Maíz Apellániz, N. R. Walborn, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **193**, 24 (2011).
25. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and A. S. Miroshnichenko, *IAUS* **272**, 400 (2011).
26. V. G. Klochkova and E. L. Chentsov, *Astron. Rep.* **48**, 1005 (2004).
27. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, D. S. Nasonov, et al., (готовится к печати).
28. V. Panchuk, V. Klochkova, I. Najdenov, and M. Yushkin, in *Proc. of the Joint Discussion no. 4 on UV Astronomy: stars from birth to death, IAU General Assembly 2006* (Cambridge University press, 2007), p. 179.
29. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Naidenov, *Journal of Optical Technology* **76**, 87 (2009).
30. М. В. Юшкин и В. Г. Ключкова, Препринт CAO РАН **206** (2005).
31. О. В. Марьева и Р. Я. Жучков, ??? **55**, 371 (2012).
32. A. Herrero, J. Puls, L. J. Corral, et al., *Astronom. and Astrophys.* **366**, 623 (2001).
33. A. T. Tokunaga, N. Kobayashi, J. Bell, et al., *Proc. SPIE* **3354**, 512 (1998).
34. M. M. Hanson, R.-P. M. Kudritzki, M. A. Kenworthy, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **161**, 154 (2005).
35. L. S. Anderson, *Astrophys. J.* **298**, 848 (1985).

36. L. Anderson, in *Proc. of the Advanced Research Workshop on Stellar Atmospheres: Beyond Classical Models* (Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., 1991), p. 29.
37. D. J. Hillier and D. L. Miller, *Astrophys. J.* **519**, 354 (1999).
38. N.R. Walborn, *Astrophys. J. Suppl.* **23**, 257 (1971).
39. P. S. Conti and E. M. Leep, *Astrophys. J.* **193**, 113 (1974).
40. H. J. G. L. M. Lamers and J. P. Cassinelli, *Introduction to Stellar Winds* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999).
41. A. Herrero, J. Puls, and F. Najarro, *Astronom. and Astrophys.* **396**, 949 (2002).
42. A. M. Mel'nik and A. K. Dambis, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **400**, 518, (2009).
43. D. C. Kiminki, H. A. Kobulnicky, K. Kinemuchi, et al., *Astrophys. J.* **664**, 1102 (2007).
44. N. V. Kharchenko, A. E. Piskunov, S. Röser¹, et al., *Astronom. and Astrophys.* **438**, 1163 (2005).
45. E. L. Fitzpatrick, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **111**, 63 (1999).
46. База данных SIMBAD, <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
47. F. Martins and D. J. Hillier, arXiv:1208.0152.
48. M. R. Mokiem, A. de Koter, J. Puls, et al., *Astronom. and Astrophys.* **441**, 711 (2005).
49. J. Puls, N. Markova, S. Scuderi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **454**, 625 (2006).
50. F.-J. Zickgraf, B. Wolf, O. Stahl, et al., *Astronom. and Astrophys.* **143**, 421 (1985).
51. J. E. Bjorkman and J. P. Cassinelli, *Astrophys. J.* **409**, 429 (1993).
52. P. Petrenz and J. Puls, *Astronom. and Astrophys.* **312**, 195 (1996).
53. J. H. Groh, D. J. Hillier, and A. Damineli, *Astrophys. J.* **638**, L33 (2006).
54. J. H. Groh, T. I. Madura, S. P. Owocki, et al., *Astrophys. J.* **716**, L223 (2010).
55. T. J. Harries, D. J. Hillier, and I. D. Howarth, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **296**, 1072 (1998).
56. J. H. Groh, A. S. Oliveira, and J. E. Steiner, *Astronom. and Astrophys.* **485**, 245 (2008).

Modeling of the Spectrum of Cygnus OB2 No. 7 Supergiant

O. V. Maryeva, V. G. Klochkova, E. L. Chentsov

We report the results of modeling of the spectrum of the O3 If_{*} Cyg OB2 No. 7 supergiant in a broad wavelength range. We determine the physical properties and chemical composition of its atmosphere not assuming the presence of local thermodynamic equilibrium. The atmosphere reveals an excess of nitrogen $X(\text{N})/X(\text{N})_{\odot} = 3.2$ and the carbon and oxygen deficiency $X(\text{C})/X(\text{C})_{\odot} = 0.08$, $X(\text{O})/X(\text{O})_{\odot} = 0.09$. The lines in the stellar spectrum are divided into three groups which fail to be described within a single model. The models describing each of these groups differ by the mass-loss rate and the law of wind velocity variation. Thus, the numerical modeling suggests that the wind of the supergiant is heterogeneous. In addition, this paper describes the features of the CMFGEN code used and investigates the sensitivity of its results to the variations of different parameters.

Keywords: stars: abundances—stars: winds, outflows—stars: supergiants—stars: individual: Cyg OB2 No. 7