

Аннотация

Наиболее точные оценки фундаментальных параметров звёзд с большим оттоком массы могут быть получены посредством сравнения их наблюдаемых спектров с расчётными, полученными в рамках не-ЛТР моделей протяжённых атмосфер. Решение этой задачи для звёзд с относительно низкой температурой фотосферы (8000 – 10000 K) затруднено в силу комплексного влияния множества параметров модели ветра на наблюдаемый спектр. Для облегчения решения этой задачи нами была рассчитана сетка моделей в пространстве параметров "Эффективная температура – темп потери массы" в диапазонах температур от 8000 K до 10000 K и темпа потери массы от $3 \cdot 10^{-5}$ до $10^{-3} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. В рамках данной работы мы представляем результаты исследования ветра LBV кандидата в NGC 4736 и LBV звезды AF And в M31, выполненного при помощи заранее рассчитанной сетки моделей протяжённых атмосфер. Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-262 (13.МН-ПМУ.21.0003).

Введение

Характерной наблюдательной особенностью большинства классов массивных звёзд (таких как яркие голубые переменные, luminous blue variables, LBVs), эмиссионные Fe II звёзды, звёзды Вольфа-Райе, B[e]-сверхгиганты и другие) является эмиссионный характер спектра (Humphreys et al., 2014). Этот наблюдательный факт может быть объяснён наличием протяжённой атмосферы, создаваемой мощным ветром звезды. Исследование свойств подобных ветров необходимо для более полного понимания физики этого класса объектов.

Важно отметить, что физические условия в плотном звёздном ветре далеки от термодинамического равновесия, что существенно затрудняет определение фундаментальных параметров звезды (L, T_{eff}, R_*) и её ветра ($\dot{M}, v_{\infty}, \beta$). Наиболее надёжные оценки параметров объекта могут получены путём сравнения наблюдаемого спектра и спектра модели атмосферы, руководствуясь соответствием между интенсивностями и формами профилей избранных линий. В частности, T_{eff} может быть оценена по линиям различных ионов одного и того же химического элемента, например, широко применяемого при исследовании горячих ($T_{\text{eff}} \gtrsim 25000$ K) массивных звёзд соотношения интенсивностей He II/He I (Jordan, 1980).

Оценка эффективной температуры в более "холодном" диапазоне температур ($\lesssim 10000$ K) и, как следствие, других параметров объекта, осложнена отсутствием явных линий-индикаторов, что побудило нас создать сетку моделей для данного диапазона температур, которая позволит получать оценки фундаментальных параметров произвольных объектов без существенных затрат вычислительного времени.

Методы

Для расчёта моделей нами был использован не-ЛТР код CMFGEN (Hillier and Miller, 1998), позволяющий рассчитывать сферически-симметричные модели звёздных атмосфер с учётом оттока вещества в ветре. Изменение скорости ветра с расстоянием описывалось в рамках простого β -закона (Lamers et al., 1996; Hillier et al., 2003). При расчётах параметры скоростного закона были зафиксированы и имели стандартные для звёздных ветров значения ($\beta = 2.0, v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$) (Hillier, 2012; Groh et al., 2009).

Химический состав моделей включает в себя следующие ионы: H I, He I, C I-III, N I-III, O I-III, Na I-II, Si I-III, Fe I-IV. Металлы играют важную роль в ускорении ветра звезд при температурах ~ 10000 K (Abbott, 1982), и кроме того сильно влияют на ионизационное состояние вещества, поскольку являются источниками электронов в ветре. Обилия натрия, кремния и железа в моделях сетки имеют солнечные значения. Для азота, углерода и кислорода используются значения $Z_C = 0.01 Z_{\odot}, Z_N = 4 Z_{\odot}, Z_O = 0.5 Z_{\odot}$, находящиеся в границах значений, характерных для LBV (Groh et al., 2014).

В целях уменьшения вычислительных затрат нами был проведён отбор количества учитываемых в моделях переходов для каждого иона. Для этого была проведена серия предварительных расчётов моделей с различным количеством переходов с последующим анализом модельных спектров. Критериями отсева переходов выступало сохранение потока в пределах 1% в линии при изменении числа переходов, а также стабильность процесса расчёта модели.

Изменение варьируемых в сетке параметров производилось с сохранением плотности ветра и светимости модели, значение которой было выбрано равным $10^6 L_{\odot}$. На каждом шаге в пространстве параметров по оси температуры (варьировалась температура на гидростатическом радиусе T_* , под гидростатическим радиусом R_* понимается радиус атмосферы на $\tau_{\text{Ross}} \gtrsim 20$) вычислялось новое значение гидростатического радиуса. Для шага по оси темпа потери массы использовалось соотношение, связывающее гидростатический радиус и темп потери массы $\dot{M} \sim R_*^{3/2}$.

Результаты

Результатом расчёта является создание сетки, содержащей 234 модели. Как видно из Рис. 1 и 2 модели из сетки демонстрируют сложную зависимость интенсивностей и профилей линий от варьируемых фундаментальных параметров из-за их существенного влияния на ионизационный баланс в ветре.

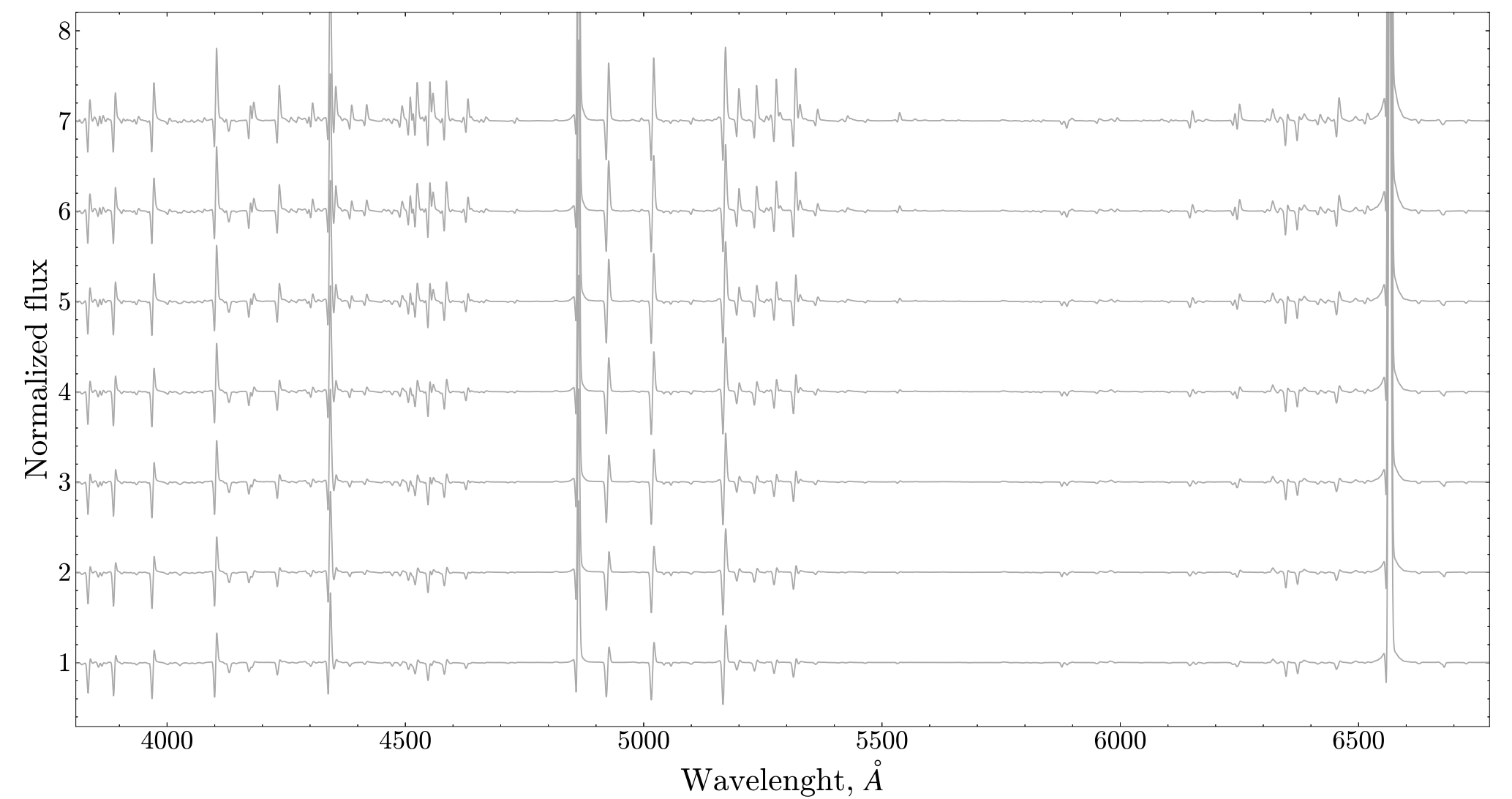


Рис. 1: Нормированные модельные спектры в диапазоне $\dot{M} = 3 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (снизу вверх, шаг $\log \Delta \dot{M} = 0.06$) при фиксированной $T_* = 10700$ K, сглаженные со спектральным разрешением 4.3 Å

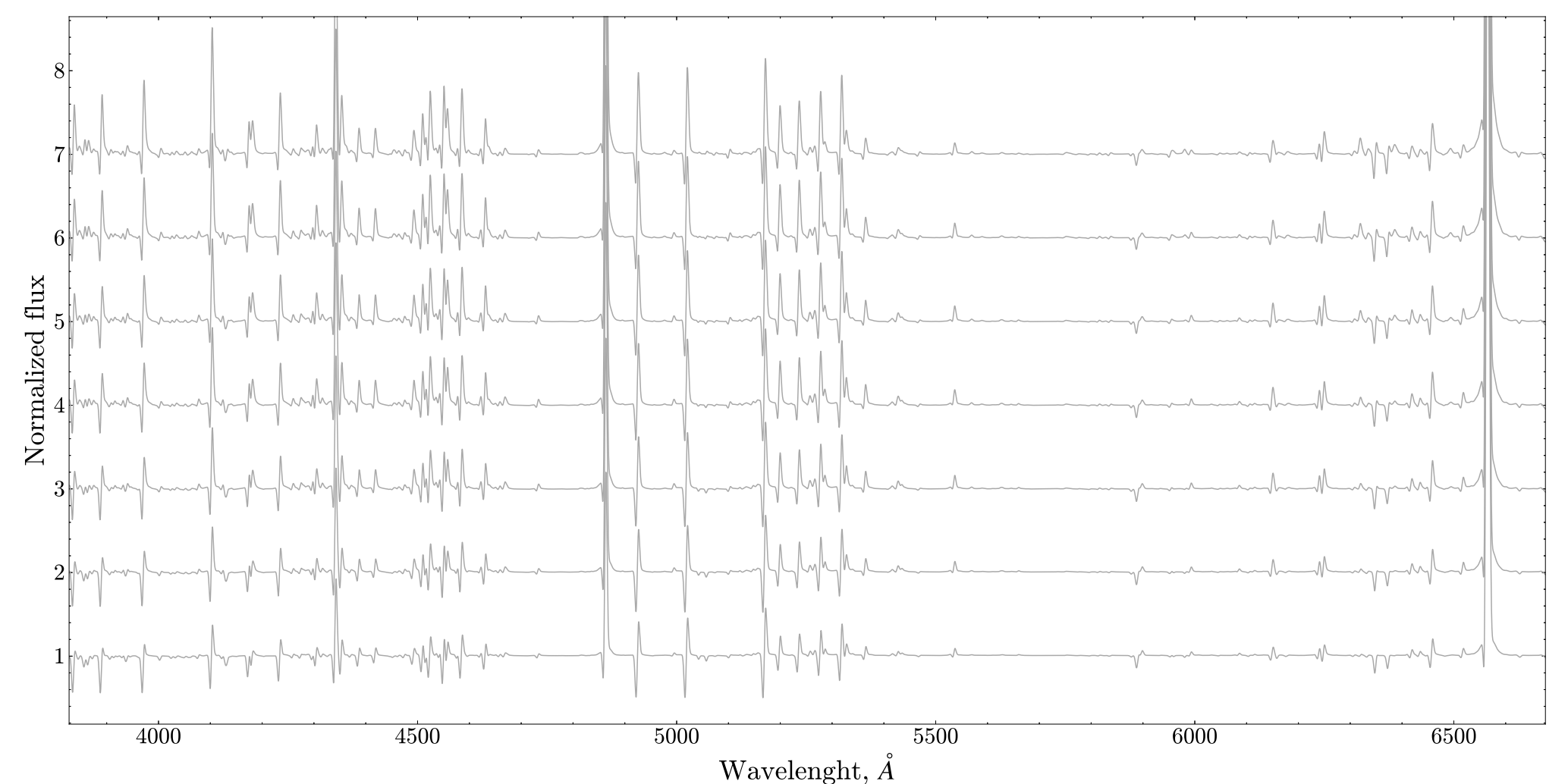


Рис. 2: Нормированные модельные спектры в диапазоне $T_* = 8800 - 12000$ K (снизу вверх, шаг $\log \Delta T_* = 0.02$) при фиксированном $\dot{M} = 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, сглаженные со спектральным разрешением 4.3 Å

Спектр каждой из моделей может быть использован для непосредственного сравнения с наблюдаемым спектром объекта. В качестве примера, на Рис. 3 показано сранение нормированных спектров LBV-кандидата в NGC 4736 и LBV звезды AF And в M31, полученных на БТА с применением SCORPIO-2 (Afanasiev and Moiseev, 2011) с нормированными спектрами моделей из сетки, свёрнутыми с профилем Гаусса шириной 4.3 Å для пригодности их сравнения с наблюдаемыми спектрами умеренного разрешения.

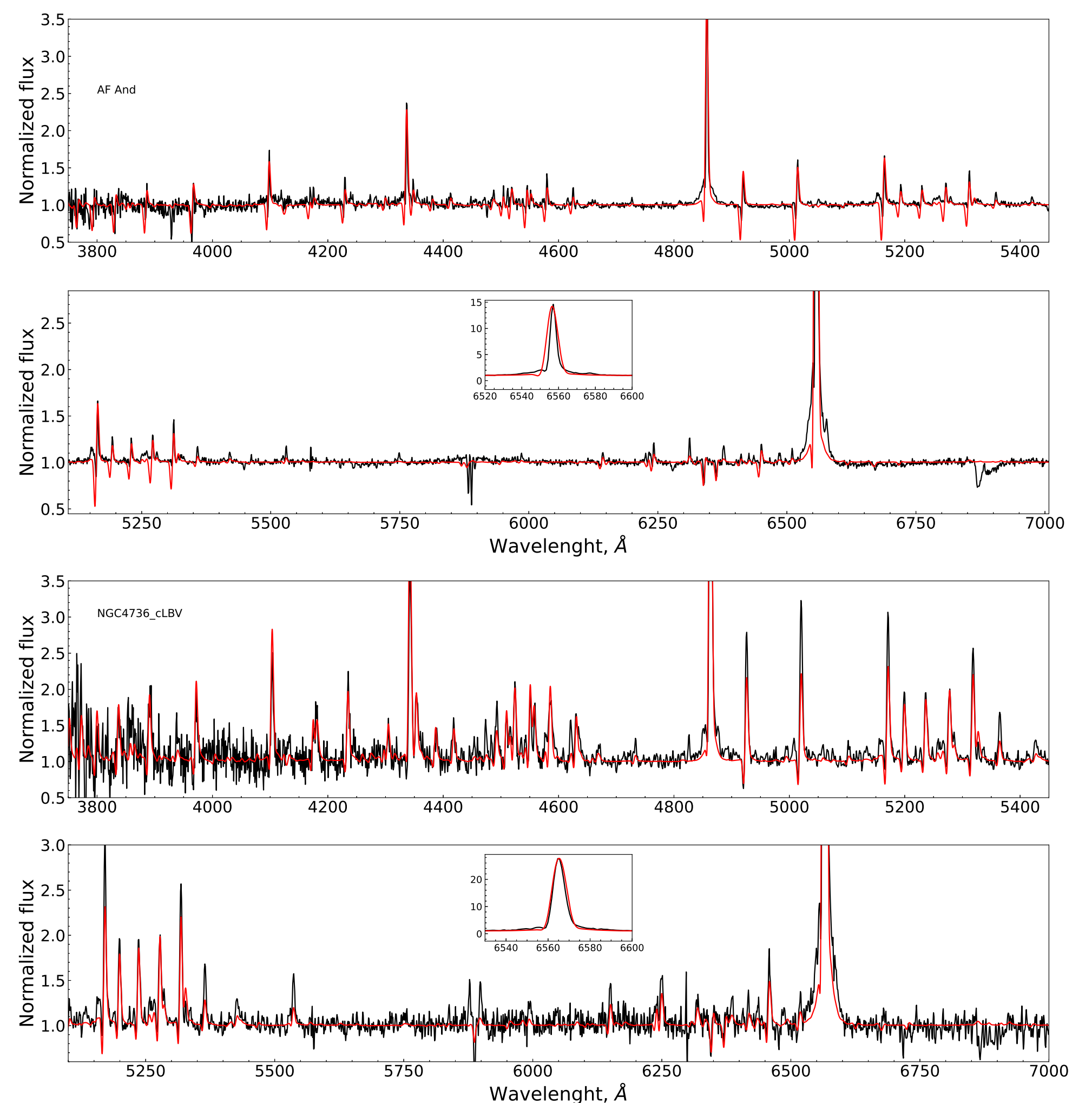


Рис. 3: Нормированный наблюдаемый спектр AF And (верхняя панель) и LBV-кандидата в NGC 4736 (нижняя панель) (черные кривые) и спектры наиболее подходящих моделей из сетки с параметрами $T_* = 10200$ K, $\dot{M} = 5.4 \cdot 10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ и $T_* = 12700$ K, $\dot{M} = 1.4 \cdot 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ соответственно (красные кривые). Модельные спектры сглажены до спектрального разрешения 4.3 Å. На врезке по центру нижних панелей показана линия H α .

Модели из сетки могут быть использованы в качестве начального приближения для дальнейшего уточнения фундаментальных параметров объектов путём расчёта не-ЛТР моделей, а также для построения диаграмм эквивалентных ширин линий, которые упрощают процесс подбора оптимальных параметров и используются для анализа как спектров массивных звёзд, так и других объектов с протяжёнными атмосферами (Kostenkov et al., 2020).

*evdedov@sao.ru

Список литературы

- D. C. Abbott. The theory of radiatively driven stellar winds. II. The line acceleration. *ApJ*, 259:282–301, August 1982. doi: 10.1086/160166.
- V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev. Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects. *Baltic Astronomy*, 20:363–370, August 2011. doi: 10.1515/astro-2017-0305.
- J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Damineli, P. A. Whitelock, F. Marang, and C. Rossi. On the Nature of the Prototype Luminous Blue Variable Ag Carinae. I. Fundamental Parameters During Visual Minimum Phases and Changes in the Bolometric Luminosity During the S-Dor Cycle. *ApJ*, 698(2):1698–1720, June 2009. doi: 10.1088/0004-637X/698/2/1698.
- Jose H Groh, Georges Meynet, Sylvia Ekström, and Cyril Georgy. The evolution of massive stars and their spectra-i. a non-rotating 60 m star from the zero-age main sequence to the pre-supernova stage. *Astronomy & Astrophysics*, 564:A30, 2014.
- D. John Hillier. Hot Stars with Winds: The CMFGEN Code. In Mercedes T. Richards and Ivan Hubeny, editors, *From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools*, volume 282, pages 229–234, April 2012. doi: 10.1017/S1743921311027426.
- D. John Hillier and D. L. Miller. The Treatment of Non-LTE Line Blanketing in Spherically Expanding Outflows. *ApJ*, 496(1):407–427, March 1998. doi: 10.1086/305350.
- D John Hillier, T Lanz, SR Heap, I Hubeny, LJ Smith, CJ Evans, DJ Lennon, and JC Bouret. A tale of two stars: the extreme o7 iaf+ supergiant av 83 and the oc7. 5 iii ((f)) star av 69. *The Astrophysical Journal*, 588(2):1039, 2003.
- Roberta M. Humphreys, Kerstin Weis, Kris Davidson, D. J. Bomans, and Birgitta Burggraf. Luminous and Variable Stars in M31 and M33. II. Luminous Blue Variables, Candidate LBVs, Fe II Emission Line Stars, and Other Supergiants. *ApJ*, 790(1):48, July 2014. doi: 10.1088/0004-637X/790/1/48.
- Carole Jordan. Helium line emission: its relation to atmospheric structure. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 297(1433): 541–554, 1980.
- A Kostenkov, A Vinokurov, Y Solovyeva, K Atapin, and S Fabrika. Modeling of extended atmospheres with temperatures below 40000 k. *Astrophysical Bulletin*, 75(2):182–190, 2020.
- H. J. G. L. M. Lamers, F. Najarro, R. P. Kudritzki, P. W. Morris, R. H. M. Voors, J. I. van Gent, L. B. F. M. Waters, T. de Graauw, D. Beintema, E. A. Valentijn, and D. J. Hillier. The ISO-SWS spectrum of P Cygni. *A&A*, 315:L229–L232, November 1996.