

УДК 524.3-1; 524.33; 524.3-44; 524.38-735

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПРОТЯЖЕННЫХ АТМОСФЕР С ТЕМПЕРАТУРАМИ НИЖЕ 40 000 К

© 2020 А. Костенков^{1,2*}, А. Винокуров¹, Ю. Соловьева¹, К. Атапин³, С. Фабрика^{1,4}¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия³Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия⁴Казанский федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 12 февраля 2020 года; после доработки 23 марта 2020 года; принята к публикации 23 марта 2020 года

Мы рассчитываем модели протяженных звездных атмосфер с температурами в диапазоне 12 000–40 000 К и темпами истечения газа в ветре 10^{-6} – $10^{-4}M_{\odot}$ год⁻¹. Большое количество объектов с эмиссионными спектрами, таких как яркие голубые переменные, звёзды с эмиссиями Fe II, звезды типа Of и поздних Вольфа-Райе азотной последовательности, и даже ультраяркие рентгеновские источники, часто имеют эффективные температуры в указанном диапазоне. В работе представлены результаты расчета сеток моделей в виде диаграмм эквивалентных ширин линий водорода, гелия, кремния и железа, а также результаты исследования некоторых эмиссионных объектов, выполненных с использованием рассчитанных моделей.

Ключевые слова: *звезды: фундаментальные параметры — звезды: переменные: S Doradus — звезды: потеря массы — звезды: ветер, истечения — рентгеновское излучение: двойные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Наличие мощного ветра, создаваемого давлением излучения, является характерной чертой большинства классов массивных звёзд. Наиболее известными среди них являются яркие голубые переменные (luminous blue variables, LBVs), звёзды с эмиссиями Fe II (Fe II—emission line stars), теплые гипергиганты, звезды типа Of и поздних Вольфа-Райе азотной последовательности (late-WN), горячие и промежуточные сверхгиганты, B[e] сверхгиганты (Humphreys et al. 2014). B[e] звезды выделяются тем, что их истечения концентрируются преимущественно в экваториальной плоскости, тогда как у звезд всех остальных классов форма ветров близка к сферически симметричной. Исследование ветров является ключом к пониманию физики этих объектов.

Однако точное определение фундаментальных параметров звезды (L , T_{eff}^1 , R_*) и параметров ветра (\dot{M} , V_{∞} , β) на основе наблюдаемых оптических спектров является непростой задачей ввиду того, что условия в ветре далеки от термодинамического

равновесия. Надежные результаты для конкретного объекта могут быть получены только путем тщательного моделирования его спектра на основе физической модели протяженной атмосферы. Наиболее продвинутыми программами, решающими задачу такого моделирования, на данный момент являются коды CMFGEN (Hillier and Miller 1998) и PoWR (Hamann et al. 2006). Оба кода широко применяются для моделирования спектров LBV и звёзд типа Вольфа-Райе (WR).

Не только звезды демонстрируют звездоподобные ветры. Спектры с мощными и широкими эмиссионными линиями, формируемыми истекающим веществом, также наблюдаются у ультраярких рентгеновских источников (ultraluminous X-ray sources, ULXs). Ультраяркие рентгеновские источники — это яркие точечные внегалактические объекты, находящиеся вне ядер своих родительских галактик, и имеющие светимость более 10^{39} эргс⁻¹. Последнее десятилетие исследований их рентгеновских и оптических спектров выявило, что подавляющее большинство этих объектов являются черными дырами звездных масс или даже нейтронными звездами, аккрецирующими в сверхэдингтоновском режиме (Kaaret et al. 2017, и ссылки в обзоре). Фабрика и др. (Fabrika et al. 2015) показали, что оптические спектры ULX

*E-mail: kostenkov@sao.ru

¹ T_{eff} — температура на оптической глубине $\tau = 2/3$

подобны спектрам LBV и звезд WNLh (разновидность поздних азотных WR-звезд с линиями водорода в спектре). Анализируя соотношение между ширинами линий $H\alpha$ и $He\ II\ \lambda 4686$ в спектрах ULX, LBV, WNL, а также в спектрах двойных систем с черными дырами в нашей Галактике в момент вспышек, они пришли к выводу, что эмиссионные спектры ULX формируются именно в ветрах сверхкритических дисков (которые похожи на ветры звёзд), а не в само-прогреваемых стандартных дисках (которыми обладают двойные системы нашей Галактики). Кроме того, быстрая переменность как эмиссионных линий самих по себе, так и их лучевых скоростей позволяет также с высокой долей вероятности исключить и звёзды-доноры как возможный источник наблюдаемых эмиссий. Мы полагаем, что сходство между истечениями ULX и ветрами звёзд позволяет в первом приближении использовать сферически симметричные модели для оценки параметров ветров ULX.

Аппроксимация наблюдательных данных синтетическим спектром требует расчета множества моделей и сопряжена с затратой большого количества вычислительного времени. Это побудило нас к созданию сеток моделей, которые позволили бы быстро получать оценки параметров ветра. В этой работе мы публикуем первые результаты расчета таких сеток. Мы представляем две сетки моделей — одну для LBV-подобных звезд и одну для ULX (каждая для одного конкретного химического состава), которые покрывают диапазон параметров, типичный для представителей указанных классов. Сетки позволяют оценить температуру фотосферы объекта и темп потери массы в его ветре, используя эквивалентные ширины (equivalent width, EW) определенных линий, измеренные по наблюдаемому спектру. Результаты были протестированы для ряда объектов (LBVs: WS-1, AG Car, P Cyg, Var 15, Var A-1, LBV-кандидат в нашей Галактике (cLBV) MN112; Of/late-WN звёзды: M31-004242.33, M31-004334.50, M31-004341.84; ULXs: Holmberg II X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, UGC 6456 ULX).

2. МЕТОДЫ

Для расчета моделей мы использовали итеративный код CMFGEN (Hillier and Miller 1998), применяющий не-ЛТР подход и учитывающий покровной эффект. Рассчитываемые с помощью этого кода модели характеризуются набором параметров, таких как фундаментальные параметры звезды (L , T_{eff} , R_*), параметры ветра (\dot{M} , V_∞ , β), химический состав, а также ряд дополнительных параметров, среди которых турбулентная скорость V_{turb} и фактор заполнения f . Поле скоростей в

этих моделях описывается уравнением из работы (Hillier 1989), представляющим собой комбинацию решения уравнения гидростатического равновесия в изотермической атмосфере с эффективной высотой h и β -закон скорости в ветре (Lamers et al. 1996).

Использованные для расчета сеток параметры приведены в таблице 1. При подборе фундаментальных параметров и химического состава для сетки моделей LBV-звёзд мы руководствовались результатами ряда авторов (Groh et al. 2009, Mahy et al. 2016, Maryeva and Abolmasov 2010, Najarro et al. 1997a), получившими свои оценки на основе детального моделирования наблюдаемых спектров. В наши модели мы включили следующие ионы: H (I), He (I, II), C (I, II, III), N (I, II, III, IV), Si (II, III, IV), Fe (II, III, IV, V, VI, VII), линии которых хорошо видны в спектрах интересующих нас объектов (например, Humphreys et al. 2014; 2016). Уровни нейтральных ионов азота и углерода были включены для более аккуратного расчета структуры ветра далеко от поверхности звезды. В случае ультраярких рентгеновских источников при выборе диапазонов температур и темпов оттока вещества мы руководствовались результатами нашего собственного моделирования наблюдаемых спектров небольшой выборки объектов. Доля водорода была принята равной солнечной, что следует из наблюдаемого соотношения эмиссионных линий $He\ II/He\ I$ (Fabrika et al. 2015). Металличность ULX обычно принимается равной металличности родительской галактики, которая в большинстве случаев ниже солнечной (например, Kaaret et al. 2017). Для текущей работы было выбрано значение 0.2 от солнечного содержания металлов (таблица 1).

Рассчитанные сетки мы представляем в виде диаграмм эквивалентных ширин выбранных линий для моделей с различными темпами потери массы и температурами. Выбирались линии, обладающие наибольшей чувствительностью к параметрам модели в данном диапазоне значений. Фактически, некоторые из фундаментальных параметров можно определить почти независимо, имея в распоряжении данные даже в относительно малом спектральном диапазоне. Температура может быть оценена на основе сравнения эквивалентных ширин линий, относящихся к разным степеням ионизации одного и того же химического элемента. Например, можно использовать эквивалентные ширины линии $He\ II\ \lambda 4686$ и резонансных линий $He\ I$, однако, этот метод не применим к объектам с температурой ниже $\approx 25\,000$ К. Большинство LBV имеют эффективные температуры ниже $25\,000$ К, в то время как ультраяркие рентгеновские источники демонстрируют более горячие спектры с мощной

Таблица 1. Параметры моделей сетки LBV и сетки ULX

	LBV grid	ULX grid
Температура (на $\tau \approx 20$), kK	$4.08 \leq \lg T_* \leq 4.60$ Шаг 0.025	$4.08 \leq \lg T_* \leq 4.60$ Шаг 0.025
Темп потери массы, $M_\odot \text{yr}^{-1}$	$-5.30 \leq \lg \dot{M} \leq -3.90$ Шаг 0.10	$-6.35 \leq \lg \dot{M} \leq -4.50$ Шаг 0.143
Светимость, L_\odot	$\lg L_* = 5.3$	$\lg L_* = 5.0$
Скорость на бесконечности, km s^{-1}	300	300
Фотосферная скорость, km s^{-1}	30	30
Турбулентная скорость, km s^{-1}	15	15
Показатель β закона скорости	1.0	1.0
Фактор заполнения f	0.3	0.3
X_{H} , %	39.7	70.1
X_{N}/X_\odot	10.8	0.2
X_{C}/X_\odot	0.4	0.2
X_{Si}/X_\odot	1.0	0.2
X_{Fe}/X_\odot	1.0	0.2

линией He II $\lambda 4686$. Приняв этот факт во внимание, мы рассчитали наши модели для диапазона температур 12 000–40 000 К, который покрывает диапазон температур всех объектов, исследуемых в этой работе.

Для оценки температуры в диапазоне 12 000–25 000 К могут быть использованы линии Fe II, Si II вместе с водородными линиями Бальмеровской серии. Относительно высокое обилие ионов Fe II and Si II обусловлено реакциями перезарядки с участием нейтрального водорода и ионов Fe III и Si III. Поскольку соотношение между нейтральным и ионизованным водородом зависит как от температуры, так и от темпа потери массы (доля нейтрального водорода возрастает с ростом плотности ветра), линии ионов Fe II, Si II тоже оказываются очень чувствительны к этим двум параметрам. Для построения диаграмм мы выбрали линии Fe II $\lambda 5169$ и Si II $\lambda 6371$. Эти линии формируются в основном во внешних оптически тонких частях ветра, и поэтому абсорбционные компоненты в их профилях незначительны. Это должно снизить потенциальную ошибку измерения эквивалентной ширины, которая может возникнуть ввиду недостаточного разрешения анализируемого спектра (см. раздел 4).

В спектрах большинства LBV-подобных звезд доминируют линии водорода и гелия. В оптиче-

ском диапазоне присутствует множество синглетных (например, He I $\lambda 5015, \lambda 6678$) и триплетных (например, He I $\lambda 4471, \lambda 5876, \lambda 7065$) линии гелия. Сила синглетных линий значительно зависит от распределения скоростей в ветре. Более низкие скорости вблизи точки перехода от гидростатической области атмосферы к непосредственно ветру (sonic point) соответствуют более высоким плотностям. Это делает выбор показателя закона скорости β , а также выбор самого значения скорости V_0 в точки перехода (эту скорость обычно называют фотосферной) очень важными для корректного моделирования. Однако распределение скоростей вблизи точки перехода не может быть надежно определено на основе только оптических данных, и требуется анализировать ещё и ИК-спектры. Поэтому большинство линий He I непригодны для оценки температуры. Возможно использование только He I $\lambda 5876$ (вместе с He II $\lambda 4686$), поскольку эквивалентная ширина триплета He I $\lambda 5876$ не сильно чувствительна к структуре скоростей вблизи поверхности звезды.

Сила линий, формирующихся в наиболее глубоких частях атмосферы, где Томсоновская непрозрачность становится очень большой, сильно зависит и от турбулентной скорости V_{turb} . Поскольку в этих областях скорости направленного и турбулентного движения ещё сопоставимы, существует

большая вероятность, что фотон из крыла линии (или даже из континуума) в результате рассеяния перераспределится в её центр. После такого перераспределения фотон может снова поглотиться и излучиться в самой линии, делая её ярче (Hillier 1991). Этот механизм, в частности, значительно увеличивает эквивалентную ширину линии He II $\lambda 4686$. В то же время, линии, которые формируются в отдаленных частях атмосферы, где скорости ветра велики, а Томсоновская непрозрачность пренебрежимо мала, могут быть ассиметрично смещены в красную сторону спектра, поскольку фотон, рассеявшийся в крыло линии в дальнейшем уже не может быть снова поглощен, и беспрепятственно покидает среду, в то время как фотоны голубого крыла линии могут поглотиться и рассеяться ещё раз (Hillier 1991). Поэтому значительное отличие оценок температур, получаемых из разных диаграмм, может говорить о значительном вкладе рассеяния у некоторых линий (см. в разделе 4 результаты для звезды WS-1).

Для своих моделей мы выбрали значения $V_0 = 30$ км с⁻¹ и $V_{\text{turb}} = 15$ км с⁻¹. Подобные значения использовались и другими авторами при моделировании спектров LBV звёзд (Groh et al. 2009, Najjro et al. 1997b).

Темпы потери массы можно оценить по эквивалентным ширинам линий водорода бальмеровской серии, учитывая при этом значения температур, полученные методами описанными выше. У объектов с температурами $T \lesssim 20\,000$ К сила абсорбционных компонент линии Бальмеровской серии определяется ионизационным состоянием ветра, и даже небольшие вариации температуры и темпа потери массы в ветре могут значительно изменить его ионизационную структуру (Najjro et al. 1997a). Поэтому для определения этих двух параметров можно использовать соотношение между абсорбционными и эмиссионными компонентами бальмеровских линий, но делать это нужно с большой осторожностью, с учетом детального моделирования, поскольку эти линии имеют мощные крылья, вызванные электронным рассеянием, что в случае низкого разрешения спектров очень затрудняет точное измерение эквивалентных ширин абсорбционных и эмиссионных компонент. Как в этом случае следует применять диаграммы эквивалентных ширин, мы обсудим в разделе 4.

Для учета возможной неоднородности ветра в моделях CMFGEN используется параметр (фактор) заполнения ветра (Hillier and Miller 1999). Коэффициенты излучения и поглощения зависят от плотности квадратично, а вероятность электронного рассеяния — линейно. Поэтому, по сравнению с моделями со сплошным ветром, в моделях с клампингом крылья ярких линий, возникающие,

главным образом, из-за электронного рассеяния, оказываются слабее (Hillier 1991). Фактор заполнения f и темп потери массы являются взаимозависимыми параметрами. Темп потери массы в модели со сплошным ветром \dot{M}_0 и в модели с клампингом \dot{M}_{cl} , описывающими один и тот же наблюдаемый спектр, связаны между собой соотношением $\dot{M}_{\text{cl}} = \dot{M} f^{-0.5}$. В наших расчетах мы приняли $f = 0.3$. Чтобы привести полученные нами темпы истечения вещества в ветре к другому значению фактора заполнения, следует использовать формулу $\dot{M}_{\text{new}} = \dot{M}_{\text{old}} \sqrt{f_{\text{new}}/0.3}$.

Скорость ветра на бесконечности V_∞ может быть определена независимо от других параметров путем измерения FWHM запрещенных линий, формирующихся во внешних частях ветра, где ветер движется с уже практически постоянной скоростью. В частности, для LBV-звезд с температурами $T \lesssim 20\,000$ К можно использовать некоторые линии [Fe II] а также линию [N II] $\lambda 5755$ (Stahl et al. 1991). Если эти линии в спектре отсутствуют, скорость на бесконечности может быть определена по голубому смещению абсорбционных компонент линий водорода и He I по отношению к их эмиссионным пикам после учета влияния спектрального разрешения (например, Maryeva and Abolmasov 2010). Однако стоит помнить, что результат, полученный этим методом, может значительно зависеть от выбора показателя β .

Модели каждой сетки рассчитывались для фиксированной светимости (таблица 1). Тем не менее, результаты моделирования могут быть приведены к наблюдаемой светимости при выполнении двух условий, позволяющих оставить неизменными эквивалентные ширины линий водорода и гелия: сохранение величин эффективной температуры и функции плотности ветра $\dot{M}/(V_\infty R_*^3)$ (Schmutz 1988). Используя в качестве начального приближения соотношения $\dot{M} \sim R_*^3$ и $L \sim R_*^2$, можно получить следующую формулу перехода:

$$\dot{M}_{\text{new}} = \dot{M}_{\text{old}} \sqrt{f_{\text{new}}/0.3} \quad (1)$$

$$(V_{\text{new}}/V_{\text{old}}) \times (L_{\text{new}}/L_{\text{old}})^{3/4}$$

Однако, в действительности изменения темпа потери массы (а следовательно, и плотности ветра) меняют положение нижней границы атмосферы и влияют на эффективную температуру, поэтому приведенная выше формула может оказаться недостаточной точна. Более точные соотношения между параметрами LBV звезд получены в работе (Najjro 2001).

3. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для проверки сеток моделей были выбраны четыре ULX и десять LBV, cLBVs и Of/late-WN звезд, расположенных в нашей Галактике и в M31. Эквивалентные ширины линий трех ULX (Holmberg II X-1, NGC 5204 X-1 и NGC 4559 X-7) были взяты из работы (Fabrika et al. 2015). Для Галактических LBV AG Car, P Cygni, WS-1 и cLBV MN112 мы использовали данные из статей Groh et al. (2009), Gvaramadze et al. (2010; 2012) соответственно. Спектры LBV Var15 и VarA-1 и спектры Of/late-WN звезды (M31-004242.33, M31-004334.50, M31-004341.84) были взяты с веб-страницы Группы исследования Eta Car Университета Миннесоты² (см. также Humphreys et al. (2016)). Для ультраяркого рентгеновского источника в галактике UGC 6456, помимо анализа с использованием сеток, мы провели полное моделирование его наблюдаемого спектра, и сравнили полученные результаты между собой. Спектральные наблюдения UGC 6456 ULX проводились на 6-метровом телескопе БТА 7 сентября 2015 года при помощи фокального редуктора SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005) в диапазонах 4000–5700 Å и 5700–7500 Å с разрешением 5.3 Å. Редукция данных проводилась стандартным образом в среде MIDAS с использованием контекста LONG.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На результаты измерений эквивалентных ширин и, соответственно, на получаемые параметры, может оказывать существенное влияние спектральное разрешение исходных данных. Самым ярким примером является сглаживание при плохом разрешении P-Cygni профиля линий, вплоть до полного его исчезновения. Это приводит к перераспределению яркости в профиле линии и искажению измеряемых эквивалентных ширин. Аккуратное исправление за аппаратный профиль без детального моделирования зачастую представляется невозможным ввиду того, что первоначальный профиль линии неизвестен и может в действительности оказаться очень сложным (многокомпонентным). Поэтому, для того чтобы наши сетки могли быть применимы и к спектрам с низким разрешением, мы построили дополнительные диаграммы, свернув модельные спектры с профилем Гаусса. На рис. ?? приведены диаграммы для оригинального разрешения (без сглаживания), а на рис. ?? сглаженные до 5 Å. Сравнение рис. 1 с рис. 3 (верхние правые и нижние панели) и рис. 2 с рис. 4 показывает,

что влияние спектрального разрешения на эквивалентные ширины линий H α и He I λ 5876 минимально ввиду слабости абсорбционных компонент этих линий. Более значимый вклад абсорбционных компонент в эквивалентную ширину линий можно увидеть на примере линий H β и Fe II λ 5169 (см. верхние левые панели рис. 1 и 3). Различие в оценках температуры и темпа потери массы, полученных на основе диаграмм H β – Fe II λ 5169 для высокого и низкого разрешений, составляет $\Delta T \approx 500$ K, $\Delta \dot{M} \approx 0.05$ порядка величины для объектов с температурами $\gtrsim 19000$ K и $\Delta T \approx 2000$ K, $\Delta \dot{M} \approx 0.1$ –0.2 порядка величины для объектов с температурами 12 000–16 000 K.

Мы сравнили параметры AG Car в горячем состоянии, полученные из диаграммы He II λ 4686 – H α с результатами детального моделирования. Наши оценки $T_* \approx 27000$ K и $\dot{M}_{cl} \approx 4.9 \times 10^{-5} M_\odot \text{ год}^{-1}$ хорошо согласуются с параметрами $T_* = 26200$ K и $\dot{M}_{cl} = 6.3 \times 10^{-5} M_\odot \text{ год}^{-1}$ ($\lg L_* = 6.17$, $V_\infty = 300$ км с⁻¹, $f = 0.1$), представленными в работе (Groh et al. 2009).

Также мы сравнили темп потери массы и температуру P Cygni, измеренные на основе диаграммы H α –Si II λ 6371, с модельными параметрами из недавней работы (Rivet et al. 2019). Расхождение между оценками на основе сеток $T_* \approx 18500$ K, $\dot{M}_{cl} \approx 4.4 \times 10^{-5} M_\odot \text{ год}^{-1}$ и более точными значениями из моделирования $T_* = 18700$ K, $\dot{M}_{cl} = 4.0 \times 10^{-5} M_\odot \text{ год}^{-1}$ составляют всего $\lesssim 2\%$ по температуре и $\approx 9\%$ по темпу потери массы ($\lg L_* = 5.79$, $V_\infty = 185$ км с⁻¹, $f = 0.5$).

Положения LBV-звезд Var A-1 and Var 15 на диаграмме H β –Fe II λ 5169 (верхняя левая панель рис. 3) обозначены треугольником и ромбом. Различные цвета соответствуют наблюдениям разных лет: 2010 год — черный, 2013 — серый и 2015 — белый. Из диаграммы видно, что за эти несколько лет Var A-1 перешла в более высокое состояние ионизации. Эквивалентная ширина эмиссионной компоненты H β звезды Var A-1 поменялась незначительно ($\approx 12\%$), однако уменьшение эквивалентных ширин абсорбционных компонент Fe II и H β свидетельствует о значительном изменении ионизационной структуры ветра.

В спектре Галактической LBV WS-1 наблюдается линия He II λ 4686, однако в целом эта звезда показывает более "холодный" спектр с линиями Si II, N II and Fe III, которые соответствуют температурам $T_* < 23000$ K (Kniazev et al. 2015). Оценка температуры, полученная по диаграмме He I λ 5876 – He II λ 4686, составляет $T_* \approx 27000$ K. С другой стороны, диаграмма H β –Si II λ 6371 дает оценки $T_* = 15200$ K,

²<http://etacar.umn.edu/>

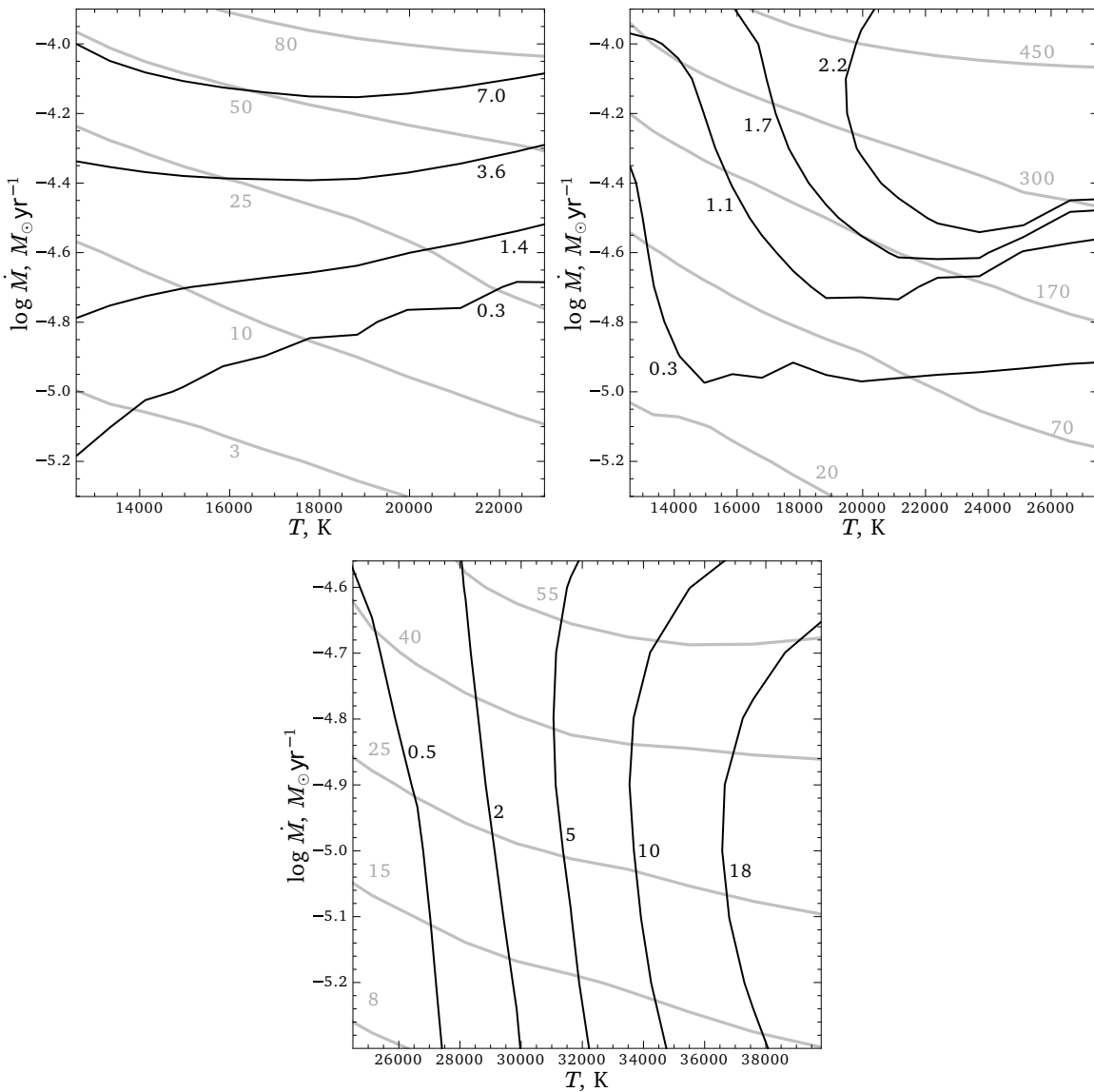


Рис. 1. Диаграммы эквивалентных ширин линий моделей LBV-звезд (параметры сетки: светимость $\lg L_*/L_\odot = 5.3$, скорость на бесконечности $V_\infty = 300 \text{ км с}^{-1}$, фактор заполнения $f = 0.3$, солнечная металличность) для спектров высокого разрешения; левая верхняя панель: $\text{H}\beta$ (серые линии) и $\text{Fe II } \lambda 5169$ (черные линии); правая верхняя панель: $\text{H}\alpha$ (серые линии) и $\text{Si II } \lambda 6371$ (черные линии); нижняя панель: $\text{He I } \lambda 5876$ (серые линии) and $\text{He II } \lambda 4686$ (черные линии).

$\lg \dot{M} = -4.72 M_\odot \text{ год}^{-1}$, либо $T_* = 18\,800 \text{ К}$, $\lg \dot{M} = -4.87 M_\odot \text{ yr}^{-1}$ (контуры эквивалентных ширин пересекаются дважды, рис. 3). Мы полагаем, что ввиду отсутствия линий Si II , N II и Fe III значения температуры $T_* \approx 19\,000\text{--}22\,000 \text{ К}$ выглядят более правдоподобно (черный кружок на рис. 3b); в усилении линии $\text{He II } \lambda 4686$, вероятно, большую роль играет электронное рассеяние, что и приводит к завышению температур, получаемых по диаграмме $\text{He I } \lambda 5876 - \text{He II } \lambda 4686$. Этот эффект может быть связан с очень большой протяженностью фотосферы или высокой турбулентной скоростью.

Голубой и красный спектры UGC 6456 ULX

вместе с аппроксимирующей их моделью показаны на рис. 5. В водородных линиях присутствует небольшой вклад от находящейся рядом с объектом туманности, который невозможно полностью устранить при экстракции спектра. Спектр имеет относительно низкое соотношение сигнал-шум из-за низкой яркости объекта ($m_V \approx 20.3^m$). Болومترическая светимость на расстоянии родительской галактики 4.54 Мпк (Tully et al. 2013) равна $\approx 2 \times 10^6 L_\odot$ (для поглощения $A_V = 0.2 \pm 0.1$). По результатам детального моделирования скорость на бесконечности была увеличена до 2100 км/с и β до 1.35 . Полученные

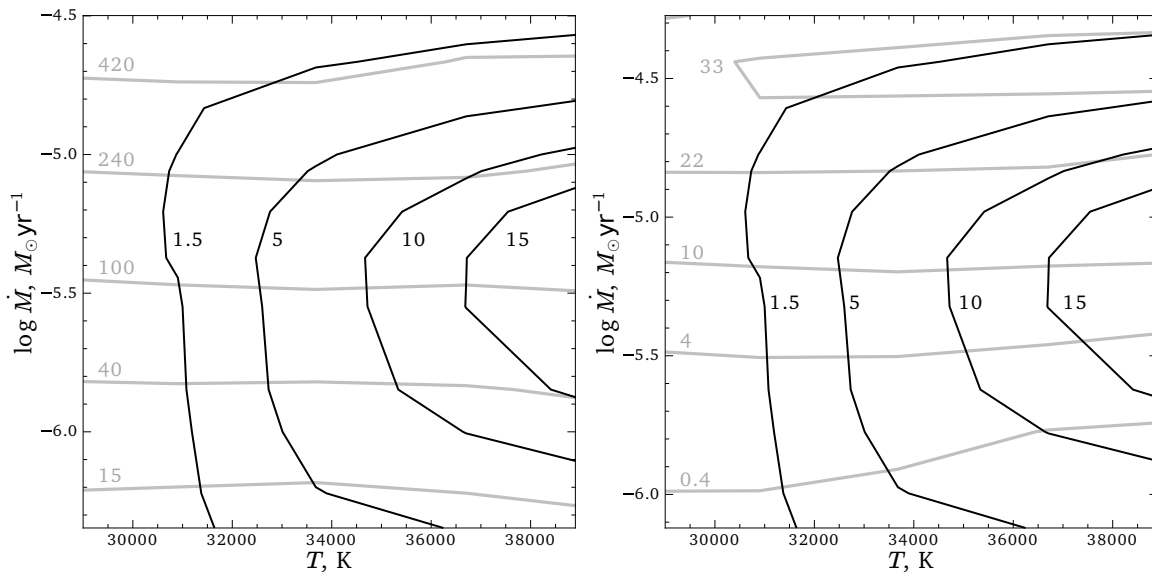


Рис. 2. Диаграммы эквивалентных ширин линий моделей ультраярких рентгеновских источников (параметры сетки: светимость $\lg L_*/L_\odot = 5.0$, скорость на бесконечности $V_\infty = 300 \text{ km s}^{-1}$, фактор заполнения $f = 0.3$, металличность, равная 0.2 от солнечного значения) для спектров высокого разрешения; левая панель: $\text{H}\alpha$ (серые линии) и $\text{He II } \lambda 4686$ (черные линии); правая панель: $\text{He I } \lambda 5876$ (серые линии) и $\text{He II } \lambda 4686$ (черные линии).

из моделирования температура и темп истечения равны $T_* = 31\,250 \text{ K}$ и $\dot{M} = 2.7 \times 10^{-5} M_\odot \text{ год}^{-1}$ для фактора заполнения $f = 0.3$, в то время как определенная по сеткам температура оказалась $33\,000^{+2100}_{-750} \text{ K}$. Темп потери массы, полученный из сеток и приведенный к наблюдаемым светимости и скорости ветра с помощью формулы (1), равен $7.6^{+2.0}_{-3.3} \times 10^{-5} M_\odot \text{ год}^{-1}$ (исходное значение составляло $1.2^{+0.3}_{-0.5} \times 10^{-6} M_\odot \text{ год}^{-1}$). Большая величина ошибки темпа потери массы в ветре связана с неопределенностью вклада туманности в эквивалентную ширину линии $\text{H}\alpha$. Таким образом, значения параметров, полученные путем детального моделирования и оцененные из сеток согласуются друг с другом в пределах 3σ -ошибок по температуре T_* и в пределах 2σ -ошибок по темпу истечения \dot{M} , хотя и существует большая разница между двумя оценками \dot{M} .

Три других ультраярких рентгеновских источника расположены в той же области диаграммы, что и UGC 6456 ULX. Их температуры находятся в диапазоне $34\,000\text{--}36\,000 \text{ K}$, а темпы потери масс, полученные по $\text{He II} - \text{H}\alpha$ диаграмме — в диапазоне $(0.9\text{--}1.3) \times 10^{-6} M_\odot \text{ год}^{-1}$. Для объекта NGC 4559 X-7 мы дополнительно воспользовались диаграммой $\text{He II} - \text{He I } \lambda 5876$ и получили согласие между полученными двумя способами оценками на уровне 1σ (T_*) и 3σ -ошибок (\dot{M}). Чтобы исправить полученные темпы потери массы за наблюдаемые болометрические светимости, для

вычисления последних были использованы звёздные величины в фильтре V (Tao et al. 2011), величины межзвездного поглощения из работ (Tao et al. 2011) и (Vinokurov et al. 2018), и температуры из нашего собственного моделирования; грубые оценки скорости ветра получены по ширинам линии $\text{H}\alpha$ (Fabrika et al. 2015). После коррекции темпы истечения ULX оказались в диапазоне $(1.1\text{--}2.8) \times 10^{-5} M_\odot \text{ yr}^{-1}$.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы представили сетки моделей протяженных атмосфер, реализованные в виде диаграмм эквивалентных ширин эмиссионных линий, наблюдаемых в спектрах LBV-подобных звезд и ультраярких рентгеновских источников. Основной идеей их расчета было создание инструмента для простой и быстрой оценки температуры и темпа потери массы в ветрах этих объектов. Мы показали, что параметры ветров, измеренные с помощью сеток и полученные на основе детального моделирования, демонстрируют довольно хорошее согласие между собой. По крайней мере для LBV-звезд, как это было показано на примере AG Car, получаемые нами значения \dot{M} и T_* согласуются с результатами других авторов. Это позволяет рассматривать сетки в качестве хорошей альтернативы сложным и затратным по времени вычислениям в случаях, когда высокая точность не требуется. Более того, в будущем мы планируем выложить в открытый доступ и сами модели CMFGEN, которые использовались для создания сеток, чтобы у

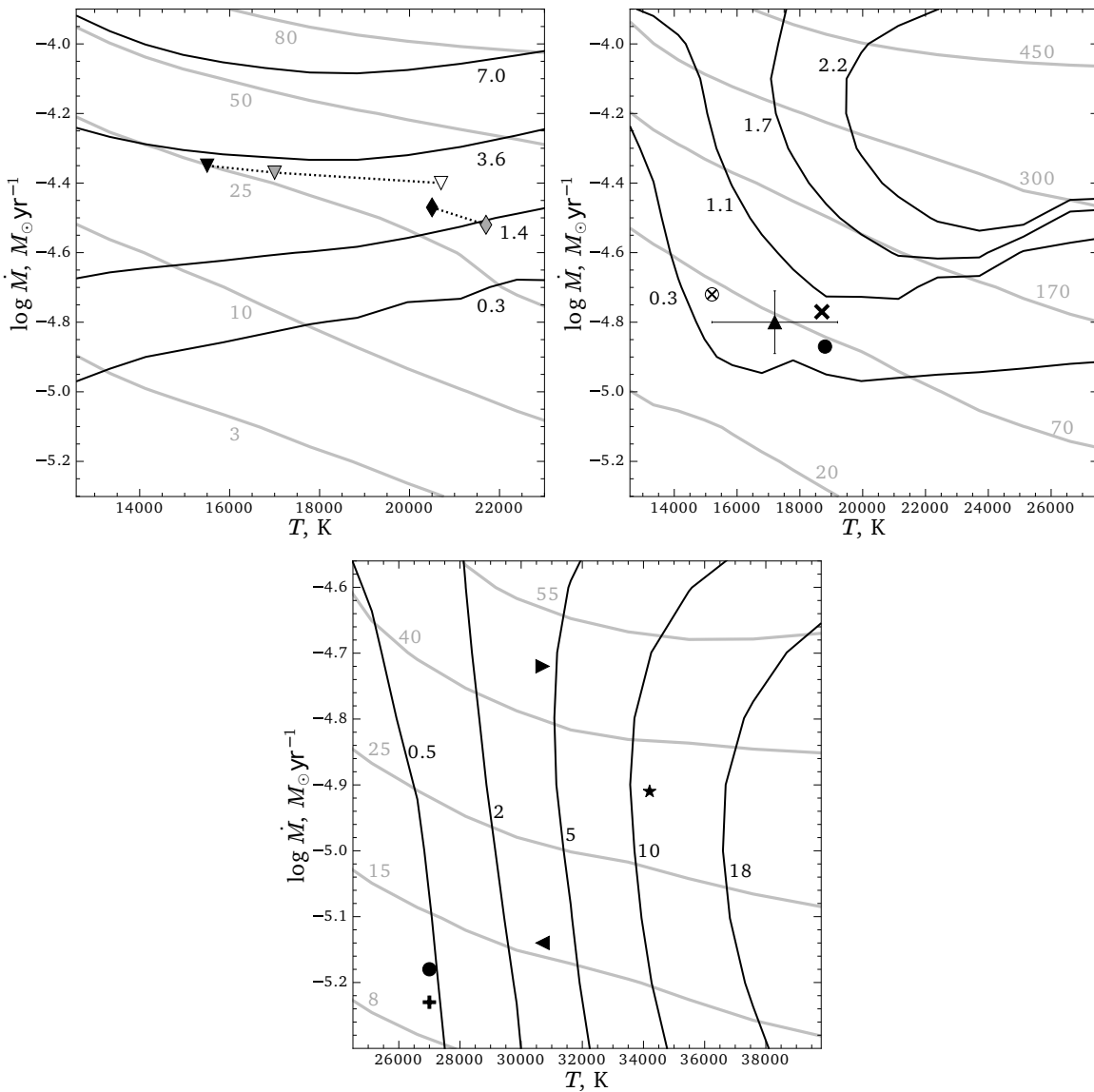


Рис. 3. Диаграммы эквивалентных ширин; обозначения те же, что и на рис. 1, но спектральное разрешение модельных спектров соответствует 5 \AA . Положения звезд на диаграмме обозначены следующими символами: WS-1 — кружок, AG Car — плюс, P Cygni — крест, MN112 — треугольник, повернутый вершиной вверх, Var A-1 — треугольники с вершиной вниз, Var 15 — ромбы, M31-004242.33 — треугольник с вершиной направо, M31-004334.50 — звезда, M31-004341.84 — треугольник с вершиной налево. Переходы между различными состояниями звезд Var A-1 и Var 15 показаны символами разного цвета (черный, серый и белый). Альтернативное положение звезды WS-1 из-за повторного пересечения контуров на диаграмме $H\alpha - \text{Si II } \lambda 6371$ (см. текст) показано перечёркнутым кружком.

научного сообщества была возможность использовать их в качестве начального приближения в своих вычислениях.

Для ультраярких рентгеновских источников в настоящее время нет надежных оценок темпов истечения материи. Имеющиеся оценки ($10^{-5} - 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$) либо основаны на сравнении этих объектов с единственным известным сверхаккректором в нашей Галактике SS433 (Fabrika et al. 2015), либо получены на основе наблюдаемых рентгеновских светимостей ULX. Оценки темпе-

ратур фотосфер также варьируются в широких пределах (от нескольких десятков тысяч до сотен тысяч Кельвин) в зависимости от начальных предположений (например, Fabrika et al. 2015, Tao et al. 2011; 2012). Таким образом, полученные в этой работе значения \dot{M} и T в целом не противоречат предыдущим оценкам.

Наличие мощных истечений газа из ULX было надежно доказано рентгеновской спектроскопией последних нескольких лет. В результате этих исследований были открыты относительно слабые

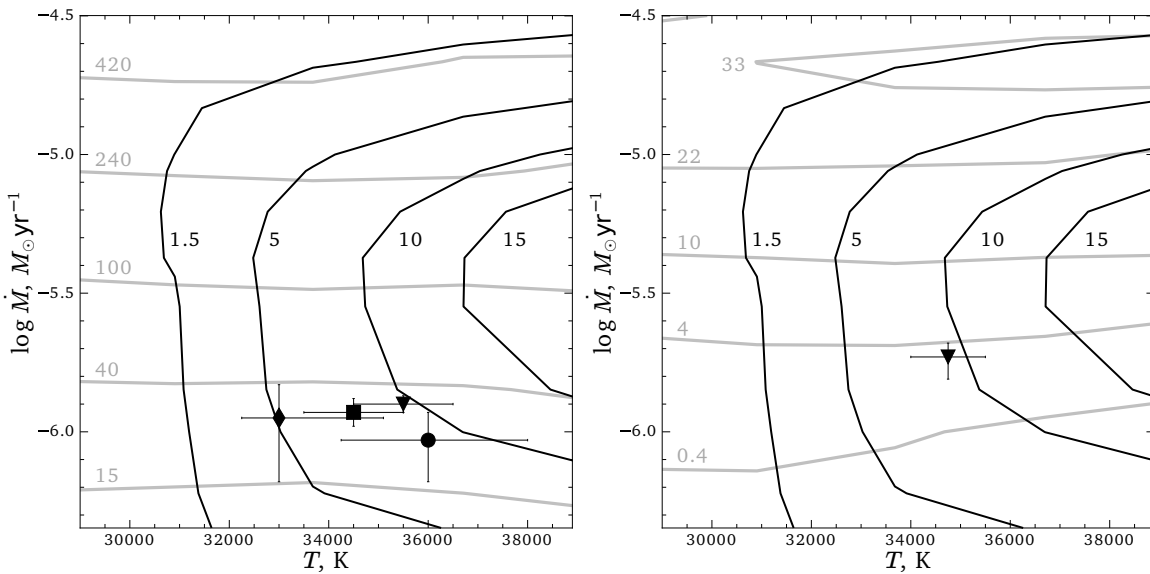


Рис. 4. Диаграммы эквивалентных ширин; обозначения те же, что на рис. 2, но для спектрального разрешения 5 \AA . Кругом обозначено положение Holmberg II X-1, квадратом — NGC 5204 X-1, треугольником — NGC 4559 X-7, ромбом — UGC 6456 ULX.

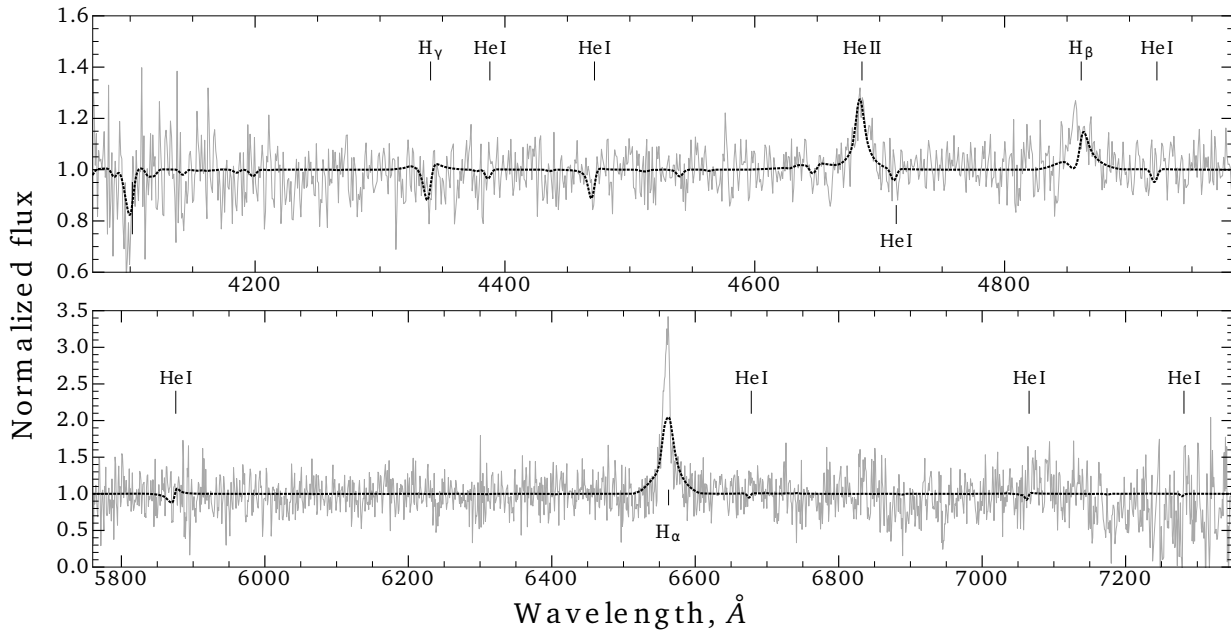


Рис. 5. Наблюдаемый спектр ULX в галактике UGC 6456 (сплошная серая линия) и модельный спектр, сглаженный до разрешения 5 \AA (черная пунктирная линия).

эмиссионные и абсорбционные линии, смещенные в голубую сторону (около 0.2 c), что является прямым свидетельством так называемых ультрабыстрых истечений (ultrafast outflows, UFO, Pinto et al. 2017; 2016). Для ULXs, оптические спектры которых рассматриваются в этой работе, UFO было достоверно найдено только в случае NGC 5204 X-1; для Holmberg II X-1 сообщается

лишь о предварительном обнаружении быстрого истечения (Pinto et al. 2020), а для оставшихся двух ULXs (NGC 4559 X-7 и UGC 6456 ULX) нет работ, посвященных поиску UFO. Скорости быстрых истечений на $1.5\text{--}2$ порядка величины превосходит скорости обычных ветров, получаемые на основе измерений ширин эмиссионных линий и моделирования оптических спектров ULXs. Такое различие в скоростях может указывать на то, что рентгенов-

ский и оптический спектры формируются в разных областях ветра. Действительно, 2D-RHD расчеты структуры истечения с поверхности сверхкритического диска, проведенные разными авторами, показали неоднородность ветра: вдоль оси вращения формируется канал суб-релятивистского истечения (несколлимированный джет) с температурами газа $T_{\text{gas}} \sim 10^{7.5} - 10^8$ К, тогда как более холодный ($T_{\text{gas}} \sim 10^{6.5}$ К), плотный ($\rho \sim 10^{-6}$ г см $^{-3}$) и медленный ($v < 0.01$ с) газ выбрасывается из более дальних областей диска в других направлениях (например, Kawashima et al. 2012).

Также следует отметить, что наличие канала в ветре ULX нарушает его сферическую симметрию, что в некоторых случаях может сделать модели CMFGEN неприменимыми. Тем не менее, имеющиеся на текущий момент данные не показывают значительного расхождения между наблюдаемыми и модельными спектрами, и, по-видимому, если различие геометрии всё же влияет на форму спектров, то это влияние не существенно.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана грантом РФФИ 18-32-20214. А. К. также благодарит за поддержку грант РФФИ 19-02-00311, С. Ф. благодарит за поддержку грант РФФИ 19-02-00432. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
2. S. Fabrika, Y. Ueda, A. Vinokurov, et al., *Nature Physics* **11** (7), 551 (2015).
3. J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Daminieli, et al., *Astrophys. J.* **698** (2), 1698 (2009).
4. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, S. Fabrika, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 520 (2010).
5. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, A. S. Miroshnichenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421** (4), 3325 (2012).
6. W.-R. Hamann, G. Gräfener, and A. Liermann, *ASP Conf. Ser.* **353**, 185 (2006).
7. D. J. Hillier, *Astrophys. J.* **347**, 392 (1989).
8. D. J. Hillier, *Astron. and Astrophys.* **247**, 455 (1991).
9. D. J. Hillier and D. L. Miller, *Astrophys. J.* **496**, 407 (1998).
10. D. J. Hillier and D. L. Miller, *Astrophys. J.* **519**, 354 (1999).
11. R. M. Humphreys, K. Weis, K. Davidson, et al., *Astrophys. J.* **790** (1), 48 (2014).
12. R. M. Humphreys, K. Weis, K. Davidson, et al., *VizieR Online Data Catalog J/ApJ/790/48* (2016).
13. P. Kaaret, H. Feng, and T. P. Roberts, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **55** (1), 303 (2017).
14. T. Kawashima, K. Ohsuga, S. Mineshige, et al., *Astrophys. J.* **752** (1), 18 (2012).
15. A. Y. Kniazev, V. V. Gvaramadze, and L. N. Berdnikov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, L60 (2015).
16. H. J. G. L. M. Lamers, F. Najarro, R. P. Kudritzki, et al., *Astron. and Astrophys.* **315**, L229 (1996).
17. L. Mahy, D. Hutsemékers, P. Royer, and C. Waelkens, *Astron. and Astrophys.* **594**, A94 (2016).
18. O. Maryeva and P. Abolmasov, *arXiv:1006.1068* (2010).
19. F. Najarro, *ASP Conf. Ser.* **233**, 133 (2001).
20. F. Najarro, D. J. Hillier, and O. Stahl, *Astron. and Astrophys.* **326**, 1117 (1997a).
21. F. Najarro, R. P. Kudritzki, D. J. Hillier, et al., *ASP Conf. Ser.* **120**, 105 (1997b).
22. C. Pinto, A. Fabian, M. Middleton, and D. Walton, *Astronomische Nachrichten* **338** (234), 234 (2017).
23. C. Pinto, M. Mehdipour, D. J. Walton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **491** (4), 5702 (2020).
24. C. Pinto, M. J. Middleton, and A. C. Fabian, *Nature* **533** (7601), 64 (2016).
25. J. P. Rivet, A. Siciak, E. S. G. de Almeida, et al., *arXiv:1910.08366* (2019).
26. W. Schmutz, *IAU Colloq.* **305**, 133 (1988).
27. O. Stahl, H. Mandel, T. Szeifert, et al., *Astron. and Astrophys.* **244**, 467 (1991).
28. L. Tao, H. Feng, F. Grisé, and P. Kaaret, *Astrophys. J.* **737** (2), 81 (2011).
29. L. Tao, P. Kaaret, H. Feng, and F. Grisé, *Astrophys. J.* **750** (2), 110 (2012).
30. R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **146** (4), 86 (2013).
31. A. Vinokurov, S. Fabrika, and K. Atapin, *Astrophys. J.* **854** (2), 176 (2018).

Modeling of Extended Atmospheres with Temperatures below 40 000 K

A. Kostenkov, A. Vinokurov, Y. Solovyeva, K. Atapin, and S. Fabrika

We calculate models of extended stellar atmospheres with a temperature in the range of 12 000–40 000 K and a mass loss rate of 10^{-6} – $10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. A large number of objects with emission spectra, such as luminous blue variables, Fe II—emission line stars, Of/late-WN stars, and even ultraluminous X-ray sources often have effective temperatures in this range. The paper presents the results of model grids calculating in the form of equivalent width diagrams for the selected lines of hydrogen, He, Si, and Fe, as well as the results of studies of some emission objects using the calculated models.

Keywords: *stars: fundamental parameters—stars: variables: S Doradus—stars: mass-loss—stars: winds, outflows—X-rays: binaries*