

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Рыспаева Елизавета Борисовна

**МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ЗВЕЗД
РАННИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КЛАССОВ**

01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва

2021

Работа выполнена на кафедре астрофизики математико-механического факультета СПбГУ.

Научный руководитель — *Холтыгин Александр Фёдорович, доктор физико-математических наук*

Официальные оппоненты — *Бычков Константин Вениаминович, доктор физико-математических наук, ГАИШ МГУ, отдел звездной астрофизики, ведущий научный сотрудник*

— *Бикмаев Ильфан Фяритович, доктор физико-математических наук, доцент, член-корреспондент Академии Наук Республики Татарстан, КФУ, Отделение астрофизики и космической геодезии Института Физики, старший научный сотрудник; КФУ, кафедра астрономии и космической геодезии Института Физики, профессор*

— *Чариков Юрий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, лаборатория космических лучей, старший научный сотрудник*

Защита диссертации состоится «20» мая 2021 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: e.ryspaeva@yandex.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/355359414/>

Автореферат разослан «01» апреля 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

М.В. Пружинская

1 Общая характеристика работы

На диаграмме Гершпрунга-Рассела в рентгеновской области спектра (см. Рис. 2 в обзоре [17]) звезды спектральных классов О и В занимают место самых ярких источников и механизмы формирования их рентгеновского излучения являются самыми загадочными. Прямая взаимосвязь магнитной активности звезды с генерацией рентгеновских фотонов, характерная для звезд средних и поздних спектральных классов, не свойственна ОВ звездам. Во-первых, не все ранние звезды обладают сильными магнитными полями, но при этом ярко излучают в рентгеновской части спектра. Во-вторых, звездные ветры ОВ звезд на несколько порядков величины плотнее, чем у звезд солнечного типа и температура звездных ветров ОВ звезд близка к поверхностной температуре [13]. Поэтому рентгеновское излучение ранних звезд не может генерироваться в результате корональных процессов, подобным тем, что происходят в маломассивных звездах, а должно определяться главным образом мощными ветрами ОВ звезд.

Кроме того, среди ОВ звезд существует множество подклассов и звезд с особенностями, которые могут существенно влиять на процессы, приводящие к рентгеновскому излучению. В настоящее время не разработано единой теории, объясняющей механизмы его формирования для всех ОВ звезд. Начиная с работ Cassinelly & Olson [7], Cherepashchuk [10] было выдвинуто множество гипотез. Автором диссертации было предложено разделить существующие теории на два семейства.

1. Модели теплового рентгеновского излучения ОВ звезд, согласно которым, рентгеновское излучение исходит из горячего газа в звездных атмосферах;

2. Модели нетеплового рентгеновского излучения ОВ звезд.

К *первому семейству* можно отнести следующие основные гипотезы. Детальные одномерные гидродинамические модели предсказывающие развитие мощных ударных волн [15, 38, 48] в результате неустойчивости, присущей радиационно-индуцируемым звездным ветрам [28, 27]. В рамках этих моделей часть холодного вещества звездного ветра (с температурой $\sim 10^4$ К) нагревается в ударных волнах до $\sim 10^6 - \sim 10^7$ К и охлаждается при испускании рентгеновских квантов.

Hiller et al. [20] разработали, а Feldmeier et al. [14] дополнили гидродинамическую модель описывающую рентгеновское излучение, которое формируется когда быстродвижущийся сгусток газа сталкивается с медленнее движущейся плотной газовой оболочкой (далее в тексте – модель Hiller-Feldmeier). Авторы рассчитали коэффициент излучения в модели плазмы, состояние которой определяется столкновениями с электронами и перенос излучения в линиях и учли воздействие радиационного и адiabатического охлаждения среды за фронтом ударной волны. Согласно гипотезе указанных авторов все ударные волны в звездном ветре имеют одинаковые температуры и коэффициенты заполнения.

В рамках другого набора схожих моделей предполагалось, что в звездном ветре присутствуют сгущения, которые находятся в разреженном газе с меньшим давлением излучения [18, 26]. Эти сгущения могут формироваться как в результате неустойчивости радиативного звездного ветра [28], так и непосредственно в звездной фотосфере или даже в более глубоких подфотосферных слоях [5, 56]. Когда

газовые сгущения распространяются в ветре, образуются ударные волны, в которых нагревается газ за фронтом ударной волны и излучает в рентгеновской части спектра.

В статьях [22, 6] были рассчитаны температуры и плотности газа, нагретого ударными волнами в ветре, для интерпретации свойств рентгеновского излучения горячих звезд: степенного распределения получаемой из анализа наблюдений меры эмиссии, и широкого диапазона стадий ионизации атомов, которые присутствуют в звездных ветрах. Cassinelli & Swank [8] и Waldron & Cassinelli [56] также предложили "гибридную" модель, объясняющую рентгеновское излучение массивных звезд комбинацией нагрева плазмы в областях локальных магнитных полей при пересоединении магнитных силовых линий и нагрева плазмы ударными волнами в звездном ветре.

Так как магнитосферы многих ОВ звезд имеют дипольную структуру, большинство авторов утверждают, что рентгеновское излучение магнитных ОВ звезд формируется в рамках модели ударной волны в звездном ветре, ограниченной магнитным полем (англ. Magnetic confined wind shock model, далее в тексте - MCWS). Эта модель изначально была разработана Babel & Montmerle [4] для магнитных Ар/Вр звезд на основании наблюдения звезды IQ Aur на спутнике "ROSAT". Затем модель была развита в теоретических работах A. ud-Doula и соавторов [52, 53, 54]. В рамках модели MCWS потоки вещества звездного ветра движутся вдоль силовых линий магнитного поля звезды к области магнитного экватора. Там потоки сталкиваются и образуют стоячую ударную волну. За ударной волной формируются тонкий плотный околосветодный диск и протяженная горячая разреженная область, которая и генерирует рентгеновское излучение. Несмотря на то, что столкновение звездных ветров можно считать лобовым, магнитное поле звезды может ограничивать потоки звездного ветра только до расстояния альвеновского радиуса. Babel & Montmerle выдвинули условия применимости модели, согласно которым нижний предел поверхностного магнитного поля звезды должен составлять 10-100 Гс, а радиус околосветодного диска - не более 4 радиусов звезды, и вывели аппроксимационную формулу, связывающую рентгеновскую светимость ОВ звезд L_X (в эрг s^{-1}) с напряженностью магнитного поля на полюсах B (в кГс), скоростью потери массы $\dot{M}$ (в единицах $10^{-10} M_\odot yr^{-1}$), терминальной скоростью звездного ветра v_∞ (в единицах $1000 \text{ км } s^{-1}$):

$$L_X = 2.6 \cdot 10^{32} \dot{M}_{10} \left(\frac{v_\infty}{10^3 \text{ км } s^{-1}} \right) B_{\text{kG}}^{0.4}, \quad (1)$$

Позднее ud-Doula & Owocki [52] ввели понятие коэффициента магнитного удержания.¹ Это безразмерная величина, характеризующая отношение магнитной энергии и кинетической энергии звездного ветра, определяется по формуле

$$\eta = \frac{B_p^2 R_*^2}{4 \dot{M} v_\infty}, \quad (2)$$

¹В оригинальном тексте статьи - "magnetic confined parameter".

где B_p - полярное магнитное поле, R_* - радиус звезды. Авторы утверждали, что при $\eta \leq 1$ силовые линии магнитного поля должны быть полностью открытыми и радиально направленными, но магнитосфера всё ещё может отклонять потоки звездного ветра в сторону магнитного экватора, там они движутся со скоростью $\sim 70 \text{ км с}^{-1}$; при $\eta \geq 1$ силовые линии магнитного поля тоже полностью открыты, но потоки звездного ветра движутся у магнитного экватора быстрее, со скоростью $\sim 300 \text{ км с}^{-1}$; при $\eta \geq 10$ в области магнитного экватора силовые линии замкнутые, потоки звездного ветра движутся со скоростью $\sim 1000 \text{ км с}^{-1}$, сталкиваются, образуя рентгеновское излучение.

Ещё один критерий применимости модели MCWS и других моделей, объясняющих тепловое рентгеновское излучение ОВ звезд, основан на использовании стандартного соотношения между скоростью движения фронта ударной волны с высвечиванием и температуры газа за фронтом (см., например, [1])

$$kT_{\text{max}} = \frac{3}{16} \frac{\mu v_{\infty}^2}{k} \approx 14 \text{MK} \frac{v_{\infty}^2}{1000 \text{ км с}^{-1}} \approx 1.2 \text{keV} \frac{v_{\infty}^2}{1000 \text{ км с}^{-1}}, \quad (3)$$

где μ - средний молекулярный вес, k - постоянная Больцмана. В формуле 3 учтено, что скорость движения фронта не может превосходить терминальной скорости ветра V_{∞} . Формула 3 широко используется в литературе (см., например [53]).

В работах Ryspaeva & Kholtygin [44, 45], ud-Doula и соавторов [53, 54] было сделано предположение о том, что из модели MCWS могут вытекать возможные следствия:

1. С увеличением напряженности поля растет температура горячей плазмы за фронтом ударной волны и, тем самым увеличивается жесткость спектра. Связано это с тем, что чем сильнее у звезды магнитное поле, тем выше вероятность перезамыкания силовых линий, а значит и звездных вспышек. Поэтому рентгеновский спектр сильномагнитных звезд может быть более жестким.
2. Температура горячей плазмы в области магнитного экватора тем больше, чем больше скорость ветра. Поэтому у звезд с большей скоростью истечения веществ более высокая температура рентгеновской плазмы и выше жесткость спектра.
3. У звезд с большой скоростью потери массы плотность вещества в области магнитного экватора будет больше. Скорость высвечивания горячего газа сильно возрастает, особенно в области $T \approx 10^6 \text{ K}$, в то время как функция высвечивания быстро уменьшается в области $T \approx 10^7 \text{ K}$, что может привести к относительному росту доли газа с высокой температурой и, соответственно, к росту жесткости спектра. А согласно работе [53], в случае высокой скорости потери массы, приближающиеся к магнитному экватору потоки вещества образуют сильную ударную волну, генерирующую более жесткое, чем в случае низкой скорости потери массы, рентгеновское излучение. Если же скорость потери массы низкая, происходит расширение области, в которой формируется ударная волна. В результате этого потоки вещества сталкиваются на более низких скоростях, что приводит к формированию более мягкого рентгеновского излучения.

Эти следствия (по крайней мере второе и третье) могут быть справедливы и для других моделей, объясняющих тепловое рентгеновское излучение ОВ звезд.

Позднее другими авторами были уточнены механизмы формирования рентгеновского излучения в ветрах звезд. Так Zhekov & Palla в работе [57] выяснили, что столкновение звездных ветров ранних звезд, приводящее к возникновению рентгеновского излучения, имеет сложную природу. Ударные волны в ветре формируются либо в результате формирования радиативной неустойчивости, либо вследствие удержания вещества ветров сильным магнитным полем, как в модели MCWS. Согласно гипотезе Zhekov & Palla [57] сталкивающиеся структуры (сгустки, полные или фрагментарные оболочки) быстро высвечиваются и, в конечном итоге, становятся "холодными" облаками в рентгеновском небе звезды. В результате существует высокая вероятность поглощения рентгеновского излучения этими "холодными" облаками, находящимися на луче зрения, что приводит к возникновению спектральных линий, смещенных в синюю сторону. Таким образом, в околозвездной плазме присутствуют области с разными температурами.

В 2007 году А. М. Т. Pollock [41] предложил "новую парадигму" формирования рентгеновского излучения О звезд, основываясь на анализе наблюдений сверхгиганта ζ Ori (HD 37742, Альнитак) на спутнике "ХММ-Newton". Pollock утверждал, что "рентгеновское излучение генерируется в режиме *бесстолкновительных* ударных волн, контролируемых магнитным полем. При этом наблюдаемая плазма не находится в равновесии и континуум тормозного излучения электронов слаб, а перезарядка, ионизация и возбуждение атомов могут осуществляться при столкновениях с протонами. Плазма, захваченная магнитным полем, в двойных системах может нагреваться до более высоких температур, чем в одиночных звездах. Все линии в рентгеновских спектрах О звезд должны быть широкими и асимметричными с похожими профилями скорости. Наблюдаемые профили линий в основном отражают распределение скорости ионов за фронтом ударной волны"². В случае, если в среде, где формируется рентгеновское излучение, справедливо максвелловское распределение скоростей электронов, должно выполняться соотношение:

$$\text{HWHM} = \sqrt{2 \ln 2 (kT_S/m)} \approx 0.51 v_\infty, \quad (4)$$

где HWHM (Half Width at Half Maximum) – полуширина линии на уровне половины максимума, k – постоянная Больцмана, T_S – температура плазмы за фронтом ударной волны, m – средняя масса частицы, v_∞ – терминальная скорость звездного ветра. В статье Pollock [41] были отождествлены линии в рентгеновском спектре ζ Ori и установлено, что для этой звезды указанное соотношение выполняется для 75% линий.

Но наряду с упомянутыми выше теориями существовало мнение о том, что рентгеновское излучение ОВ звезд может быть не полностью тепловым. Поэтому можно выделить *второе семейство* моделей, описывающих возможное нетепловое рентгеновское излучение ОВ звезд, к которому относятся две

²Перевод фрагмента статьи [41].

гипотезы.

Первой предпосылкой к выдвижению гипотез о нетепловом рентгеновском излучении ранних звезд стало обнаружение нетеплового радиоизлучения сначала у двойных звезд, а потом у одиночных. Считалось, что это было синхротронное излучение релятивистских электронов [2, 3]. В работах [39, 40] впервые было выдвинуто предположение о том, что наличие в звездном ветре релятивистских электронов может привести к формированию жесткого рентгеновского излучения в результате обратного комптоновского рассеяния ультрафиолетовых фотонов на высокоэнергичных электронах. Chen & White [9] создали численную модель этого процесса. Согласно этой модели рентгеновское излучение О звезд в области жестких энергий (выше 2 кэВ) имеет нетепловую природу и генерируется в результате обратного комптоновского рассеяния ультрафиолетовых фотонов на релятивистских электронах, ускоряемых ударными волнами вблизи звездной поверхности. Это возможное нетепловое излучение должно описываться степенным законом с показателем степени ~ 1.5 . Модель Chen & White предсказывала, что звезды ранних спектральных классов, в чьих рентгеновских спектрах присутствует нетепловая компонента, должны иметь поверхностные магнитные поля, напряженностью в несколько Гс, переменное рентгеновское излучение на временной шкале от нескольких часов до нескольких дней и рентгеновскую светимость в жесткой части спектра $\gtrsim 10^{29}$ эрг с^{-1} .

Недавно Leto et al. [23] проанализировали рентгеновские наблюдения В звезды HD 182180 с аномально сильным магнитным полем ~ 11 кГс, выполненные на орбитальной обсерватории "XMM-Newton" и сформулировали модель аврорального нетеплового рентгеновского излучения (далее в тексте – модель Leto et al.). В рамках этой гипотезы рентгеновское излучение быстровращающихся магнитных Ap/Bp звезд имеет двойную природу. Внутри силовых линий магнитного поля звезды генерируется тепловое рентгеновское излучение как в модели MCWS, при столкновении потоков вещества звездного ветра у магнитного экватора. Но на расстоянии от звездной поверхности, близкому к альвеновскому радиусу, магнитное давление не способно удержать горячую плазму внутри силовых линий. Поэтому в этой области в результате перезамыкания силовых линий образуются быстрые нетепловые электроны, которые движутся по альвеновской поверхности к магнитным полюсам звезды. Там эти нетепловые электроны попадают в плотные фотосферные слои и в результате тормозного излучения формируется нетепловое рентгеновское излучение, исходящее из области полярных шапок. (см. Рис. 11 в статье [23]). Авторы выдвинули следующие условия применимости модели:

1. Наличие нетеплового радиоизлучения
2. Сильное магнитное поле с напряженностью на полюсах $\sim 10\text{-}15$ кГс, альвеновский радиус $\sim 8\text{-}50$ звездных радиусов.
3. Строение магнитосферы по типу RRM (Rigidly Rotational Magnetosphere, [51])
4. Быстрое осевое вращение с периодом ~ 0.5 дней.

В статье [47] Ryspaeva & Kholtygin вывели возможное следствие из модели Leto et al. [23]: "звезды с высокой скоростью истечения вещества и температурой плазмы должны иметь более высокие концен-

трации нетепловых электронов на альвеновской поверхности, а значит, более интенсивные нетепловое рентгеновское излучение"³.

В настоящей диссертации была выполнена проверка четырех гипотез о формировании рентгеновского излучения ОБ звезд: MCWS, "парадигма" Pollock, гипотеза о нетепловом рентгеновском излучении Chen & White, модель аврорального нетеплового рентгеновского излучения Leto et al. Была исследована применимость гипотез к большому числу объектов методом анализа рентгеновских наблюдений звезд, выполненных на орбитальной обсерватории "XMM-Newton". Были рассмотрены спектры звезд низкого разрешения (извлечены из снимков камеры EPIC на спутнике) для определения таких характеристик рентгеновского излучения звезд, как жесткость, светимость, температура плазмы, спектральный индекс, и спектры высокого разрешения (снятые спектрографами RGS на спутнике) для отождествления рентгеновских линий и оценки их полных ширин и полуширин на уровне половины максимума интенсивности (FWHM, HWHM соответственно). Особое внимание было уделено следующим подклассам ОБ звезд, чьи особенности могут влиять на природу и процессы генерации рентгеновского излучения.

Подкласс пекулярных Of?p звезд выделенный Walborn et al. [55]. Для таких объектов свойственны повторяющиеся спектральные изменения в линиях бальмеровской серии, линиях He I, C III, Si III и наличие в оптическом спектре эмиссии в линии C III на длине волны 4650 Å. Дальнейшие наблюдения показали, что все Of?p звезды обладают сильным магнитным полем [29, 21] и большой рентгеновской светимостью ($\log(L_X/L_{\text{BOL}}) \sim 6$) [32].

Двойные системы со сталкивающимися звездными ветрами (Particle-accelerating colliding-wind binaries, PACWBs [11], [12]) – это кратные системы, состоящие из ранних звезд, либо ОБ звезд и звезд Вольфа-Райе, у которых заряженные частицы в звездных ветрах могут ускоряться до релятивистских скоростей. У некоторых PACWBs систем было обнаружено синхротронное радиоизлучение релятивистских частиц, которое и является индикатором существования релятивистских частиц в их звездных ветрах.

Аналоги σ Ori E – так в настоящей диссертации предложено называть ОБ звезды, похожие по характеристикам на σ Ori E (HD 37479) и упомянутые в статье [24]. Эти звезды имеют быстрое осевое вращение $P_d \sim 0.5$ д, аномально сильное магнитное поле $B_p \sim 10 - 20$ кГс, строение магнитосферы по модели RRM (Rigidly Rotational Magnetosphere, [16, 51], в рамках которой плазма захваченная силовыми линиями магнитного поля вращается вокруг звезды вместе с магнитосферой как твердое тело).

Аналоги γ Cas [50] являются, вероятно, самыми загадочными объектами спектральных классов О и В. Для этих звезд характерны аномально высокие для ранних спектральных классов значения температуры плазмы $\sim 10-20$ кэВ в предположении, что их рентгеновское излучение полностью тепловое, а также переменность рентгеновского излучения на временной шкале от нескольких минут до несколь-

³Цитата из русскоязычного варианта статьи (Рыспаева Е.Б., Холтыгин А.Ф., Астрофизический бюллетень. 2020. Т. 75. № 2. С. 143-156).

ких лет. Рентгеновская светимость аналогов γ Cas составляет $\sim 10^{32} - 10^{33}$ эрг с^{-1} , что на порядок выше, чем у массивных звезд, но значительно ниже, чем у аккрецирующих рентгеновских двойных систем. Высокая температура плазмы может быть обусловлена наличием аккрецирующего компонента. Но в настоящее время все ещё не найдено чётких, подтвержденных наблюдениями, свидетельств существования вырожденного компонента у какого-либо из известных аналогов γ Cas. Поэтому многие авторы сходятся во мнении, что рентгеновское излучение этих загадочных звезд исходит из области плотного околозвездного диска в результате взаимодействия его с силовыми линиями магнитного поля самой звезды (см. [50, 34, 42]).

1.1 Актуальность темы и степень её разработанности

Природа образования оптического и УФ излучения звезд ранних спектральных классов в достаточной степени ясна, но механизмы формирования их рентгеновского излучения известны недостаточно. В настоящее время не разработано единой теории, объясняющей рентгеновское излучение всех звезд ранних спектральных классов. В то же время осмысление процессов, происходящих в фотосферах и ветрах этих звезд, приводящих к формированию рентгеновского излучения, важно для понимания механизмов нагрева и охлаждения плазмы в ветрах ОВ звезд и других звезд, обладающих мощными звездными ветрами.

Исследование возможного нетеплового рентгеновского излучения массивных звезд может пролить свет на детали механизмов ускорения электронов, протонов и других заряженных частиц и, тем самым, на механизмы формирования космических лучей. Важной и мало изученной проблемой является также исследование влияния рентгеновского излучения ОВ звезд на их оптические спектры. Из вышесказанного следует, что исследование механизмов формирования рентгеновского излучения массивных звезд было и остается актуальным.

1.2 Цели и задачи работы

В силу большого разнообразия ОВ звезд с особенностями и гипотез о формировании их рентгеновского излучения, можно сделать следующее предположение. Каждая из упомянутых в диссертации моделей может быть применима только для звезд с определенными характеристиками, и, вероятно, в ОВ звездах рентгеновское излучение генерируется в рамках нескольких моделей сразу. Кроме того, нельзя исключить возможность и тепловой, и нетепловой природы рентгеновского излучения звезд ранних спектральных классов.

Поэтому *целью* настоящей диссертации является определение того, к ОВ звездам с какими особенностями могут быть применимы различные модели формирования теплового и нетеплового рентгеновского излучения. Для достижения сформулированной цели следует выполнить проверку применимости

самой изученной модели MCWS к большому числу объектов и тестирование возможных следствий из неё, которые могут выполняться и для других гипотез, объясняющих тепловое рентгеновское излучение ранних звезд. Их невыполнение укажет на наличие у объектов дополнительных нетепловых процессов формирования их рентгеновского излучения. Для изучения возможного вклада механизмов генерации нетеплового рентгеновского излучения горячих звезд, следует проверить применимость к спектрам большого числа объектов гипотез Chen & White [9] и Leto et al. [23]. Пролить свет на сложный набор процессов формирования рентгеновского излучения ОВ звезд поможет и проверка гипотезы Pollock [41], которая была постулирована из анализа наблюдения только одного объекта. Возможно, что эта гипотеза выполняется только для звезд с определенными характеристиками.

Для осуществления проверки гипотез необходим анализ рентгеновских наблюдений большого числа объектов, включающий моделирование рентгеновских спектров звезд для вычисления таких параметров как жесткость спектров, температура излучающей плазмы, рентгеновская светимость, вклад возможного нетеплового излучения, спектральный индекс, а также отождествление рентгеновских спектральных линий для оценки их полных ширин и полуширин на уровне половины максимума интенсивности (FWHM, HWHM), наибольших потоков, смещений, наличия асимметричности профилей. Исследование зависимостей между указанными выше характеристиками рентгеновских спектров звезд и параметрами звезд (скорости истечения вещества, напряженность магнитного поля, кинетическая энергия звездного ветра и другие) позволит проверить следствия из модели MCWS, выяснить какие процессы формирования рентгеновского излучения доминируют в горячих звездах тех или иных подклассов. Изучение характеристик рентгеновских линий позволит определить характеристики сгущений в звездных ветрах, что поможет в выборе модели формирования рентгеновского излучения для каждого объекта.

1.3 Научная новизна

В ходе проведенных исследований были получены следующие новые научные результаты:

1. Впервые были проанализированы рентгеновские спектры следующих звезд: HD 37000, HD 37025 HD 24398, HD 10144, HD 116658, HD 120324, HD 157246, HD 261938, HD 188001, HD 152408.
2. Впервые была проведена статистическая проверка гипотезы Pollock [41] для большого набора звезд спектральных классов О и В.
3. Впервые было выполнено отождествление рентгеновских линий с учетом их блендирования и подведение статистики степени симметричности профилей линий в рентгеновских спектрах звезд.
4. Впервые были исследованы зависимости между характеристиками рентгеновского излучения и параметрами ОВ звезд со слабым магнитным полем.
5. Впервые было проведено статистическое исследование наличия степенной компоненты в рентгеновских спектрах ОВ звезд, которая может описывать возможное нетепловое рентгеновское излучение,

для проверки гипотез о его формировании в ОВ звездах; исследованы зависимости между характеристиками возможного нетеплового рентгеновского излучения ОВ звезд (спектральный индекс, доля степенной компоненты в модельном спектре) и другими параметрами объектов (терминальная скорость звездного ветра, скорость потери массы, напряженность магнитного поля, температура плазмы, жесткость и так далее).

1.4 Теоретическая и практическая значимость

Результаты анализа рентгеновских наблюдений ОВ звезд, включающие в себя вычисленные параметры изучаемых объектов (температуры плазмы, светимости, жесткости спектров, спектральные индексы и другие) и обнаруженные зависимости между характеристиками рентгеновского излучения звезд и параметрами самих объектов могут быть полезны для дальнейшего построения теоретических моделей свечения ОВ звезд в рентгеновской области. Методика определения параметров рентгеновских линий в звездных спектрах и методика анализа блендированных линий могут быть использованы при анализе рентгеновских спектров звезд других спектральных классов.

1.5 Объект и предмет исследований

Диссертационная работа посвящена проверке различных гипотез о формировании рентгеновского излучения звезд спектральных классов О и В на большом количестве конкретных объектов.

1.6 Методология и методы исследований

Теоретико-методологической базой диссертационной работы являются труды зарубежных ученых, посвященные интерпретации наблюдений звезд спектральных классов О и В в рентгеновской части спектра и построению теоретических моделей формирования рентгеновского излучения звезд ранних спектральных классов. Для решения поставленных задач использовались общенаучные (индукция, аппроксимации методом наименьших квадратов, регрессионный анализ, методы математической статистики), и специальные (программирование на языке Pascal, методика отождествления линий в рентгеновских спектрах). Реализация указанных методов была осуществлена с помощью специализированных программных пакетов и собственных программ.

1.7 Основные положения, выносимые на защиту

1. Рентгеновская светимость ОВ звезд в диапазоне энергий 0.2-8 кэВ пропорциональна скорости потери массы и кинетической энергии звездного ветра в степени 0.5;

2. В рентгеновских спектрах 60% рассмотренных ОВ звезд возможно наличие степенной компоненты, которая может описывать нетепловое рентгеновское излучение, доля степенной компоненты в полном рентгеновском излучении линейно возрастает с увеличением температуры излучающей плазмы, а спектральный индекс степенной компоненты убывает с увеличением жесткости рентгеновских спектров по степенному закону;

3. Обнаруженные зависимости характеристик рентгеновского излучения ОВ звезд от параметров звезд (зависимости рентгеновской светимости от скорости потери массы, кинетической энергии ветра, терминальной скорости ветра, доли степенной компоненты от температуры излучающей плазмы, спектрального индекса степенной компоненты от жесткости спектров) выполняются для объектов с любой напряженностью магнитного поля, что свидетельствует об отсутствии взаимосвязи характеристик рентгеновского излучения ОВ звезд от величины их магнитного поля;

4. Большинство линий в рентгеновских спектрах ОВ звезд характеризуются отношением полуширины на уровне половины максимума (HWHM) к терминальной скорости звездного ветра меньше 0.15, что указывает на формирование линий преимущественно вблизи звездных фотосфер, при этом, если предположить, что скорость звездного ветра описывается законом Ламерса с показателем степени $\beta = 1$, основная доля рентгеновского излучения формируется на расстояниях 0.2-0.4 радиуса звезды от фотосферы.

1.8 Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. Связь между напряженностью магнитных полей и жесткостью рентгеновских спектров массивных О звезд. **Рыспаева Е. Б.**, Холтыгин А. Ф. Международная конференция “International conference Physica.SPb/2016”, 1.11.2016-3.11.2016, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

2. Связь между напряженностью магнитных полей и жесткостью рентгеновских спектров О звезд. **Рыспаева Е. Б.**, Холтыгин А. Ф. 46-я Студенческая научная конференция “Физика космоса” 30.01-3.02.2017, Коуровская обсерватория УрФУ

3. Is the Pollock’s paradigm of X-ray emission for O stars correct? **Ryspaeva E.B.**, Kholtygin A.F., the Международная конференция “Stellar Magnetism: Challenges, Connections, and Prospects”, 12.06-16.06.2017, Potsdam, Germany

4. The correlation between the magnetic field strengths and X-ray spectra of O-type stars. **Ryspaeva E.B.**, Kholtygin A.F. Международная конференция “Physics of Neutron Stars 2017”, 10.07-14.07.2017,

СПБ АУ, Санкт-Петербург

5. Жесткость рентгеновских спектров О-звезд в модели магнитоудерживаемой плазмы. **Рыспаева Е. Б.**, Холтыгин А. Ф. Верна ли новая парадигма формирования рентгеновского излучения О звезд? **Рыспаева Е. Б.**, Холтыгин А. Ф. Всероссийская астрономическая конференция “Астрономия: познание без границ”, 18.09-22.09.2017, Ялта, Крым

6. Рентгеновское излучение звезды HD 37479: Bf?p звезда? **Рыспаева Е. Б.**, Холтыгин А. Ф. VII Пулковская молодежная астрономическая конференция, 28.05-31.05 2018, ГАО РАН, Санкт-Петербург

7. Статистическое исследование гипотез формирования рентгеновского излучения В звезд. Рентгеновское излучение звезды HD 37479: Bf?p звезда? **Рыспаева Е. Б.**, Холтыгин А. Ф. Конференция “Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звёздах”, 3.06-7.06.2018, КрАО РАН, пгт. Научный, Крым

8. Статистическое исследование гипотез формирования рентгеновского излучения ОВ звезд. **Рыспаева Е. Б.**, Холтыгин А. Ф. Конференция “Звезды, планеты и их магнитные поля”, 17.09.-21.09.2018, СПбГУ, Санкт-Петербург

9. Formation of X-ray emission of OB stars. **Ryspaeva E.B.** Международная конференция “Physics of Magnetic Stars”, 1.10-5.10.2018, CAO РАН, Нижний Архыз

10. Механизмы формирования рентгеновского излучения ОВ звезд. **Рыспаева Е. Б.** Конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2018”, 18.12-21.12.2018, ИКИ РАН, Москва

11. Is there a nonthermal X-ray emission in OB stars? **Ryspaeva E.B.**, Kholtygin A.F. Международная конференция “Physics of Stars and Planets: Atmospheres, Activity, Magnetic Fields”, 16.09-20.09.2019, Shamakhy Astrophysical Observatory, Azerbaijan

12. Нетепловое рентгеновское излучение звезд аналогов γ Cas. **Рыспаева Е. Б.** Конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2019”, 17.12-20.12.2019, ИКИ РАН, Москва

Также результаты работы были представлены на семинарах в СПбГУ, ГАО РАН, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ИЗМИРАН, ИНАСАН, КФУ, КрАО РАН.

1.9 Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, 6 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных “Scopus” и “Web of Science”, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Ryspaeva E.B., Kholtygin A.F., “Is the Pollock’s paradigm of X-ray emission for O stars correct?”, 2017, *Astronomische Nachrichten* **338**, 959 (impact factor 1.170)

2. Ryspaeva E.B., Kholtygin A.F. “Analysis of the X-ray emission of OB stars: O stars”, 2018, *Research in Astronomy and Astrophysics* **18**, 104 (impact factor 1.110)

3. Ryspaeva E.B., Kholtygin A.F., “Analysis of the X-ray emission of OB stars II: B stars”, 2019, Research in Astronomy and Astrophysics **19**, 120 (impact factor 1.110)
4. Hubrig S., Kuker M., Jarvinen S.P., Kholtygin A.F., Scholler M., Ryspaeva E.B., Sokoloff, D.D. “A short and sudden increase of the magnetic field strength and the accompanying spectral variability in the O9.7V star HD 54879”, 2019, MNRAS **484**, 4495 (impact factor 5.356)
5. Ryspaeva E.B., Kholtygin A.F., “Analysis of the X-ray emission of OB stars III: low-resolved spectra of OB stars”, 2020, Research in Astronomy and Astrophysics **20**, 108 (impact factor 1.110)
6. Ryspaeva E.B., Kholtygin A.F., “Contribution of a Non-Thermal Component to the X-Ray Emission of OB Stars”, 2020, Astrophysical Bulletin **75**, 127 // Рыспаева Е.Б., Холтыгин А.Ф., “Анализ вклада нетепловой компоненты в рентгеновское излучение ОВ-звезд”, 2020, Астрофизический Бюллетень, **75**, №2, 143-156 (impact factor 1.191)

1.10 Личный вклад

Соискателем были выполнены первичная обработка рентгеновских наблюдений звезд и анализ их спектров с использованием специализированных программных пакетов и были написаны собственные программы для работы со спектрами и для регрессионного анализа изучаемых в работе зависимостей. Совместно соискателем и руководителем была разработана методика отождествления рентгеновских спектральных линий с учетом их блендирования.

Соискателем были предложены и выполнены статистические проверки гипотез Pollock, Chen & White, Leto et al., основанные на анализе рентгеновских наблюдений большого числа ОВ звезд. Соискателем был выполнен анализ рентгеновских наблюдений звезды HD 54879, описанный в статье 4 из списка публикаций. Этот результат был использован для статистических проверок гипотез.

Также соискатель участвовала в обсуждении результатов работы наравне с другими соавторами.

1.11 Содержание работы

Настоящая диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 136 страниц текста с 22 рисунками, 8 таблицами. Список литературы содержит 144 наименования.

Во *Введении* (первой главе) дан обзор литературы о различных механизмах формирования рентгеновского излучения звезд спектральных классов О и В, сформулированы гипотезы, которые были проверены в настоящей диссертации. Также даны основные характеристики ОВ звезд, описаны выделенные в статьях подклассы ОВ звезд с особенностями, которые могут существенно влиять на процессы генерации их рентгеновского излучения. Сформулированы научная новизна диссертации, ее теоретическая и практическая значимость, объект и предмет исследований, методология и методы исследований,

апробация работы, список публикаций по теме диссертации и личный вклад соискателя.

Во *второй главе* даны сведения об изучаемых объектах и использованных в работе архивных наблюдательных данных, полученных на орбитальной обсерватории “XMM-Newton”. Приведена таблица всех рассмотренных в диссертации звезд с такими важными для исследования параметрами как терминальные скорости звездного ветра, скорости потери массы, напряженности магнитного поля, расстояния. Приведена таблица характеристик использованных наблюдений (номер, дата, экспозиция). Детально описаны процедуры первичной обработки наблюдений с применением программного пакета “SAS 17.0” с учетом рекомендаций группы “SAS”⁴, описаны процедуры извлечения звездных спектров. В настоящей диссертации были проанализированы звездные спектры высокого разрешения снятые спектрометрами RGS (“Reflection Grating Spectrometer”) в диапазонах длин волн 6-38 ангстрем, спектры низкого разрешения, извлеченные из изображений камеры EPIC (“European Photon Imaging Camera”) в диапазоне энергий 0.2-8 кэВ.

Третья глава посвящена исследованию гипотез о тепловом рентгеновском излучении ОВ звезд. Подробно изложена методика моделирования рентгеновских спектров звезд низкого разрешения с помощью программного пакета “XSPEC 12.10.0”⁵ В таблицах представлены результаты аппроксимаций спектров моделями излучения горячего газа, в котором атомы ионизируются электронным ударом АРЕС [49] или MEKAL [30], [31], [25]. Эти аппроксимации позволили оценить температуры излучающей в рентгеновском диапазоне плазмы. Исследованы возможные зависимости характеристик рентгеновского излучения звезд (температура излучающей плазмы, жесткость спектров, рентгеновская светимость в диапазоне энергий 0.2-8 кэВ) друг от друга и от таких параметров звезд, как терминальная скорость, скорость потери массы, напряженность магнитного поля, кинетическая энергия звездного ветра, коэффициент магнитного удержания. Приведена таблица результатов регрессионного анализа возможных зависимостей, графики обнаруженных зависимостей. При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором в соавторстве с руководителем: [46].

В *четвертой главе* выполнена проверка гипотезы Pollock для большого числа звезд и проведен общий статистический анализ ширин линий в спектрах ОВ звезд для исследования характеристик сгущений в звездных ветрах. Описана методика отождествления рентгеновских линий в спектрах высокого разрешения с учетом блендирования линий. Профили возможных составляющих блендированных линий были определены методом аппроксимации наблюдаемых профилей суммой от 1 до 5 гауссиан или гауссоподобных функций (гауссиан с показателем степени в экспоненте, отличным от 2). Оценены центральные длины волн возможных линий, смещения в линиях, полные и полуширины линий на уровне половины максимума интенсивности (FWHM, HWHM), а также выявлены асимметричные профили линий, указывающие на наличие сгущений сферической формы в звездных ветрах (подробнее см. статьи Oskinova et al. [35, 36, 37]), пример приведен на Рис. 1. Линии были отождествлены путем

⁴www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton

⁵<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

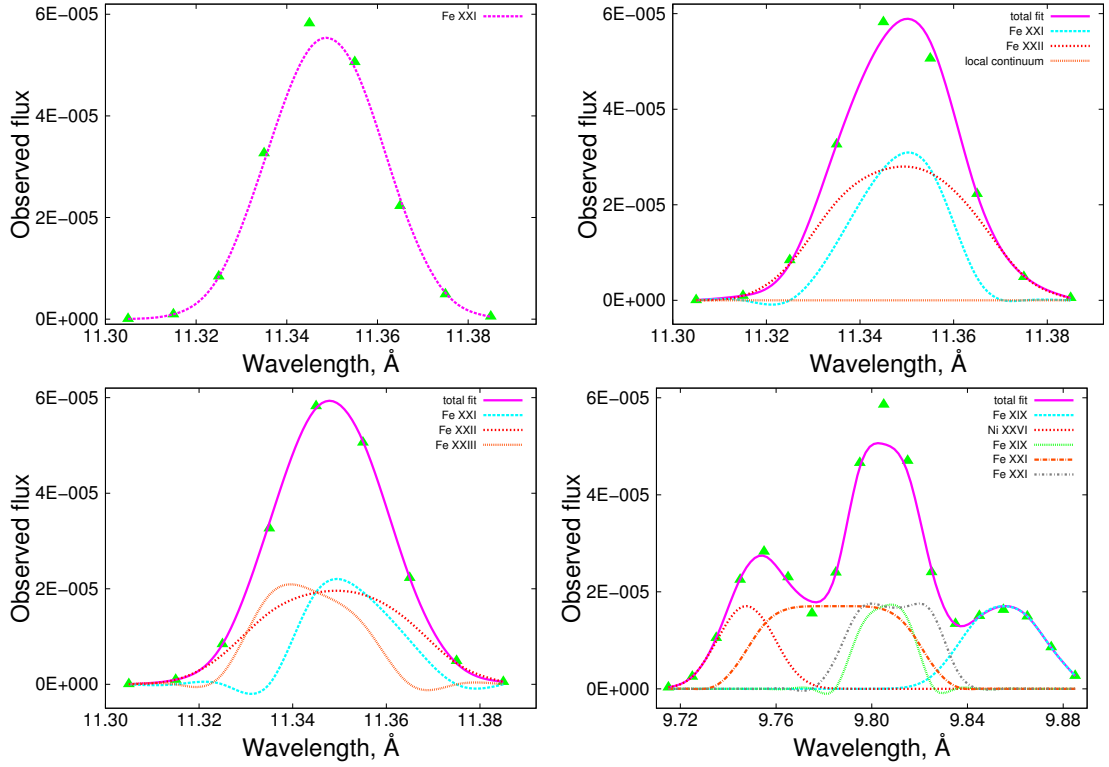


Рис. 1: Примеры аппроксимаций профилей линий в RGS-спектре звезды HD 54662. Показано, что один и тот же профиль линии может быть отождествлен неоднозначно, а некоторые "скрытые" внутри наблюдаемого профили линий могут быть смещены, подобно линиям Fe XXII, Fe XXIII на графике внизу слева [45].

сравнения найденных длин волн с указанными в базе данных AtomDB⁶ с учетом их относительных интенсивностей, приведенных в базе. Получены различные варианты отождествления профилей линий и составлены гистограммы количеств возможных линий с определенными отношениями HWHM к терминальным скоростям звездного ветра для O и B звезд. Приведены таблицы и графики примеров разложений блендированных линий на индивидуальные компоненты. При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором в соавторстве с руководителем: [43], [44], [45].

В пятой главе, описано исследование возможного нетеплового рентгеновского излучения OB звезд. Подробно изложен статистический анализ применимости двух гипотез о его формировании к большому числу объектов, включающий таблицы аппроксимаций спектров рассмотренных звезд суммами моделей APEC или MEKAL с добавлением степенного закона, описывающего возможное нетепловое излучение. Такое моделирование спектров позволило определить температуры излучающей плазмы, спектральные индексы, доли степенной компоненты в модельном спектре. Приведен результат регрессионного анализа возможных зависимостей этих величин от других параметров звезд и характеристик их рентгеновского излучения. Определено, насколько справедливы найденные зависимости для OB

⁶www.atomdb.org

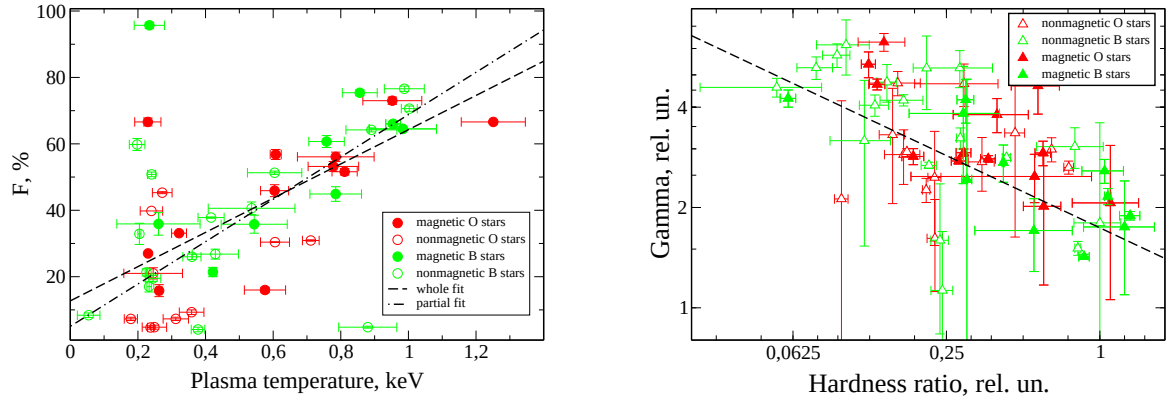


Рис. 2: *Слева*: зависимость доли степенной компоненты рентгеновского излучения F в спектрах ОВ звезд от температуры плазмы kT , оцененной из тепловых компонент модельных спектров, штриховой линией показан график уравнения регрессии для всех значений коррелирующих величин, штрихпунктирной линией - для $F > 15$, $kT > 0.3$ кэВ; *справа*: зависимость спектрального индекса от жесткости рентгеновских спектров для ОВ звезд; штриховой линией показан график уравнения регрессии. Залитыми маркерами показаны зависимости для звезд с измеренными магнитными полями, прозрачными маркерами - зависимости для немагнитных звезд [47].

звезд с особенностями, которые могут повлиять на формирование возможного нетеплового излучения ОВ звезд. Даны таблицы и графики обнаруженных корреляций (Рис. 2). Выполнено сравнение температур излучающей плазмы в предположениях о полностью тепловом и частично нетепловом рентгеновском излучении ОВ звезд. При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором в соавторстве с руководителем: [47].

Отдельным параграфом главы рассмотрено рентгеновское излучение загадочных звезд аналогов γ Cas, выполнены аппроксимации их спектров низкого разрешения моделями АРЕС/МЕКАЛ с добавлением степенного закона. Даны таблицы и графики результатов аппроксимаций. Показано, что спектры могут быть описаны суммами моделей АРЕС/МЕКАЛ с добавлением степенного закона и без него. В предположении о полностью тепловой природе рентгеновского излучения аналогов γ Cas их температуры плазмы действительно могут достигать 10-20 кэВ, но при наличии степенной компоненты в моделях спектров температуры плазмы снижаются до приемлемых для ОВ звезд значений, а доли степенных компонент составляют 80-90%, спектральные индексы ~ 1.5 . Это дает основание предположить о наличии в рентгеновских спектрах аналогов γ Cas возможного нетеплового излучения, формирующегося в результате обратного комптоновского рассеяния согласно модели [9].

В *заключении* приведено обсуждение всех полученных в работе результатов, которые даны в разделах "Заключение" в каждой главе, а главные выводы сформулированы в разделе "Основные положения выносимые на защиту". Даны общие выводы и указаны перспективы дальнейшего развития полученных результатов. Даны списки рисунков и таблиц в диссертации.

В приложении даны комментарии к анализу спектров отдельных звезд.

1.12 Общий вывод

Анализ рентгеновских спектров высокого и низкого рентгеновского излучения большого числа ОВ звезд и последующий поиск возможных зависимостей между характеристиками рентгеновского излучения и параметрами звезд, выполненные в настоящей диссертации, позволяют сделать вывод о том, что *не существует единого набора процессов, ответственного за формирование рентгеновского излучения всех ранних звезд*. Для каждого объекта характерен свой ансамбль процессов, приводящих к генерации рентгеновского излучения. Более того, анализ рентгеновских спектров ОВ звезд низкого и высокого разрешения, выявил, что практически каждый спектр или наблюдаемый профиль спектральной линии может быть аппроксимирован неоднозначно. Поэтому на основании анализа только рентгеновских наблюдений, природу излучения той или иной звезды в этой области спектра не всегда можно интерпретировать точно. Следовательно, для более детального изучения механизмов формирования рентгеновского излучения ОВ звезд необходимы координированные наблюдения интересующих объектов в других спектральных диапазонах. Так радионаблюдения ОВ звезд с высокой долей степенной компоненты рентгеновского излучения могут помочь подтвердить или опровергнуть наличие связи нетеплового радио- и возможного нетеплового рентгеновского излучения, что прежде всего актуально для аналогов γ Cas.

Из аппроксимаций звездных спектров низкого разрешения моделями APEC/MEKAL следует, что практически у всех рассмотренных объектов в околозвездном пространстве имеются области газа, нагретого до разных температур. Можно сделать предположение, что у магнитных ОВ звезд самая горячая плазма находится в области магнитного экватора, в которой формируется тепловое рентгеновское излучение, описываемое в рамках модели MCWS. Области плазмы с более низкой температурой расположены вне магнитного экватора и/или за пределами магнитосферы, они генерируют рентгеновские фотоны в результате нагрева газа ударными волнами, формируемыми в результате неустойчивости радиационно-индуцируемых звездных ветров, либо вследствие столкновения нагретых сгустков газа (сгущений в звездном ветре). Напротив, у слабомагнитных ОВ звезд, области околозвездного пространства с разной температурой могут соответствовать крупным сгущениям в звездном ветре, нагретым до разных температур.

Кроме того, аппроксимации всех рассмотренных звездных спектров низкого разрешения моделями APEC/MEKAL с добавлением степенного закона и последующее обнаружение зависимостей параметров степенной компоненты от других характеристик рентгеновского излучения звезд показали, что спектры многие из исследуемых в диссертации объектов действительно могут генерировать рентгеновское излучение нетепловой природы. Таковыми возможными источниками нетеплового рентгеновского излучения могут быть и типичные ОВ звезды, и ранние звезды с особенностями, принадлежащие выделенным подклассам, а также ОВ звезды с любой величиной напряженности магнитного поля.

Список литературы

- [1] *Каплан С. А., Пикельнер С. Б.*, Физика межзвездной среды. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979, 592 с.
- [2] *Abbot D. C., Bienging J. H., Churchwell E. B.*, 1984, ApJ, 280, 671
- [3] *Abbot D. C., Bienging J. H., Churchwell E. B.*, 1985, in: R. M. Hjellming & D. M. Gibson (eds.) Radio Stars, (Dordrecht:Reidel), p. 219
- [4] *Babel J., Montmerle, T.* 1997 A&A, 323, 121
- [5] *Cantiello, M., Braithwaite, J.* 2011, A&A 534, A140
- [6] *Cassinelli, J.P., Ignace, R., Waldron, W.L. et al.* 2008, ApJ 683, 1052
- [7] *Cassinelli, J. P., & Olson, G. L.* 1979, ApJ, 229, 304
- [8] *Cassinelli, J.P., Swank, J.H.* 1983, ApJ 271, 681
- [9] *Chen W., White R.* 1991, ApJ, 366, 512
- [10] *Cherepashchuk A. M.*, 1976, Sov. Astron. Letters, 2, 138
- [11] *De Becker M., Raucq F.*, 2013, A&A 558, A28
- [12] *De Becker, M., del Valle, M. V., Romero, G. E., Peri, C. S., Benaglia, P.*, 2017, MNRAS, 471, 4452
- [13] *Drew, J. E.* 1989 ApJS, 71, 267
- [14] *Feldmeier A., Kudritzki R.-P., Palsa R., Pauldrach A. W. A., Puls J.*, 1997, A& A, 320, 899
- [15] *Feldmeier A., Kudritzki R.P., Palsa, R., Pauldrach A. W. A., Puls, J.*, 1997a, . A& A 320, 899
- [16] *Groote D., Hunger K.*, 1997, A&A, 319, 250
- [17] *Gudel M.*, 2004, The Astron Astrophys Rev, 12, 71
- [18] *Guo, J.H.*, 2010, A&A 512, A50
- [19] *ud-Doula, A., Owocki, S. P.* 2002, ApJ, 576, 413
- [20] *Hillier D.J., Kudritzki R.P., Pauldrach A.W., et al.*, 1993, A&A 276, 117
- [21] *Hubrig, S., Scholler, M., Kharchenko, N. V., et al.* 2011, A&A, 528, A151
- [22] *Ignace, R., Waldron, W.L., Cassinelli, J.P., Burke, A.E.* 2012 ApJ 750, 40
- [23] *Leto P., Trigilio C., Oskinova L. et al.*, 2017, MNRAS, 467, 2820 (2017)

- [24] *Leto P., Trigilio C., Oskinova L. M., Ignace R. et al.*, 2018, MNRAS 476, 562
- [25] *Liedahl D. A., Osterheld A. L., Goldstein W. H.*, 1995, ApJ, 438, L115
- [26] *Lucy, L.B.* 2012, A&A 544, A120.
- [27] *Lucy L.B.* 1982. ApJ 255, 286
- [28] *Lucy L. B., White R. L.*, 1980, ApJ, 241, 300
- [29] *Martins, F., Donati, J.-F., Marcolino, W. L. F., et al.* 2010, MNRAS, 407, 1423
- [30] *Mewe K., Gronenschild E. H. B. M., van der Oord G. H. J.*, 1985, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 62, 197-254
- [31] *Mewe K., Lemen J. R., van der Oord G. H. J.*, 1986, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 62, 511-536
- [32] *Naze, Y., Walborn, N. R., Rauw, G., et al.* 2008, ApJ, 135, 1946
- [33] *Naze, Y., Petit, V., Rinbrand, M., et al.* 2014, ApJS, 215, 10
- [34] *Naze Y., Gosset E., Mahy L., Ross Parkin E.*, 2017, A& A 607, A97
- [35] *Oskinova, L.M., Hamann, W.-R., Feldmeier, A.*, 2006, MNRAS, 372, 313
- [36] *Oskinova, L.M.* 2016, Advances in Space Research, 58, 739
- [37] *Oskinova, L.M., Ignace, R., Huenemoerder, D.P.*, 2017, Proc. IAU Symp., 329, 151
- [38] *Owocki, S.P., Castor, J.I., Rybicki, G.B.*, 1988 ApJ 335, 914
- [39] *Pollock A. M. T.*, 1987, A& A 171, 135
- [40] *Pollock A. M. T.*, 1991, in: K.A. van der Hucht & B. Hidayat (eds.), Wolf-Rayet Stars and Interrelations with other Massive Stars in Galaxies, Proc. IAU Symp. No. 143 (Kluwer: Dordrecht), p. 102
- [41] *Pollock, A.M.T.* 2007, A& A, 463, 1111
- [42] *Rauw G., Naze Y., Spano M., Morel T., ud-Doula A.*, A&A 555, L9
- [43] *Ryspaeva, E. B., Kholtygin, A. F.* 2017, Astronomische Nachrichten, 338, 959
- [44] *Ryspaeva E., Kholtygin A.*, 2018, RAA, Vol. 18, No. 8, 104
- [45] *Ryspaeva E., Kholtygin A.*, 2019, RAA, Vol. 19, No 8, 120
- [46] *Ryspaeva E., Kholtygin A.*, 2020, RAA, Vol. 20, No. 7, 108
- [47] *Ryspaeva E., Kholtygin A.*, 2020, Astrophysical Bulletin, Vol. 75, No. 2, 127

- [48] *Runacres, M.C., Owocki, S.P.*, 2002, A& A 381, 1015
- [49] *Smith R. K., Brickhouse N. S., Liedahl D. A., Raymond J. C.*, 2001, ApJ, 556, L91
- [50] *Smith M. A., Lopes de Oliveira R., Motch C.*, 2016, Adv. Space Res., 58, 782
- [51] *Townsend R. H. D. & Owocki S. P.*, 2005, MNRAS, 357, 251
- [52] *ud-Doula, A., Owocki, S. P.* 2002, ApJ, 576, 413
- [53] *ud-Doula A., Owocky S., Townsend R., Petit V., Cohen D.*, 2014, MNRAS, 441, 3600
- [54] *ud-Doula A. & Naze Y.*, 2016, Adv.Space Res. 58, 680
- [55] *Walborn, N. R.* 1972, AJ, 77, 312
- [56] *Waldron, W.L., Cassinelli, J.P.* 2009, ApJ 692, L76
- [57] *Zhekov S, Palla F.*, 2007, MNRAS 382, 1124