

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

**Антохин Игорь Иванович**

**Горячие массивные звезды в двойных системах**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Работа выполнена в отделе звездной астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова.

**Научный консультант** - Черепашук Анатолий Михайлович  
доктор физико-математических наук, профессор,  
академик Российской академии наук

**Официальные оппоненты** - Бикмаев Ильфан Фяритович  
доктор физико-математических наук, доцент,  
академик Академии наук республики Татарстан,  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики,  
главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории  
астрофотометрии и звездных атмосфер,  
ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории  
астрофотометрии и звездных атмосфер,  
профессор кафедры астрономии и космической геодезии

Ламзин Сергей Анатольевич  
доктор физико-математических наук,  
Государственный астрономический институт  
имени П.К. Штернберга Московского  
государственного университета имени М.В.Ломоносова,  
ведущий научный сотрудник лаборатории новых  
фотометрических методов

Лутовинов Александр Анатольевич  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент Российской Академии Наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт космических исследований Российской  
академии наук (ИКИ РАН),  
заместитель директора по научной работе,  
заведующий отделом астрофизики высоких энергий

Защита состоится 19 сентября 2024 года в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ 013.1 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Университетский проспект, д. 13, конференц-зал.

E-mail: [dissovet@sai.msu.ru](mailto:dissovet@sai.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3054>.

Автореферат разослан 11 июля 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

# Общая характеристика работы

## Актуальность и степень разработанности темы исследования

Диссертационное исследование посвящено изучению звезд спектральных классов O и классических звезд Вольфа-Райе (WR). Эти звезды являются наиболее горячими (десятки тысяч градусов) и массивными (десятки масс Солнца) среди всех звезд различных спектральных классов. Время жизни таких массивных звезд намного меньше, чем звезд с массами порядка Солнечной. Эволюционный статус звезд O и WR отличается: звезды O находятся на стадии горения водорода, а звезды WR – гелиевые остатки проэволюционировавших массивных звезд с начальными массами больше  $20M_{\odot}$  (Schild, Maeder, 1984; Humphreys, Nichols, Massey, 1985). Однако у них есть одна общая характеристика – наличие мощных звездных ветров. Если у нашего Солнца скорость потери массы из-за Солнечного ветра составляет порядка  $10^{-14}M_{\odot}/\text{год}$ , то у звезд O характерная величина скорости потери массы посредством звездного ветра составляет  $10^{-6}M_{\odot}/\text{год}$ , а у звезд WR  $10^{-5}M_{\odot}/\text{год}$ , и в отдельных случаях может достигать  $10^{-4}M_{\odot}/\text{год}$ .

Благодаря наличию мощных звездных ветров, выносящих вещество поверхностных слоев звезд в окружающее пространство, эти звезды играют важную роль в химической эволюции галактик. Более того, в конце своей жизни они взрываются как Сверхновые второго типа, выбрасывая продукты ядерных реакций в межзвездную среду и обогащая ее тяжелыми элементами. Остатками взрыва Сверхновой являются нейтронные звезды и черные дыры. Если звезда O или WR является членом двойной системы, на конечных стадиях эволюции такой системы может образовываться двойная система, содержащая нейтронную звезду или черную дыру в паре с обычной звездой, что может сопровождаться аккрецией вещества на релятивистский объект и сопутствующим рентгеновским излучением, то есть появлением рентгеновской двойной системы. Еще позже, после второго взрыва Сверхновой в системе, может образоваться пара, включающая в различных комбинациях нейтронные звезды или черные дыры. Компоненты этой пары могут в дальнейшем сливаться, порождая всплеск гравитационно-волнового излучения. Такие всплески были открыты в гравитационно-волновом эксперименте LIGO (LIGO Scientific Collaboration et al., 2015).

Сверхзвуковые ветра звезд O и WR также приводят к существованию ряда интересных явлений, например, локальных ударных волн, приводящих к формированию мягкого рентгеновского излучения от этих звезд. В двойных системах O+O, WR+O, WR+WR наблюдаются дополнительные явле-

ния, связанные со столкновением ветров компонент. Подробнее об этом будет сказано ниже.

Таким образом, звезды O и WR играют важную роль в эволюции своих родительских галактик, демонстрируют интересные явления, специфичные лишь для них, играют важную роль в эволюции массивных двойных систем. Изучение их качественных и количественных характеристик имеет большое значение для понимания строения и эволюции массивных одиночных и двойных звезд. Все это вместе взятое обуславливает актуальность и важность темы.

Наличие мощных ветров маскирует свойства центральных звезд. Эта проблема особенно важна для звезд WR. Несмотря на то, что скорость потери массы в ветрах как O, так и WR звезд на много порядков величины превосходит Солнечную, а разница этих скоростей между звездами O и WR составляет всего один порядок, эта разница приводит к принципиальным различиям в виде спектров и способах их интерпретации. В оптических спектрах большинства звезд O наблюдаются обычные узкие линии поглощения различных элементов. Лишь в далеком ультрафиолетовом диапазоне резонансные линии имеют профили типа P Cyg. Поэтому для интерпретации по крайней мере оптических спектров звезд O применимы стандартные модели плоскопараллельных атмосфер, находящихся в гидростатическом равновесии. В десять раз более мощные ветра звезд WR приводят к тому, что в их оптических спектрах наблюдаются эмиссионные линии шириной десятки ангстрем, что соответствует тысяче – двум тысячам км/с или более. Эти линии образуются в звездном ветре и стандартные модели атмосфер неприменимы.

Понимание движущей силы ветров и их структуры является критически важным для понимания физики звезд O и WR в целом. Заметный прогресс в этой области начался в 90-х годах прошлого века. В идеале самосогласованная модель звездного ветра одиночной звезды должна быть трехмерной, учитывать нестационарность ветров, и включать как решение уравнений переноса излучения в движущейся среде, так и решение гидродинамических уравнений, описывающих это движение. К сожалению, подобные модели до настоящего времени отсутствуют, что связано как с теоретическими проблемами, так и с огромными требуемыми для реализации подобной модели компьютерными ресурсами. Поэтому создание моделей ветров шло по двум направлениям.

Первое включает решение уравнений переноса в сопутствующей системе координат, в движущейся среде, кинематическая структура которой задается простыми аналитическими выражениями. Наибольший прогресс был достигнут в работах так называемой Потсдамской группы под руководством

W.-R. Hamann (Hamann, Gräfener, 2004; Hamann et al., 2008; 2019). Результатом этой работы стали сетки моделей и соответствующих спектров звезд WR, которые могут использоваться аналогично моделям Kuzucz (1979). Имеется также доступ к Web-интерфейсу программного кода и возможность скачивания исходного кода (Hamann et al., 2023).

Второе направление концентрировалось на решении уравнений динамики и упрощенном анализе переноса излучения. Одна из пионерских работ была выполнена Castor, Abbott, Klein (1975). В ней не рассматривалась нестационарность ветра, но было показано, что основным механизмом, определяющим движение ветра и его динамику, является давление излучения в линиях. Был получен закон ускорения вещества в ветре (см. ниже). В 90-х и 2000-х годах появились нестационарные газодинамические модели. Первые работы по изучению нестационарности ветров звезд, движущихся за счет давления излучения в линиях, включали одномерный аналитический анализ в линейном приближении (Owocki, Rybicki, 1984; 1985). Было показано, что ветра, создаваемые давлением излучения, являются внутренне неустойчивыми, поскольку движущая сила, приводящая к ускорению вещества, сама зависит от этого ускорения. Как следствие, ветер становится сильно структурированным и нестационарным. Затем последовал нелинейный анализ с помощью численных одномерных моделей (Owocki, Puls, 1996; 1999). Эти работы показали, что неустойчивость в ветре возникает уже вблизи его основания, и что связанные с ней неоднородности приводят к образованию в ветре блобов (плотных сгустков вещества). Их столкновение приводит к формированию ударных волн, разогреву вещества и, как следствие, появлению рентгеновского излучения. Типичные разности скоростей могут достигать 200 – 600 км/с, что приводит к формированию мягкого рентгеновского излучения с характерной энергией  $\sim 0.1 - 0.5$  кэВ. Очевидно, для адекватного моделирования нестационарности требуется трехмерная модель. Однако из-за очень больших компьютерных ресурсов, необходимых для ее реализации, до настоящего времени появились лишь двумерные модели. В работе Dessart, Owocki (2003) была реализована ограниченная двумерная модель, в которых часть вычислений проводится в одномерном приближении. Sundqvist, Owocki, Puls (2018) представили двумерную модель в псевдо-планарном приближении. Было показано, что ветер распадается на плотные блобы с разреженным веществом между ними, что характерный размер блоба сравним с Соболевской длиной, и что фактор заполнения в двумерной модели несколько меньше, чем в одномерной.

Отметим также недавние работы (Sander et al., 2018; 2017; Sander, Vink, Hamann, 2020; Sander, Vink, 2020), в которых впервые на уровне концеп-

та была предложена методика объединения решения уравнений переноса в сопутствующей системе координат (модель Потсдамской группы) и гидродинамических уравнений. Однако предложенная модель довольно ограничена: она является одномерной, в ее динамической части не учитывается нестационарность звездного ветра, а также возможная немонотонность скорости ветра как функции расстояния от звезды (см. ниже).

Как было сказано выше, в двойной системе, состоящей из звезд WR или O, ветра компонент сталкиваются друг с другом. Поскольку при таком фронтальном (по крайней мере вдоль линии центров двойной системы) столкновении вещество каждого ветра практически останавливается, а его скорость в момент столкновения может достигать тысячи – двух тысяч км/с, значительная часть кинетической энергии вещества должна переходить в тепловую энергию газа. Это приведет к повышению его температуры до десятков миллионов градусов, и как следствие, к формированию жесткого рентгеновского излучения. Таким образом, из этого качественного рассмотрения можно ожидать, что рентгеновская светимость и жесткость рентгеновского спектра двойных систем такого типа будет намного больше, чем светимость и жесткость одиночных звезд WR и O. Именно эта идея была впервые высказана в работах Прилутский, Усов (1976) и Черепашук (1976). Usov (1992) предложил аналитическую модель, которая предсказывала свойства рентгеновского излучения, порождаемого столкновением ветров, в случае, когда формирующиеся ударные волны находятся в адиабатическом режиме. Автор также предсказал зависимость рентгеновской светимости от расстояния между компонентами системы, находящимися на эксцентрической орбите. Эти предсказания были позднее подтверждены для ряда двойных систем (см., например, Rauw et al., 2002; Sana et al., 2004). Параллельно начали появляться первые численные нестационарные двумерные газодинамические модели столкновения ветров (Stevens, Blondin, Pollock, 1992; Pittard, Stevens, 1997), в которых были частично подтверждены аналитические результаты Усова, а также построены двумерные карты зоны столкновения.

Несмотря на перечисленные достижения, в данной области остаются многочисленные нерешенные проблемы, даже если не рассматривать ее с точки зрения идеальной самосогласованной модели. Кратко перечислим эти проблемы, имеющиеся в двух упомянутых направлениях исследований.

Как было отмечено выше, в модели переноса излучения Потсдамской группы кинематика ветра задается простым аналитическим выражением, имеющим общепринятое название “ $\beta$ -закон”

$$v(r) = V_{\infty} \left( 1 - \frac{R_{*}}{r} \right)^{\beta}, \quad (1)$$

где  $v(r)$  – скорость ветра на расстоянии  $r$  от центра звезды,  $V_\infty$  – скорость на бесконечности,  $R_*$  – радиус гидростатического ядра звезды. Этот закон был впервые получен Чандрасекаром еще в 1934 году (Chandrasekhar, 1934) в предположении, что сила, действующая на вещество ветра и направленная наружу, какая бы природа у нее ни была, пропорциональна силе гравитационного притяжения. В этом предположении движение вещества по радиусу описывается простым дифференциальным уравнением, решение которого дает показанную выше формулу с показателем  $\beta = 0.5$ . Castor, Abbott, Klein (1975) рассмотрели модель, в которой сила, действующая наружу от звезды, объяснялась давлением излучения в линиях. Авторы получили тот же закон изменения скорости с тем же показателем 0.5. Необходимо отметить, что эта величина  $\beta$  была получена в предположении, что излучение исходит из точечного источника. Учет конечного размера звезды повышает  $\beta$  до значения  $\sim 0.8$ . Для данного показателя скорость ветра очень быстро увеличивается вблизи звезды, а затем остается почти постоянной. Однако спектральные модели, а также анализ затмений в двойных системах показали, что если для звезд O величина  $\beta \sim 1.0$  является приемлемой, то у звезд WR ускорение ветра чаще всего происходит заметно медленнее, и на больших расстояниях от звезды ветер все еще ускоряется. Если полагать, что изменение скорости в ветре все еще происходит в соответствии с  $\beta$ -законом, это означает, что параметр  $\beta$  должен быть заметно больше 1.0. Именно поэтому фиксированная величина показателя была заменена на свободный параметр  $\beta$ . Причины отличия его величины от значения 0.5 – 1.0 остаются неясными. Кроме того, возникают сомнения относительно самой формы закона, по крайней мере для звезд WR. Если в относительно неплотных ветрах звезд O силы лучевого давления хватает, чтобы разогнать вещество ветра до терминальной скорости “в один прием”, то, как показывают недавние газодинамические расчеты Poniatowski et al. (2021), в звездах WR силы лучевого давления для этого может не хватить. На некотором расстоянии от звезды способность спектральных линий поглощать излучение звезды исчерпывает себя, и скорость ветра перестает расти или даже уменьшается. Однако с дальнейшим увеличением расстояния от звезды понижается степень ионизации вещества, как следствие, появляются новые переходы между уровнями различных ионов, которые попадают на области спектра, отличающиеся от положений линий, которые исчерпали себя как средство ускорения. Это приводит к увеличению силы давления и новому этапу ускорения вещества. Таким образом, ускорение становится двухступенчатым, а форма закона изменения скорости качественно отличается от общепринятого  $\beta$ -закона. Заметим, что спектральная модель Потсдамской группы в принципе не позволяет решать уравнения пе-

реноса излучения в среде с немонотонным изменением скорости.

Вторая проблема спектральной модели Потсдамской группы связана с неоднородностью ветра. Как было отмечено выше, неоднородность внутренне присуща ветрам, движущей силой которых является давление излучения в линиях. Авторы спектральной модели были вынуждены ввести учет неоднородности для звезд WR в 1998 году (Hamann, Koesterke, 1998), поскольку в случае однородного ветра теоретические красные крылья спектральных линий оказывались намного сильнее, чем наблюдаемые. На излучение в этих крыльях большое влияние оказывает электронное рассеяние, которое линейно зависит от плотности вещества. Для уменьшения красных крыльев необходимо понизить плотность вещества. Но при этом не будут воспроизводиться относительные интенсивности линий. Основным механизмом формирования эмиссионных линий – каскадные переходы после рекомбинации, и этот эмиссионный процесс пропорционален квадрату плотности. Разница зависимости электронного рассеяния и эмиссионного механизма в линиях от плотности вещества дает возможность решения проблемы путем ввода в модель неоднородности ветра. Как известно из математики, среднее суммы квадратов нескольких величин больше квадрата среднего. Поэтому, если рассмотреть среду, состоящую из плотных блоков и разреженного вещества между ними, можно обеспечить то же значение среднего квадрата плотности, что в однородной модели, при меньшей средней плотности, то есть воспроизвести относительные интенсивности линий и уменьшить их красные крылья.

Очевидно, что полноценный учет неоднородности ветра требует создания нестационарной трехмерной газодинамической модели. Подобные модели до сих пор не созданы, более того, инкорпорирование ее в описываемую спектральную модель в принципе невозможно, если газодинамическая модель приводит к немонотонному изменению  $v(r)$ . Причина заключается в том, что спектральная модель Потсдамской группы неспособна решать уравнения переноса в среде с немонотонным изменением скорости. Поэтому неоднородность в этой модели учитывается в очень упрощенном виде так называемого микроклампинга (micro clumping). Предполагается, что (i) вещество ветра состоит из оптически тонких микро клампов (блобов); (ii) отношение плотности блобов к плотности вещества между ними  $D$  постоянно во всем объеме ветра; (iii) фактор заполнения (процент объема, занимаемого блобами) также постоянен во всем объеме ветра. В результате удастся описать одновременно относительные интенсивности эмиссионных линий и их красные крылья при скорости потери массы, которая в  $\sqrt{D}$  меньше скорости потери массы в однородной модели (описывающей относительные интенсивности линий, но не их красные крылья). В опубликованных сетках моделей звезд WR параметр



$D$  фиксирован и принят равным 4, что соответствует скачку плотности за фронтом адиабатической ударной волны в одноатомном идеальном газе.

Такой учет неоднородности ветра позволил несколько снизить остроту еще одной проблемы Потсдамской модели: в рамках однородной модели скорости потери массы звездами WR оказывались в десять и более раз больше тех скоростей, что были найдены независимыми методами. Введение параметра неоднородности понизило противоречие, однако получаемые даже в этом варианте модели скорости потери массы все еще в разы больше тех, что получены другими методами. При этом форма и относительные интенсивности спектральных линий описываются приемлемо.

Как было отмечено выше, нестационарные модели звездных ветров одиночных массивных горячих звезд далеки от завершения. Несмотря на существенный прогресс в качественном понимании их структуры, количественные самосогласованные модели отсутствуют. На качественном уровне было показано, что по крайней мере у звезд WR глобальный закон изменения скорости в ветре может сильно отличаться от общепринятого  $\beta$ -закона (Poniatowski et al., 2021). Однако этот результат был получен лишь в одномерной модели и с рядом упрощающих предположений. Так, например, критически необходимое для работоспособности модели изменение степени ионизации не рассчитывалось, вместо этого постулировалось скачкообразное увеличение силы, действующей наружу, на некотором расстоянии от звезды. Это увеличение лишь качественно обосновывалось гипотетическим уменьшением степени ионизации. Отметим, что вращение звезды с ветром вносит дальнейшие осложнения в любые потенциальные модели.

Численные газодинамические модели столкновения ветров в двойных системах WR+O и O+O оказались сравнительно успешными в случае широких двойных систем, где область за фронтом ударной волны находится в адиабатическом режиме. В этом режиме зона столкновения занимает большой объем и сравнительно хорошо аппроксимируется в численной модели. Однако эти модели встречаются со значительными трудностями в случае более тесных двойных систем, где из-за высокой плотности вещества ударные волны становятся радиативными. Это приводит к высвечиванию тепловой энергии и, как следствие, к тому, что зона столкновения превращается в высшей степени нестационарное образование с небольшой толщиной плотных слоев, где происходит интенсивное перемешивание горячего и холодного материала. Как следствие, средняя температура вещества понижается, как и жесткость результирующего рентгеновского излучения. К сожалению, физически обоснованную степень перемешивания трудно предсказать теоретически. Более того, из-за так называемой численной диффузии, связанной с конечной точ-

ностью компьютерных вычислений, и неизбежно ограниченным разрешением пространственной сетки, степень перемешивания в численных моделях скорее всего переоценивает реальную. Плазменные эффекты и магнитные поля могут также отчасти стабилизировать зону столкновения. На то, что степень перемешивания в тесных двойных системах может быть ограничена, указывает жесткое рентгеновское излучение, наблюдающееся в некоторых тесных двойных системах WR+O. В текущих газодинамических моделях столкновения проблема неограниченного перемешивания решается разными способами. Например, вводится обрезание функции охлаждения ниже некоторой температуры (то есть считается, что вещество ниже заданной температуры перестает охлаждаться). Проблема заключается в том, что это значение в сущности назначается произвольно.

Одна из наиболее продвинутых трехмерных газодинамических моделей столкновения ветров была представлена Parkin et al. (2011) в работе по моделированию кривых блеска и спектров двойной системы  $\eta$  Car (LBV). Система находится на сильно эксцентрической орбите  $e = 0.9$ , орбитальный период составляет 2024 дня. Таким образом, на большей части орбиты расстояние между компонентами велико и вещество зоны столкновения находится в адиабатическом режиме. Однако вблизи периастра начинает играть роль радиативное охлаждение. Несмотря на то, что сравнение модели и рентгеновских наблюдений позволило сделать ряд интересных выводов, модель смогла удовлетворительно воспроизвести орбитальную наблюдаемую кривую блеска лишь на фазах, сравнительно далеких от периастра.

В условиях, когда самосогласованные модели ветра одиночных и двойных звезд WR и O отсутствуют, двойные системы предоставляют потенциальную возможность получить эмпирические ограничения на различные свойства ветров и компонент. Спутник звезд WR при этом играет роль пробного тела, сканирующего ветер WR. Эта идея лежит в основе подхода, используемого в диссертационной работе. Всегда, когда это представлялось возможным, исследование проводилось так, чтобы получить эмпирические ограничения на характеристики звезд и их ветров с минимумом возможных модельных предположений.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является исследование качественных и количественных характеристик горячих массивных звезд ранних спектральных типов, а также процессов, протекающих в двойных системах, включающих такие звезды. Для достижения этой цели были поставлены и решены следу-

ющие задачи:

1. Создан гибкий и эффективный алгоритм решения интегрального уравнения Фредгольма первого типа и интегрального уравнения Абеля, позволяющий находить неизвестную функцию для любой комбинации априорных ограничений и предположений относительно гладкости искомой функции. На основе этого алгоритма создана компьютерная программа решения кривых блеска двойных систем WR+O и O+O.
2. Создана параметрическая модель и соответствующий алгоритм решения кривых блеска двойных систем ранних спектральных типов в оптическом континууме. Модель разработана в двух вариантах – для широких пар со сферическими компонентами (самодостаточный программный код) и как подпрограмма, встраиваемая в алгоритм стандартной модели Роша (для тесных пар).
3. С использованием этих программ проведены исследования двойных звезд WR+O V444 Cyg, BAT99-129, WR 22. Определены характеристики компонент и ветров в этих двойных системах.
4. С использованием оптических и рентгеновских данных проведены исследования наблюдательных свойств большого числа одиночных и массивных звезд ранних спектральных типов. Определены рентгеновские светимости, характерные температуры плазмы, излучающей в рентгеновском диапазоне, получены данные о рентгеновской переменности. Проведено сравнение отношения рентгеновской и болометрической светимостей для большого числа одиночных и двойных звезд.
5. Разработана стационарная модель столкновения звездных ветров в двойных системах WR+O и O+O, позволяющая рассчитать теоретические рентгеновские спектры и кривые блеска. Модель использована при анализе рентгеновских наблюдений двойной системы HD 159176.
6. Разработана модель уникальной двойной системы Cyg X-3, состоящей из звезды WR и релятивистского объекта. Модель использована для анализа рентгеновских и инфракрасных кривых блеска этой системы. Доказано, что в системе существуют сложные структуры в ветре, объясняющие наблюдаемую переменность, определены параметры этих структур.

## **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являются двойные и одиночные массивные звезды ранних спектральных классов. Предметом исследования являются опти-

ческие, инфракрасные и рентгеновские кривые блеска двойных систем этого типа, оптические и рентгеновские спектры двойных и одиночных звезд.

## **Методология исследования**

Как было отмечено выше, основная трудность в исследовании горячих массивных звезд, обладающих мощными звездными ветрами, а также процессов, возникающих в двойных системах с такими звездами, заключается в отсутствии самосогласованных моделей этих ветров и процессов. Поэтому основной принцип исследований, проведенных в диссертационной работе, заключался в том, чтобы получить максимум возможной информации о качественных и количественных характеристиках исследуемых объектов, используя наблюдательные данные при минимуме модельных предположений. Это в первую очередь относится к содержанию глав 1 и 2, где для получения информации о структуре ветров используется метод решения кривых блеска двойных систем как некорректных задач, без привлечения параметрических моделей. В тех случаях, когда параметрические модели необходимы, они конструировались таким образом, чтобы использовать наиболее надежные имеющиеся в настоящее время представления о физике моделируемых процессов и вместе с тем обойти имеющиеся неопределенности в теории. Это достигалось не только путем выбора конкретных алгоритмов, реализующих модель, но и выбором наблюдательных данных, для анализа которых она предназначалась. Например, поглощение излучения в ветре звезды WR намного легче описать для наблюдений в оптическом континууме, чем в спектральных линиях, поскольку в оптическом континууме основным агентом поглощения является электронное рассеяние. Поэтому соответствующая модель использовалась для анализа кривых блеска в континууме. Резюмируя, методология исследования заключалась в проведении наблюдений и подборе наблюдений из публичных архивов, в разработке методов анализа наблюдательных данных, сводящих к минимуму модельные предположения, и в анализе данных, позволяющем исследовать качественные и количественные характеристики изучаемых объектов.

## **Научная новизна**

1. Впервые разработан алгоритм, основанный на методе решения некорректных задач А.Н.Тихонова, позволяющий эффективно и гибко решать интегральные уравнение Фредгольма первого рода и уравнение Абеля с использованием любых сочетаний априорных ограничений и условий

гладкости (регуляризации Тихонова).

2. Впервые с использованием этих алгоритмов получены эмпирические ограничения на закон изменения скорости в ветрах звезд WR в двойных системах WR+O V444 Cyg и BAT99-129.
3. Впервые на основе анализа рентгеновских и оптических данных большого числа звезд ранних спектральных типов сделан вывод о том, что рентгеновская светимость и жесткость рентгеновских спектров двойных систем с компонентами ранних спектральных типов в среднем не отличается от таковых для одиночных звезд. Это говорит о том, что процессы взаимодействия ветров в двойных системах более сложны, чем полагалось ранее.
4. Впервые выяснены причины изменения орбитального периода уникальной системы WR+c Cyg X-3. Показано, что помимо постоянного изменения периода из-за потери углового момента в ветре компоненты WR, в изменениях периода присутствует синусоидальная составляющая. Эта составляющая переменности может объясняться либо движением линии апсид в системе с небольшим эксцентриситетом, либо наличием третьего маломассивного компонента, образующего с Cyg X-3 иерархическую тройную систему. Получены наиболее точные на настоящий момент (2024 год) эфемериды системы.
5. Впервые получены обширные инфракрасные наблюдения Cyg X-3. Совместный анализ этих наблюдений в сочетании с рентгеновскими в рамках специально для этой системы созданной модели впервые позволил обнаружить, что в системе присутствует ударная волна по ходу орбитального движения релятивистского компонента, а также компактный источник инфракрасного излучения, находящийся вблизи этого компонента. Получены оценки параметров открытых в ветре WR структур, скорость потери массы в ветре, а также оценена масса релятивистского компонента.

## **Теоретическая и практическая значимость**

Использованная в исследовании методология позволила получить ряд результатов, описывающих свойства ветров одиночных и двойных звезд ранних спектральных классов, не прибегая к сложным самосогласованным моделям (таким, как газодинамические модели движения и столкновения ветров в сочетании с моделями переноса излучения). Теоретическая значимость этих

результатов заключается в том, что они накладывают ограничения на любые будущие модели. В особенности это относится к результатам, касающимся закона изменения скорости в ветрах звезд WR, а также к статистическим свойствам рентгеновского излучения одиночных и двойных звезд ранних спектральных типов. В случае системы Cyg X-3 любые будущие газодинамические модели должны будут учитывать наличие выявленных в данном исследовании структур в ветре WR и объяснить наличие компактного инфракрасного источника в системе.

Практическая значимость связана с возможностью использования разработанных автором моделей и алгоритмов другими исследователями, в том числе не только в астрономии. Некоторые из них (например, библиотека функций, позволяющих решать интегральные уравнения Фредгольма первого рода и Абеля) были уже востребованы несколькими исследователями.

Кроме того, для ряда исследованных звезд и двойных систем были получены количественные оценки различных параметров, которые востребованы в работах других исследователей, как показывает статистика цитирований.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Непараметрический алгоритм решения интегральных уравнений Фредгольма и Абеля первого рода позволяет находить неизвестную функцию, используя априорные ограничения, условия гладкости (регуляризация Тихонова), или любую их комбинацию. Созданная на основе него компьютерная программа позволяет решать кривые блеска двойных систем WR+O и O+O.
2. Параметрический алгоритм учета ветра одной из компонент двойной системы позволяет решать кривые блеска двойных систем WR+O и O+O в двух вариантах: для широких двойных систем с шарообразными компонентами и для тесных двойных систем, в которых форма компонент вычисляется в модели Роша. Параллельное использование параметрического и непараметрического анализа позволяет оценить надежность получаемых результатов.
3. Стационарная модель столкновения звездных ветров в двойных системах позволяет вычислять теоретические рентгеновские спектры и кривые блеска систем WR+O и O+O.
4. Согласно решениям кривых блеска ряда двойных систем WR+O с использованием параметрической и непараметрической моделей, скорость ветра звезд WR может увеличиваться наружу заметно медленнее, чем

это общепринято; кроме того, закон изменения скорости может качественно отличаться от стандартного  $\beta$ -закона.

5. В среднем рентгеновская светимость и жесткость спектра двойных систем с компонентами WR и O не отличается от таковых для одиночных звезд.
6. В изменении орбитального периода уникальной двойной системы WR+c Cyg X-3, помимо постоянного члена, присутствует синусоидальная составляющая. Эта составляющая переменной связана либо с движением линии апсид в системе с небольшим эксцентриситетом, либо с наличием третьего маломассивного компонента, образующего с Cyg X-3 иерархическую тройную систему.
7. Полуфеноменологическая модель двойной системы WR+c Cyg X-3, использованная для анализа рентгеновских и инфракрасных кривых блеска, позволила сделать следующие заключения: (i) в ветре компоненты WR присутствует ударная волна (bow shock) по ходу орбитального движения релятивистского спутника; (ii) подтверждается существование так называемого “хвоста блобов” (clumpy trail), образуемого взаимодействием джетов с ветром; (iii) переменность в инфракрасном диапазоне не может быть объяснена лишь свободно-свободным излучением ветра WR – в системе присутствует компактный инфракрасный источник, расположенный вблизи релятивистского спутника; (iv) скорость потери массы в ветре компоненты WR составляет  $\dot{M} = (0.96 \pm 0.14) \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ , а вероятная масса релятивистского спутника  $M_C \simeq 7.2 M_{\odot}$ ; такая масса характерна для черной дыры.

## Степень достоверности результатов

**Теоретические методы и модели.** Достоверность использованных методов и разработанных моделей основана на том, что (i) метод решения кривых блеска двойных систем WR+O как некорректной задачи основан на математической теории, которая была многократно проверена предыдущими исследованиями не только в астрофизике, но и в других областях науки; автор использовал эту теорию для разработки собственной версии метода, собравшего воедино разные аспекты предыдущих версий для получения гибкого и эффективного инструмента анализа; (ii) параметрические методы решения оптических кривых блеска систем WR+O основаны на общепринятых и де-факто стандартных представлениях о строении ветров звезд WR, широко используемых в спектральных и газодинамических моделях; автор распростра-

нил эти представления на методы решения кривых блеска; (iii) модель столкновения ветров в двойных системах основана на хорошо известных из физики законах сохранения и приближений, описывающих радиативные ударные волны; (iv) модель ветра и различных структур, формируемых в нем для уникальной системы Cyg X-3, основана на качественном анализе рентгеновских и инфракрасных кривых блеска, которые не оставляют сомнений в правильности модели с качественной точки зрения; количественная модель лишь конкретизирует эти качественные представления, используя давно известные физические формулы.

**Результаты, полученные применением теоретических моделей.** Применение разработанных автором алгоритмов и моделей к анализу кривых блеска ряда двойных систем с компонентами WR показало качественное согласие с результатами исследований других авторов, например, теоретических расчетов динамики вещества в ветрах.

**Наблюдательные результаты.** Все наблюдательные результаты получены на наземных и космических инструментах, широко используемых научным сообществом. Использованы стандартные калибровки и программное обеспечение для инструментальной обработки и последующего анализа: MIDAS, IRAF, SAS (обработка данных *XMM-Newton*), Ftools, XSPEC и другие. Сами результаты согласуются с результатами других авторов, полученными для аналогичных объектов.

## **Личный вклад автора**

Все представленные в диссертации результаты были получены автором либо самостоятельно, либо с его непосредственным участием. Большинство наблюдательных данных, представленных в диссертации, получены либо лично автором, либо при его определяющем участии. Исключением являются архивные наблюдательные данные рентгеновских спутников и некоторые оптические данные (спектральные и фотометрические), полученные коллегами автора, соавторами совместных статей. В подавляющем большинстве случаев инструментальная обработка данных выполнялась автором. Часть теоретических моделей, использованных в работе, разработаны автором самостоятельно. В разработке некоторых он принимал активное участие. Часть моделей основана на разработках других авторов, для их использования в данной работе автором были внесены необходимые дополнения и модификации. Все компьютерные программы, реализующие теоретические модели, созданы автором самостоятельно. В использовании этих программ для анализа данных автору принадлежала определяющая роль. Подготовка публикаций



и докладов на конференциях выполнена лично автором или при его активном участии.

В статье 1 автором написан раздел, посвященный анализу двойной системы WR 22 (двойная система с компонентой WR), он также принимал участие в написании других разделов, вклад 40%. В статьях 2, 4, 23 по системе Cyg X-3 автор являлся первым соавтором, им полностью создана использованная теоретическая модель и соответствующие компьютерные программы, проведена инструментальная обработка рентгеновских наблюдательных данных, анализ всех данных (рентгеновских и инфракрасных) с созданными моделями, написаны тексты статей. Вклад 90 и 80% соответственно. В статьях 3, 21, 22, 25, 26 (параметрическая модель ветра WR) автором создана модель и соответствующий компьютерный код, позволяющий учесть поглощение излучения спутника WR в ее плотном ветре, в дополнение к стандартной модели Роша. Автор принимал активное участие в использовании модели для анализа кривых блеска. Им написана соответствующая часть статей. Вклад 40%. Статьи 5, 6, 24, 27 (методы решения некорректных задач) написаны без соавторов. Вклад 100%. В статье 7 по необычной звезде WR 46 автором выполнена инструментальная обработка и анализ рентгеновских данных инструментов EPIC (MOS1, MOS2, PN) на борту спутника *XMM-Newton*, а также написана соответствующая часть статьи, вклад 20%. В статьях 8, 34 по исследованию в рентгеновском диапазоне области Carina автор являлся первым соавтором, он выполнил инструментальную редукцию данных *XMM-Newton*, их анализ, сравнение с оптическими данными, а также написал текст статей. Вклад 90%. В статьях 9, 15, 16, 18 по анализу кривых блеска V444 Cyg и BAT99-129 параметрическими и непараметрическими методами автор также является первым соавтором, им разработаны использованные в статьях модели и компьютерные алгоритмы, выполнен анализ наблюдательных данных, написаны тексты статей. Вклад 80%. В статье 10 по системе HD 93161 A, состоящей из двух звезд O, автором был проведен анализ оптических спектров, найдены элементы орбиты. Автор также выполнил анализ рентгеновских данных *XMM-Newton* и интерпретацию результатов, а также написал соответствующие части статьи. Вклад 40%. В статьях 11, 29 о модели столкновения звездных ветров в двойных системах автор являлся первым соавтором, внесшим равноправный вклад в разработку теоретической модели. Соответствующая компьютерная программа была написана автором самостоятельно. Все расчеты в статье выполнены автором, им же написана преобладающая часть текста статьи. Вклад 70%. В статье 12 по анализу рентгеновских данных двойной системы со сталкивающимися ветрами HD 159176 автором было проведено вычисление сетки моделей столкновения ветров, использовавшейся в анализе,

и написана соответствующая часть статьи. Автор также принимал участие в использовании сетки модели для аппроксимации наблюдаемых рентгеновских спектров, и в обсуждении результатов. Вклад 15%. В статьях 13, 31, 32, 35 по рентгеновским исследованиям звезды WR 25 автором была выполнена инструментальная обработка данных, полученных со спутником *XMM-Newton*, анализ данных инструментов EPIC (MOS1, MOS2, PN), анализ переменности объекта по полученным в работе и архивным рентгеновским наблюдениям, сравнение характеристик WR 25 с характеристиками других звезд O и WR. Автором была написана большая часть статьи. Вклад 50%. В статье 14 по кратной системе Tr 16-104 автором был выполнен анализ кривой блеска в модели Роша и написана соответствующая часть статьи, вклад 15%. В статье 17 по исследованию микропеременности звезды WR HD 192103 автором была получена часть фотометрических наблюдений, а также выполнен анализ всей совокупности таких наблюдений, полученных в том числе другими соавторами, и написана соответствующая часть статьи. Автор также принимал участие в обсуждении модели и результатов спектрального анализа. Вклад 10%. В статье 19 по фотометрии комплекса Carina автор на равноправной основе участвовал в получении наблюдательных данных, а также выполнил их анализ, и принял равноправное участие с соавтором в написании статьи, вклад 50%. Статьи 20, 28, 30 написаны без соавторов, вклад 100%. В статье 33 по рентгеновским наблюдениями WR 22 автором выполнена инструментальная обработка данных, построена кривая блеска, вклад 30%.

## Апробация результатов

Основные результаты исследований были представлены на различных международных и всероссийских конференциях:

1. Всероссийская конференция с международным участием “Физика звёзд: теория и наблюдения”, 26-30 июня 2023 года, ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.
2. 50-я Всероссийская с международным участием студенческая научная конференция “Физика Космоса”, 30 января – 4 февраля 2023 г., г. Екатеринбург, Россия.
3. Ломоносовские чтения 2022, 21 апреля 2022 г., МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия.
4. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021 “Астрономия в эпоху многоканальных исследований”, 23-28 августа 2021 года, ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

5. Всероссийская конференция “Наземная астрономия в России. XXI век” с участием иностранных ученых, Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, 21–25 сентября 2020 года, САО РАН, п. Нижний Архыз, Россия.
6. Всероссийская Конференция “Успехи Российской Астрофизики 2018: Теория и Эксперимент”, 17 декабря 2018 г., МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва.
7. Международная конференция “Звезды, планеты и их магнитные поля”, 17-21 сентября 2018 г., Санкт-Петербург, Россия.
8. Международная астрономическая конференция “Физика звезд: от коллапса до коллапса”, 3-7 октября 2016 года, пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Россия
9. Международная конференция “Звездные атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля”, 23-27 июня 2014 г., ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия.
10. 42-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, 28 января – 01 февраля 2013 г., г. Екатеринбург, Россия.
11. Международная научная конференция “Звёздные атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля”, 10-14 июня 2012 г., КРАО, Крым, пос.Научный, Украина.
12. European Week of Astronomy and Space Science (JENAM-2011), 4-8 July 2011, Saint-Petersburg, Russia.
13. 39th Liège International Astrophysical Colloquium “The multi-wavelength view of Hot, Massive Stars”, 12-16 July 2010, Liège, Belgium
14. “XV National Conference of Astronomers of Serbia”, 2-5 Oct. 2008, Belgrad, Serbia.
15. Всероссийская астрономическая конференция “Тесные двойные звезды в современной астрофизике”, 22-24 мая 2006 г., ГАИШ МГУ, Москва, Россия.
16. International astronomical conference “Massive stars in interacting binaries”, 16-20 Aug 2004, Lac Sacacomie, Québec, Canada. (10,12).
17. International workshop “Structure in Hot Star Winds”, 2-4 Apr. 2003, University College London, Great Britain.

18. 212th Symposium of the International Astronomical Union “A Massive Star Odyssey: From Main Sequence to Supernova”, 24-28 June 2002, Costa Teguisse, Lanzarote, Canary Islands.
19. 34th COSPAR Scientific Assembly: The 2nd World Space Congress Committee on Space Research (COSPAR 2002), 10-19 Oct. 2002, Houston, TX, USA.
20. International conference “Magnetic Fields in O, B and A Stars: Origin and Connection to Pulsation, Rotation and Mass Loss”, 27 Nov. – 1 Dec. 2002, University of North-West, Mmabatho, South Africa.
21. International conference “New Visions of the X-ray Universe in the XMM-Newton and Chandra Era”, 26-3 Nov. 2001, Noordwijk, The Netherlands.

## Содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений, и списка цитируемой литературы. Объем диссертационной работы составляет 337 страниц, включая 105 рисунков, 33 таблицы и 364 библиографических ссылки.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования и изложена степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования. Перечислены положения, выносимые на защиту. Аргументирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость достигнутых результатов. Представлена информация о методологии и методах исследования, степени достоверности и апробации результатов, структуре диссертации.

В **главе 1** представлены разработанные автором методы решения кривых блеска двойных систем WR+O. В **разделе 1.1** описан непараметрический метод, основанный на идеях академика А.Н. Тихонова и его учеников. В **разделе 1.1.1** описан метод решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода, к которому сводится уравнение, в наиболее общем виде описывающее затмение в двойной системе. Результатом решения уравнения является эмпирическое распределение непрозрачности и яркости по диску компоненты WR без использования явных параметрических выражений для этих распределений. В **разделе 1.1.2** представлен метод решения интегрального уравнения Абеля, основанный на идеях из предыдущего раздела. Это уравнение связывает непрозрачность ветра WR  $\tau(s)$  на расстоянии  $s$  от звезды, найденную из решения уравнения Фредгольма, и линейный коэффициент поглощения  $\alpha(r)$  на расстоянии  $r$  от звезды. Показана работа метода и его сходимость к точному решению на ряде тестовых примеров, а также на примере реальной астрофизической задачи – определения пространственной

плотности звезд в трех эллиптических галактиках из измерений их поверхностной яркости. Этот пример был приведен по причине того, что входными данными для уравнения Абеля является не решение первой некорректной задачи (уравнения Фредгольма), а непосредственные измерения. Сравнение результатов с результатами оригинальной работы Lyskova et al. (2014), из которой взяты входные данные, показало хорошее соответствие и позволило продемонстрировать его преимущества по сравнению с альтернативными методами. В **разделе 1.2.1** представлен метод решения уравнений, описывающих кривые блеска систем WR+O, в рамках параметрической модели. Основным свойством данной модели является то, что скорость ветра как функция расстояния от звезды задается параметрически. В ней решаются те же уравнения, описывающие кривую блеска, что в предыдущем разделе, предполагающие, что компоненты системы имеют сферическую форму. Метод реализован в виде самостоятельного программного кода. В **разделе 1.2.2** представлен параметрический метод решения кривых блеска для тесных двойных систем WR+O с приливно-деформированными компонентами. Формы компонент и излучение элементарных площадок их поверхностей вычисляются в модели Роша, орбита может быть как круговой, так и эксцентрической, одна из компонент (звезда O) имеет тонкую атмосферу, а вторая (звезда WR) окружена сферически-симметричным ветром, скорость вещества в котором следует  $\beta$ -закону. Модель может применяться как для тесных, так и для широких двойных систем. Код реализован в виде функции, вычисляющей поглощение в ветре WR излучения каждой элементарной площадки на поверхности звезды O вдоль луча зрения от площадки до наблюдателя. Эта функция встраивается в программный код модели Роша, описанный в Antokhina (1988; 1996).

В **главе 2** представлен анализ оптических кривых блеска с применением описанных в главе 1 непараметрических и параметрических методов для трех систем WR+O: V444 Cyg, BAT99-129, и WR 22. Показано, что учет поглощения излучения спутника в ветре компоненты WR существенно влияет на определяемые параметры системы, а также, что общепринятый  $\beta$ -закон может быть не оптимален для звезд WR.

В **главе 3** представлены результаты исследования наблюдательных оптических и рентгеновских характеристик нескольких одиночных и двойных звезд ранних спектральных классов, а также нескольких десятков таких звезд в ассоциации Carina OB1. Эти исследования показали, что в среднем, рентгеновские характеристики не сильно отличаются у одиночных и двойных звезд. Вопреки первоначальным теоретическим ожиданиям, некоторые двойные системы не показывают повышенной рентгеновской светимости и жестких рент-

геновских спектров. С другой стороны некоторые звезды без признаков двойственности обладают жесткими спектрами. В главе обсуждаются возможные физические процессы, которые могут влиять на формирование рентгеновского излучения в двойных системах.

В **главе 4** представлена стационарная модель столкновения ветров в двойных системах с горячими массивными компонентами, в радиативном приближении (**раздел 4.1**). Она представляет собой компромисс между нестационарными гидродинамическими моделями, сталкивающимися со значительными сложностями в моделировании радиативных ударных волн, и простыми моделями тепловой плазмы, использующимися, например, в программе XSPEC. Приведены теоретические спектры и кривые блеска специально подобранных тестовых моделей двойных систем, которые позволяют показать влияние их параметров на теоретические спектры и кривые блеска. В **разделе 4.2** представлены результаты использования модели для анализа рентгеновских спектров двойной системы HD 159176, полученных на телескопе *XMM-Newton*.

**Глава 5** посвящена исследованию уникальной двойной системы WR+c Cyg X-3, состоящей из звезды WN4-8 и релятивистского объекта. В **разделе 5.1** приведены результаты исследования эволюции орбитального периода системы и ее природы. В **разделе 5.2** приведены результаты исследования средних рентгеновских и инфракрасных (ИК) кривых блеска Cyg X-3. Рентгеновские кривые блеска были извлечены из архивов спутников *RXTE* и *MAXI*, ИК наблюдения в фильтрах *JHK* были получены на 2.5 м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Построена модель системы, показано наличие в ветре WR сложных структур, и наличие в системе точечного инфракрасного источника.

В **заключении** перечислены основные результаты, представленные в диссертации.

## Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 35 печатных работах, в том числе в 19 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science, Scopus и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности. 16 работ опубликованы в сборниках материалов различных конференций.

Публикации в журналах, индексируемых Web of Science, Scopus:

1. Антохина Э. А., Антохин И. И. Определение параметров тесных двойных систем методами синтеза: от белых карликов до звезд Вольфа-Райе

и черных дыр // *Астрономический журнал*. 2023b. Т. 100, № 9. С. 772–784. Импакт-фактор РИНЦ (2022) 0.949. Личный вклад 40%. Объем 1.56 печатных листа.

Переводная версия:

*Antokhina E. A., Antokhin I. I.* Determination of the Close Binary Systems Parameters by Synthesis Methods: from White Dwarfs to Wolf-Rayet Stars and Black Holes // *Astronomy Reports*. 2023. Vol. 67, no. 9. P. 876–887. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 40%. Объем 1.44 печатных листа.

2. *Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M., Antokhina E. A., Tatarnikov A. M.* Near-IR and X-Ray Variability of Cyg X-3: Evidence for a Compact IR Source and Complex Wind Structures // *The Astrophysical Journal*. 2022. Vol. 926, no. 2. article id. 123. 21 pp. Web of Science JIF2023=4.8. Личный вклад 80%. Объем 2.52 печатных листа.
3. *Lenoir-Craig G., Antokhin I. I., Antokhina E. A., St-Louis N., Moffat A. F. J.* On the nature of the single eclipse per 80d orbit of the H-rich luminous WN star WR22 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. Vol. 510, no. 1. P. 246–259. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 40%. Объем 1.68 печатных листа.
4. *Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M.* The Period Change of Cyg X-3 // *The Astrophysical Journal*. 2019. Vol. 871, no. 2. article id. 244. 7 pp. Web of Science JIF2023=4.8. Личный вклад 90%. Объем 0.84 печатных листа.
5. *Antokhin I. I.* An efficient and flexible Abel-inversion method for noisy data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016. Vol. 463, no. 2. P. 2079–2084. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 100%. Объем 0.72 печатных листа.
6. *Antokhin I. I.* Solving light curves of WR+O binaries by Tikhonov's regularization method // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2012. Vol. 420, no. 1. P. 495–504. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 100%. Объем 1.20 печатных листа.
7. *Gosset E., De Becker M., Nazé Y., Carpano S., Rauw G., Antokhin I. I., Vreux J. M., Pollock A. M. T.* XMM-Newton observation of the enigmatic object WR 46 // *Astronomy & Astrophysics*. 2011. Vol. 527. id. A66. 14 pp. Web of Science JIF2023=5.4. Личный вклад 20%. Объем 1.68 печатных листа.

8. *Antokhin I. I., Rauw G., Vreux J. M., van der Hucht K. A., Brown J. C.* XMM-Newton X-ray study of early type stars in the Carina OB1 association // *Astronomy & Astrophysics*. 2008. Vol. 477, no. 2. P. 593–609. Web of Science JIF2023=5.4. Личный вклад 90%. Объем 2.04 печатных листа.
9. *Антохин И. И., Черепашчук А. М.* Затменная двойная система WN3(h)+O5V BAT99-129: Анализ кривой блеска MACHO и характеристики компонент // *Астрономический журнал*. 2007. Т. 84, № 6. С. 542–556. Импакт-фактор РИНЦ (2022) 0.949. Личный вклад 80%. Объем 1.80 печатных листа.  
Переводная версия:  
*Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M.* The eclipsing WN3(h)+O5V binary BAT99-129: Light curve analysis and parameters of its components // *Astronomy Reports*. 2007. Vol. 51, no. 6. P. 486–499. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 1.68 печатных листа.
10. *Nazé Y., Antokhin I. I., Sana H., Gosset E., Rauw G.* Optical spectroscopy of X-Mega targets - V. The spectroscopic binary HD 93161 A and its visual companion HD 93161 B\* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2005. Vol. 359, no. 2. P. 688–698. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 40%. Объем 1.32 печатных листа.
11. *Antokhin I. I., Owocki S. P., Brown J. C.* A Steady, Radiative-Shock Method for Computing X-Ray Emission from Colliding Stellar Winds in Close, Massive-Star Binaries // *The Astrophysical Journal*. 2004. Vol. 611, no. 1. P. 434–451. Web of Science JIF2023=4.8. Личный вклад 70%. Объем 2.16 печатных листа.
12. *De Becker M., Rauw G., Pittard J. M., Antokhin I. I., Stevens I. R., Gosset E., Owocki S. P.* An XMM-Newton observation of the massive binary HD 159176 // *Astronomy & Astrophysics*. 2004. Vol. 416. P. 221–233. Web of Science JIF2023=5.4. Личный вклад 15%. Объем 1.56 печатных листа.
13. *Raassen A. J. J., van der Hucht K. A., Mewe R., Antokhin I. I., Rauw G., Vreux J. M., Schmutz W., Güdel M.* XMM-Newton high-resolution X-ray spectroscopy of the Wolf-Rayet object WR 25 in the Carina OB1 association // *Astronomy & Astrophysics*. 2003b. Vol. 402. P. 653–666. Web of Science JIF2023=5.4. Личный вклад 50%. Объем 1.68 печатных листа.
14. *Rauw G., Sana H., Antokhin I. I., Morrell N. I., Niemela V. S., Albacete Colombo J. F., Gosset E., Vreux J. M.* Optical spectroscopy of XMEGA targets in the Carina Nebula - III. The multiple system Tr 16-104 ( $\equiv$ CPD



- 59° 2603) // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2001. Vol. 326, no. 3. P. 1149–1160. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 15%. Объем 1.44 печатных листа.
15. *Антохин И. И., Черепашчук А. М.* Интерпретация кривой блеска затменной двойной системы V444 Cyg на множестве выпукло-вогнутых функций // *Астрономический журнал*. 2001а. Т. 78, № 5. С. 432–443. Импакт-фактор РИНЦ (2022) 0.949. Личный вклад 80%. Объем 1.44 печатных листа.
- Переводная версия:  
*Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M.* Interpretation of the Light Curve of the Eclipsing Binary V444 Cyg on the Set of Convexo-Concave Functions // *Astronomy Reports*. 2001а. Vol. 45, no. 5. P. 371–381. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 1.32 печатных листа.
16. *Антохин И. И., Черепашчук А. М.* Поле скоростей в ветре звезды Вольфа-Райе в затменной системе V444 Cyg: Параметрическая модель // *Астрономический журнал*. 2001b. Т. 78, № 4. С. 313–326. Импакт-фактор РИНЦ (2022) 0.949. Личный вклад 80%. Объем 1.68 печатных листа.
- Переводная версия:  
*Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M.* Velocity Field of the Stellar Wind of the Wolf-Rayet Star in the V 444 Cyg Binary System: A Parametric Model // *Astronomy Reports*. 2001b. Vol. 45, no. 4. P. 269–280. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 1.44 печатных листа.
17. *Lépine S., Moffat A. F. J., St-Louis N., Marchenko S. V., Dalton M. J., Crowther P. A., Smith L. J., Willis A. J., Antokhin I. I., Tovmassian G. H.* Wind Inhomogeneities in Wolf-Rayet Stars. IV. Using Clumps to Probe the Wind Structure in the WC8 Star HD 192103 // *The Astronomical Journal*. 2000. Vol. 120, no. 6. P. 3201–3217. Web of Science JIF2023=5.1. Личный вклад 10%. Объем 2.04 печатных листа.
18. *Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M., Yagola A. G.* Velocity Law in the Extended Photosphere of the WN5 Star in the Eclipsing Binary V444 Cygni // *Astrophysics and Space Science*. 1997. Vol. 254, no. 1. P. 111–131. Web of Science JIF2023=1.8. Личный вклад 80%. Объем 2.52 печатных листа.
19. *Антохин И. И., Черепашчук А. М.* UVV фотометрия комплекса Eta Carina в 1980 и 1991 гг. // *Астрономический журнал*. 1993. Т. 70. С. 292–306. Импакт-фактор РИНЦ (2022) 0.949. Личный вклад 50%. Объем 1.80 печатных листа.
- Переводная версия:

*Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M.* UVB photometry of the  $\eta$  Carinae complex in 1980 and 1991 // *Astronomy Reports*. 1993. Vol. 37, no. 2. P. 152–158. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 50%. Объем 0.84 печатных листа.

Иные публикации:

20. *Антохин И. И.* Тесные двойные системы: лаборатории, созданные природой // *Научные труды Института астрономии РАН*. 2023. Т. 8, № 2. С. 75–85. Личный вклад 100%. Объем 1.32 печатных листа.
21. *Антохина Э. А., Антохин И. И.* Звезды Вольфа-Райе в двойных системах: моделирование кривых блеска // *Научные труды Института астрономии РАН*. 2023а. Т. 8, № 2. С. 58–62. Личный вклад 50%. Объем 0.60 печатных листа.
22. *Antokhina E., Antokhin I., Lenoir-Craig G., St-Louis N., Moffat A.* Light-curve modelling in a Roche plus stellar wind model: the massive binary WR22 // *Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies*. 2022. P. 122–124. Личный вклад 50%. Объем 0.36 печатных листа.
23. *Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M., Antokhina E. A., Tatarnikov A. M.* Analysis of IR and X-ray Light Curves of Cyg X-3 // *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century* / ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, D. O. Kudryavtsev. 2020. P. 214–217. Личный вклад 80%. Объем 0.48 печатных листа.
24. *Antokhin I. I.* A Flexible and Efficient Method for Solving Ill-Posed Linear Integral Equations of the First Kind for Noisy Data // *Stars: From Collapse to Collapse*. Vol. 510 / ed. by Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin. 2017. P. 522–525. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series). Личный вклад 100%. Объем 0.48 печатных листа.
25. *Антохина Э. А., Антохин И. И., Черепашчук А. М.* Синтез кривых блеска двойных систем: учет влияния звездного ветра // *Известия Крымской Астрофизической Обсерватории*. 2013. Т. 109, № 1. С. 85–91. Личный вклад 50%. Объем 0.84 печатных листа.
26. *Antokhina E. A., Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M.* Modelling light curves of binary systems: accounting for extended winds // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 2013. Vol. 28, no. 1. P. 3–8. Личный вклад 40%. Объем 0.72 печатных листа.

27. *Antokhin I. I.* Solving light curves of WR+O binaries: the regularization approach // Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege. 2011. Vol. 80. P. 549–554. Личный вклад 100%. Объем 0.72 печатных листа.
28. *Antokhin I. I.* X-Ray Formation Mechanisms in Massive Binary Systems // Publications de l’Observatoire Astronomique de Beograd. 2009. Vol. 86. P. 15–23. Личный вклад 100%. Объем 1.08 печатных листа.
29. *Antokhin I. I., Owocki S. P., Brown J. C.* A Steady, Radiative-Shock Method for Computing X-Ray Emission from Colliding Stellar Winds in Close, Massive Star Binaries // Massive Stars in Interactive Binaries. Vol. 367 / ed. by N. St-Louis, A. F. J. Moffat. 2007. P. 165–171. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series). Личный вклад 50%. Объем 0.84 печатных листа.
30. *Antokhin I. I.* X-ray properties of early-type binaries: theory versus observations // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2007. Vol. 26, no. 1. P. 59–62. Личный вклад 100%. Объем 0.48 печатных листа.
31. *van der Hucht K. A., Raassen A. J. J., Mewe R., Antokhin I. I., Rauw G., Vreux J. M., Schild H., Schmutz W.* XMM-Newton Studies of the Wolf-Rayet Colliding-Wind Binaries WR 25 (WN6h+O4f) and WR 11 (WC8+O7.5III) // Massive Stars in Interactive Binaries. Vol. 367 / ed. by N. St-Louis, A. F. J. Moffat. 2007. P. 159–163. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series). Личный вклад 40%. Объем 0.60 печатных листа.
32. *Raassen A. J. J., van der Hucht K. A., Mewe R., Antokhin I., Rauw G., Vreux J. M., Schmutz W., Güdel M.* XMM-Newton high-resolution X-ray spectroscopy of the Wolf-Rayet object WR25 (WN6HA+O4F) // Advances in Space Research. 2003a. Vol. 32, no. 6. P. 1161–1165. Личный вклад 50%. Объем 0.60 печатных листа.
33. *Gosset E., Rauw G., Vreux J.-M., Nazé Y., Antokhin I. I., Sana H.* Preliminary results from XMM-Newton observations of the massive Wolf-Rayet binary WR 22 (WN7h+O9III-V) // A Massive Star Odyssey: From Main Sequence to Supernova. Vol. 212 / ed. by K. van der Hucht, A. Herrero, C. Esteban. 2003. P. 188–189. Личный вклад 30%. Объем 0.24 печатных листа.
34. *Antokhin I. I., Rauw G., Vreux J. M., van der Hucht K. A.* Search for X-ray Variability in Early-type Stars in the Carina OB1 Association with XMM-Newton // Magnetic Fields in O, B and A Stars: Origin and Connection to Pulsation, Rotation and Mass Loss. Vol. 305 / ed. by L. A. Balona, H. F.

Henrichs, R. Medupe. 2003. P. 383–386. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series). Личный вклад 90%. Объем 0.48 печатных листа.

35. *Raassen A., van der Hucht K., Mewe R., Antokhin I., Guedel M., Schmutz W.* XMM-newton high-resolution X-ray - spectroscopy of WR 25 // 34th COSPAR Scientific Assembly. Vol. 34. 2002. id. 1592. 3 pp.. Личный вклад 50%. Объем 0.36 печатных листа.

## Список литературы

- Antokhina E. A.* Synthesis of Theoretical Lightcurves of Close Binary Systems // Soviet Ast. — 1988. — Vol. 32. — P. 608.
- Antokhina E. A.* Synthesis of theoretical radial velocity curves and light curves for close binary systems with eccentric orbits // Astronomy Reports. — 1996. — Vol. 40, no. 4. — P. 483–493.
- Castor J. I., Abbott D. C., Klein R. I.* Radiation-driven winds in Of stars. // ApJ. — 1975. — Vol. 195. — P. 157–174.
- Chandrasekhar S.* On the hypothesis of the radial ejection of high-speed atoms for the Wolf-Rayet stars and the novae // MNRAS. — 1934. — Vol. 94. — P. 522–538.
- Dessart L., Owocki S. P.* Two-dimensional simulations of the line-driven instability in hot-star winds // A&A. — 2003. — Vol. 406. — P. L1–L4.
- Hamann W. R., Gräfener G.* Grids of model spectra for WN stars, ready for use // A&A. — 2004. — Vol. 427. — P. 697–704.
- Hamann W. R., Gräfener G., Feldmeier A., Oskinova L., et al.* Wolf-Rayet Analyses // Hydrogen-Deficient Stars. Vol. 391 / ed. by A. Werner, T. Rauch. — 2008. — P. 293. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
- Hamann W. R., Gräfener G., Koesterke L., Sander A., et al.* PoWR: Potsdam Wolf-Rayet Models. — 2023. — Astrophysics Source Code Library, record ascl:2301.023.
- Hamann W. R., Gräfener G., Liermann A., Hainich R., et al.* The Galactic WN stars revisited. Impact of Gaia distances on fundamental stellar parameters // A&A. — 2019. — Vol. 625. — A57.
- Hamann W. R., Koesterke L.* Spectrum formation in clumped stellar winds: consequences for the analyses of Wolf-Rayet spectra // A&A. — 1998. — Vol. 335. — P. 1003–1008.
- Humphreys R. M., Nichols M., Massey P.* On the initial masses and evolutionary origins of Wolf-Rayet stars. // AJ. — 1985. — Vol. 90. — P. 101–108.
- Kurucz R. L.* Model atmospheres for G, F, A, B, and O stars. // ApJS. — 1979. — Vol. 40. — P. 1–340.
- LIGO Scientific Collaboration, Aasi J., Abbott B. P., Abbott R., et al.* Advanced LIGO // Classical and Quantum Gravity. — 2015. — Apr. — Vol. 32, no. 7. — P. 074001.
- Lyskova N., Churazov E., Moiseev A., Sil'chenko O., et al.* Stellar kinematics of X-ray bright massive elliptical galaxies // MNRAS. — 2014. — Vol. 441, no. 3. — P. 2013–2033.
- Owocki S. P., Puls J.* Nonlocal Escape-Integral Approximations for the Line Force in Structured Line-driven Stellar Winds // ApJ. — 1996. — Vol. 462. — P. 894.
- Owocki S. P., Puls J.* Line-driven Stellar Winds: The Dynamical Role of Diffuse Radiation Gradients and Limitations to the Sobolev Approach // ApJ. — 1999. — Vol. 510, no. 1. — P. 355–368.

- Owocki S. P., Rybicki G. B.* Instabilities in line-driven stellar winds. I. Dependence on perturbation wavelength. // *ApJ*. — 1984. — Vol. 284. — P. 337–350.
- Owocki S. P., Rybicki G. B.* Instabilities in line-driven stellar winds. II - Effect of scattering. // *ApJ*. — 1985. — Vol. 299. — P. 265–276.
- Parkin E. R., Pittard J. M., Corcoran M. F., Hamaguchi K.* Spiraling Out of Control: Three-dimensional Hydrodynamical Modeling of the Colliding Winds in  $\eta$  Carinae // *ApJ*. — 2011. — Vol. 726, no. 2. — P. 105.
- Pittard J. M., Stevens I. R.* Theoretical X-ray properties of colliding stellar winds in O+O star binaries // *MNRAS*. — 1997. — Vol. 292, no. 2. — P. 298–316.
- Poniatowski L. G., Sundqvist J. O., Kee N. D., Owocki S. P., et al.* Dynamically inflated wind models of classical Wolf-Rayet stars // *A&A*. — 2021. — Vol. 647. — A151.
- Rauw G., Vreux J. M., Stevens I. R., Gosset E., et al.* Phase-resolved X-ray and optical spectroscopy of the massive binary HD 93403 // *A&A*. — 2002. — Vol. 388. — P. 552–562.
- Sana H., Stevens I. R., Gosset E., Rauw G., et al.* A phase-resolved XMM-Newton campaign on the colliding-wind binary HD 152248 // *MNRAS*. — 2004. — Vol. 350, no. 3. — P. 809–828.
- Sander A. A. C., Fürst F., Kretschmar P., Oskinova L. M., et al.* Coupling hydrodynamics with comoving frame radiative transfer. II. Stellar wind stratification in the high-mass X-ray binary Vela X-1 // *A&A*. — 2018. — Vol. 610. — A60.
- Sander A. A. C., Hamann W. R., Todt H., Hainich R., et al.* Coupling hydrodynamics with comoving frame radiative transfer. I. A unified approach for OB and WR stars // *A&A*. — 2017. — Vol. 603. — A86.
- Sander A. A. C., Vink J. S., Hamann W. R.* Driving classical Wolf-Rayet winds: a  $\Gamma$ - and  $Z$ -dependent mass-loss // *MNRAS*. — 2020. — Vol. 491, no. 3. — P. 4406–4425.
- Sander A. A. C., Vink J. S.* On the nature of massive helium star winds and Wolf-Rayet-type mass-loss // *MNRAS*. — 2020. — Vol. 499, no. 1. — P. 873–892.
- Schild H., Maeder A.* Wolf-Rayet stars in clusters : the initial stellar masses and evolutionary connections between subtypes. // *A&A*. — 1984. — Vol. 136. — P. 237–242.
- Stevens I. R., Blondin J. M., Pollock A. M. T.* Colliding Winds from Early-Type Stars in Binary Systems // *ApJ*. — 1992. — Vol. 386. — P. 265.
- Sundqvist J. O., Owocki S. P., Puls J.* 2D wind clumping in hot, massive stars from hydrodynamical line-driven instability simulations using a pseudo-planar approach // *A&A*. — 2018. — Vol. 611. — A17.
- Usov V. V.* Stellar Wind Collision and X-Ray Generation in Massive Binaries // *ApJ*. — 1992. — Vol. 389. — P. 635.
- Прилутский О. Ф., Усов В. В.* Рентгеновское излучение двойных систем Вольфа-Райе // *Астрономический журнал*. — 1976. — Т. 53. — С. 6.
- Черепашук А. М.* Возможность открытия двойных систем среди звезд Вольфа-Райе с использованием их рентгеновского излучения. // *Письма в Астрономический журнал*. — 1976. — Т. 2. — С. 356–360.