

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Шапошников Иван Андреевич

**Спектральные исследования звезд Вольфа-Райе в
двойных системах типа $WR+OB$ как эволюционных
предшественников релятивистских объектов**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Диссертация подготовлена на кафедре экспериментальной астрономии физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: **Черепашук Анатолий Михайлович**
доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН

Официальные оппоненты: **Винокуров Александр Сергеевич**,
кандидат физико-математических наук,
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук, лаборатория физи-
ки звезд, заведующий лабораторией

Иванов Павел Борисович,
доктор физико-математических наук,
астрокосмический центр Физического инсти-
тута им. П.Н. Лебедева Российской академии
наук, отдел теоретической астрофизики и кос-
мологии, главный научный сотрудник

Юнгельсон Лев Рафаилович,
доктор физико-математических наук,
Институт астрономии Российской академии
наук, отдел физики и эволюции звезд, веду-
щий научный сотрудник

Защита состоится 18 июня 2026 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссер-
тационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета
имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Университетский пр.,
д. 13, конференц-зал.

E-mail: dissovet@sai.msu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной биб-
лиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на
портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3885>.

Автореферат разослан 15 мая 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МГУ.013.1,
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Массивным звездам отведена особая роль в природе. Как следует из распределения звезд по массам после их образования (начальная функция масс, НФМ), Вселенная населена в основном маломассивными звездами с массой около 1 массы Солнца и менее. Однако именно стремительная (по масштабам Вселенной) и бурная эволюция массивных звезд приводит к образованию уникальных астрофизических объектов, называемых компактными или релятивистскими - нейтронных звезд (НЗ) и черных дыр (ЧД). Важность их изучения трудно переоценить: экстремальные состояния вещества, физических полей и самого пространства-времени ставят наблюдательные исследования релятивистских объектов на передний фронт науки, поставляя уникальные данные, получение которых иным образом не представляется возможным.

Многие массивные звезды входят в состав двойных и кратных систем. Факт двойственности, с одной стороны, поставляет дополнительные данные о звездах, не зависящие от теоретических моделей звездных структур и атмосфер. С другой стороны, эволюция звезд в тесных двойных системах (ТДС) оказывается более разнообразной и зачастую запутанной – в этом случае уместнее говорить не о строгих теоретических моделях эволюции тесных двойных звезд, а об эволюционных сценариях ТДС [1–3].

Массивные звезды, потерявшие в ходе своей эволюции внешнюю водородную оболочку, наблюдаются как звезды типа Вольфа-Райе (Wolf-Rayet, WR). Этот редкий тип звезд назван в честь французских астрономов Ш. Вольфа и Ж. Райе, в 1867 году впервые обративших внимание на три звезды в созвездии Лебеда, спектры которых выделялись мощными и широкими эмиссионными линиями [4]. Впоследствии эти линии были отождествлены с излучением атомов и ионов гелия, азота, углерода и кислорода. Они формируются в протяженной атмосфере — основании звездного ветра, истекающего с предельной скоростью $\sim 10^3$ км/с при темпе потери массы $\sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$. Наблюдаемые проявления в спектрах, характерные для массивных звезд WR, имеют место и для некоторых других типов астрофизических объектов - например, для [WR]-ядер планетарных туманностей или интегральных спектров так называемых WR-галактик. В дальнейшем под словами «звезда типа Вольфа-Райе» или под сокращением WR понимается «классическая» звезда типа Вольфа-Райе I типа населения.

Начиная с 70-х годов XX века исследователями стала уверенно утверждаться эволюционная связь звезд Вольфа-Райе в массивных ТДС с ОБ-спутниками (WR+OB) с кандидатами в черные дыры в массивных рентгеновских двойных. Эта идея была высказана независимо Тутуковым

и Юнгельсоном [5; 6], Пачински [7] и ван ден Хьювелом [8; 9]. Открытие компактных объектов в паре с маломассивными звездами, таких как маломассивные рентгеновские двойные, дало указание на возможность иного эволюционного пути массивной звезды, когда основная потеря массы осуществляется в ходе стадии с общей оболочкой. При образовании общей оболочки двойная система интенсивно теряет угловой момент, что приводит к очень тесной паре нормальной звезды-карлика и компактного объекта, если только взрыв сверхновой при коллапсе обнажившегося ядра массивной звезды не разрушает гравитационную связанность системы. Дальнейшая эволюция таких систем протекает чрезвычайно медленно (в ядерной шкале маломассивной звезды), а определяющими факторами изменения орбитальных параметров становятся унос углового момента замгниченным слабым звездным ветром и гравитационными волнами. Хотя до сих пор не было получено неоспоримых наблюдательных подтверждений тесных двойных типов OB+МК или WR+МК (т. е. пар массивных звезд OB/WR с маломассивными звездами спектральных классов К/М), такие системы должны существовать.

В седьмом каталоге галактических звезд WR ван дер Хухта [10] приведены данные о 227 объектах. По состоянию на апрель 2026 года в расширенном онлайн-каталоге [11] галактических Вольфа-Райе звезд числится 705 звезд. Их полная численность в Галактике оценивается в несколько тысяч. Число известных индивидуальных WR-звезд в других галактиках исчисляется сотнями. Около 35% звезд WR из каталога [10] входит в состав двойных WR+OB систем, содержащих в качестве спутника массивную звезду спектрального класса O (или B ранних подклассов 0-1). Часть этих звездных систем имеют орбитальные периоды порядка нескольких суток. Известны также системы, состоящие из двух звезд Вольфа-Райе (WR 20a) или из звезды Вольфа-Райе и компактного релятивистского объекта (Суг X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1). Среди известных двойных типа WR+O есть несколько систем, показывающих выраженные затмения. Это V444 Суг, CQ Сер, CX Сер, CV Сер и LS III +44 21 в нашей Галактике, HD 5980 в Малом Магеллановом облаке и BAT99 129 в Большом Магеллановом облаке.

Коллапсы углеродно-кислородных (CO) ядер звезд WR приводят к образованию релятивистских (компактных) объектов и вспышкам сверхновых типа Ib/c. При прямом гравитационном коллапсе CO-ядра звезды WR с массой, превышающей предел Оппенгеймера-Волкова ($M_{CO} > M_{OV} \approx 3 M_{\odot}$), наиболее вероятным исходом является образование черной дыры.

Под черной дырой (ЧД) понимается область пространства-времени, гравитационное поле которой настолько сильно, что никакой сигнал, даже световой, не может удалиться от нее в пространственную бесконечность будущего [12]. В настоящей работе речь идет об астрофизических черных

дырах звездных масс, являющихся конечными продуктами эволюции массивных звезд.

Поскольку сама черная дыра скрыта от внешнего наблюдателя под горизонтом событий, непосредственно наблюдать ее невозможно. Долгое время концепция ЧД оставалась чисто умозрительной. Первые теоретические исследования, в которых была показана возможность наблюдения ЧД в жестком диапазоне электромагнитного спектра по следам их взаимодействия с окружающей материей, были проведены Зельдовичем [13] и Салпитером [14]. В 1973 вышла знаменитая статья Шакуры и Сюняева, в которой была представлена теория дисковой аккреции на компактный объект в тесных двойных системах, называемая в наше время стандартной моделью аккреционного диска [15]. Новиков и Торн [16] дополнили модель Шакуры-Сюняева учетом эффектов ОТО. Этими и другими работами не только была обоснована принципиальная возможность обнаружения черных дыр, но и заложена надежная физическая основа интерпретации астрофизических наблюдений.

Начало наблюдательного исследования ЧД совпало с началом эры рентгеновской астрономии. Первый источник космического рентгеновского излучения Sco X-1=V818 Sco был открыт в 1962 в ходе ракетного эксперимента Aerobee [17] и впоследствии отождествлен с аккрецирующей нейтронной звездой в паре с маломассивным компаньоном [18]. Первым астрономическим источником рентгеновского излучения, отождествленным впоследствии с ЧД, стал источник Cyg X-1, открытый в 1964 году [19]. Лютый, Сюняев и Черепащук [20] показали, что оптическая переменность источника BD +34°3815=V1357 Cyg, отождествленного с Cyg X-1 [21], может быть объяснена эффектом эллипсоидальности деформированной видимой компоненты системы, что позволило оценить угол наклона орбиты и на основе известной функции масс $f(M) = 0.225 M_{\odot}$ [21; 22] дать ограничение на массу невидимого компонента: $M_x > 7.8 M_{\odot}$. Несколько позднее этими же авторами [23] на основе UVB-фотометрии V1357 Cyg и ограничения на светимость оптической звезды в системе была получена оценка массы невидимого компонента $M_x \approx 20 M_{\odot}$, близкая к современному значению $M_x = 21.2 \pm 2.2 M_{\odot}$ [24]. Запуск первой специализированной американской рентгеновской обсерватории Uhuru в 1971 году положил начало систематическим наблюдениям неба в рентгеновском диапазоне. Uhuru было открыто около 300 астрофизических источников рентгеновского излучения, большинство из которых было отождествлено с аккрецирующими компактными объектами в ТДС. Последующее отождествление открытых рентгеновских источников с двойными системами в оптическом диапазоне спектра [25; 26] позволило на основе исследования орбитального движения компонент систем определить массы релятивистских объектов. Современные орбитальные рентгеновские обсерватории, такие как Chandra, XMM-Newton, Спектр-РГ и др., открывают

на небе миллионы рентгеновских источников, а число детально исследованных в оптике отождествленных двойных систем с ЧД в настоящее время составляет несколько десятков.

Что касается теоретического понимания популяций этих объектов, то здесь ведущую роль играет метод эволюционного популяционного синтеза [27]. Это комплексное моделирование, которое объединяет наши знания о звездной эволюции, переносе массы в двойных системах и взрывах сверхновых в виде численной симуляции эволюционных сценариев на большой выборке звезд. Принципы популяционного синтеза применительно к эволюции тесных двойных звезд были заложены в пионерских работах Корнилова и Липунова [28; 29], которым удалось на основе своих расчетов объединить общей физической схемой все двойные системы с нейтронными звездами, обладающие подчас кардинально отличающимися наблюдательными проявлениями [28;30]. Эти принципы были реализованы в программном комплексе «Машина Сценариев» [31].

Несмотря на недостаток прямых наблюдательных сведений о коллапсах ядер массивных звезд, образованные в результате этого процесса объекты и массивные звезды на предшествующих эволюционных стадиях наблюдаемы, а их сравнение основных физических свойств астрофизических объектов до и после коллапса позволяет делать определенные выводы об этом процессе. Определенной проблемой является необходимость приведения наблюдаемых свойств объектов сравнения в соответствие с таковыми на момент незадолго до коллапса. Как неоднократно отмечалось выше, звезды WR интенсивно теряют массу в виде звездного ветра, поэтому их массы на момент перед коллапсом должны быть несколько меньше по сравнению с массами наблюдаемых звезд WR. Поэтому возникает необходимость в разработке корректной методики оценки темпов потери массы звездами WR и исследования их корреляции с другими важными физическими параметрами, в первую очередь с текущей массой M_{WR} .

Массы и радиусы «ядер» звезд WR определяются из анализа кривых лучевых скоростей и кривых блеска тесных двойных WR+OB систем [3]. Для определения темпов потери массы \dot{M}_{WR} звезд WR применяются как спектроскопические методы анализа профилей эмиссионных линий, так и методы, основанные на анализе теплового радиоизлучения или ИК излучения от звезд WR (в том числе одиночных), а также методы, при которых анализируется орбитальная переменная линейная поляризация излучения двойных WR+OB систем. Однако эти методы оценки \dot{M}_{WR} являются модельно зависимыми. Значения \dot{M}_{WR} , оцененные из анализа теплового радиоизлучения или ИК излучения звезд WR отягощены эффектами клочковатости звездного ветра (clumping). Наиболее надежным методом оценки \dot{M}_{WR} считается динамический метод, основанный на анализе векового изменения орбитального периода WR+OB систем. Впервые динамический метод был применен Халиуллиным [32], что позволило

открыть вековое удлинение орбитального периода у затменной двойной системы V444 Cyg (WN5+O6, $P_{orb} \simeq 4.2$ сут.). Считая, что это удлинение периода \dot{P} вызвано радиальной потерей массы звездой WR в виде высокоскоростного ветра (Джинсовская мода потери массы), он дал оценку $\dot{M}_{WR} = 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$. Дальнейшие наблюдения позволили уточнить величину \dot{P} и дать улучшенную оценку $\dot{M}_{WR} = 7 \cdot 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, которая хорошо согласуется со значением $\dot{M}_{WR} = 6 \cdot 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, оцененным по орбитальной поляризационной переменности системы [33]. При этом оказалось, что найденная таким методом величина \dot{M}_{WR} в 3-4 раза меньше величины $\dot{M}_{WR} = 2.4 \cdot 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$, найденной для V444 Cyg из анализа ее радио- и ИК-потоков [34; 35]. Из-за того, что оценки \dot{M}_{WR} по радио- и ИК-потокам отягощены эффектами клочковатости ветра WR, соответствующая оценка завышена в 3-4 раза. В то же время, величина $\dot{M}_{WR} = (6 \div 7) \cdot 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$, оцененная по изменению орбитального периода и по орбитальной переменности поляризации излучения системы, от клочковатости ветра WR не зависит и потому является более надежной.

Метод поиска изменений орбитального периода, основанный на анализе кривых блеска WR+OB систем, весьма перспективен для получения динамических оценок величины \dot{M}_{WR} , но, к сожалению, число затменных двойных систем WR+OB весьма мало: на северном небе для наблюдения доступны только системы V444 Cyg, CX Ser и CQ Ser, а также менее надежные кандидаты GP Ser и CV Ser. В то же время, число спектрально-двойных WR+OB систем, в которых не наблюдаются затмения, составляет несколько десятков [10]. Поэтому представляет интерес разработка методов поиска величин \dot{P} спектроскопическим путем с использованием кривых лучевых скоростей компонент двойных WR+OB систем, полученных в разные эпохи наблюдений. Поскольку начальные эпохи спектральных наблюдений некоторых WR+OB систем относятся к 1940-1950 гг., можно надеяться, что за прошедшие 70-80 лет спектральные наблюдения позволят заметить изменения их орбитальных периодов. Даже в случае, если имеющихся сейчас данных недостаточно, проведение новых спектральных наблюдений позволит реализовать еще одну эпоху с тем, чтобы обнаружение векового изменения орбитального периода таких WR+OB систем стало возможным с будущим.

Цели диссертационной работы

Целью диссертационной работы является комплексное спектроскопическое исследование звезд WR, входящих в состав двойных систем типа WR+OB, и их эволюционной взаимосвязи с компактными объектами (прежде всего – с черными дырами).

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

1. Сбор и анализ наблюдательных данных по двойным системам типа WR+OB, доступных в настоящий момент в научной литературе, получение и обработка новых данных по доступным для наблюдений объектам.
2. Исследование возможности использования кривых лучевых скоростей тесных двойных систем типа WR+OB для динамической оценки темпа векового изменения орбитального периода \dot{P} системы путем сравнения графиков «O-C», построенных по кривым блеска и кривым лучевых скоростей хорошо изученных затменных тесных двойных систем типа WR+OB, а в случае подтверждения надежности нового метода - его приложения к тесным двойным системам типа WR+OB, для которых нет возможности оценить \dot{P} классическим фотометрическим методом «O-C».
3. Исследование эффектов возможной анизотропии ветра WR и его вероятного влияния на орбитальную эволюцию двойных систем, а также уточнение возможности оценки темпов потери массы звездами WR в двойных системах динамическим методом по наблюдениям изменений орбитальных параметров.
4. Наблюдательная оценка зависимости темпа потери массы звездами WR от их текущей массы и разработка методики оценки массы звезд WR непосредственно перед гравитационным коллапсом.
5. Сравнение статистических распределений конечных масс звезд WR и их CO-ядер с распределением масс известных ЧД в двойных звездных системах.

Научная новизна

1. Выполнены новые спектральные наблюдения ряда двойных систем типа WR+OB северного неба. Для короткопериодических двойных систем типа WR+OB WR 155 = CQ Cep, WR 151 = CX Cep, и WR 139 = V444 Cyg, WR 127 = Hen 3-1772 и WR 141 = V2183 Cyg построены новые кривые лучевых скоростей, уточнены орбитальные параметры систем и массы звезд WR.
2. Впервые темп векового изменения орбитального периода \dot{P} ряда тесных двойных систем типа WR+OB вычислен из сравнения методом «O-C» кривых лучевых скоростей, полученных для одной системы в разные эпохи. Полученные результаты согласуются с результатами аналогичных расчетов по кривым блеска хорошо изученных затменных тесных двойных систем типа WR+OB V444 Cyg, CQ Cep и CX Cep, что показывает надежность нового («спектроскопического») метода «O-C». Применяв метод «O-C» к новым и архивным кривым лучевых скоростей систем WR 127 =

Her 3-1772 и WR 141 = V2183 Cyg, удалось открыть вековое увеличение орбитальных периодов этих систем.

3. На выборке из около 30 двойных систем типа WR+OB было подтверждено отсутствие корреляции между доплеровскими ширинами профилей эмиссионных линий звезд WR и углом наклона плоскости орбиты i двойной системы, что может говорить о большой степени изотропии крупномасштабной структуры ветров звезд WR.
4. С применением наиболее надежного метода определения \dot{M}_{WR} по изменениям орбитальных периодов WR+OB систем удалось оценить темпы потери массы четырех звезд WR в диапазоне масс $\sim 10 \div 25 M_{\odot}$ и тем самым проверить по динамическим оценкам \dot{M}_{WR} зависимость \dot{M}_{WR} от M_{WR} , имеющую большое значение для астрофизического моделирования эволюции массивных звезд.
5. На основе этих результатов с использованием распределения масс звезд WR и черных дыр выведена эмпирическая связь между массами звезды WR в конце эволюции и массами ЧД.

Научная и практическая значимость

Опыт использования спектроскопического подхода к динамической оценке \dot{P} в перспективе может быть применен к большему числу короткопериодических двойных систем типа WR+OB. Полученные к настоящему времени новые спектральные наблюдения ТДС типа WR+OB реализуют еще одну эпоху в общем массиве наблюдательных данных по этим системам, что позволит в будущем (через 10-20 лет) при реализации новых наблюдательных программ уточнить найденные \dot{P} и получить оценки для тех систем, для которых сегодня наблюдательных данных недостаточно. При наличии достаточного количества наблюдательных точек и их покрытия по эпохам спектроскопический метод «О-С» также может быть применен для анализа стабильности орбитальных параметров тесных двойных звезд других типов. Соотношения, выражающие установленные в ходе работы связи $\dot{M}_{WR}(M_{WR})$ и $M_{BH}(M_{CO})$, могут использоваться в моделях астрофизического популяционного синтеза в расчетах эволюции массивных звезд и уточнения механизмов формирования черных дыр.

Методология и методы исследования

Наблюдательной основой работы является оптическая длиннощелевая спектроскопия низкого разрешения двойных систем типа WR+OB. Получение и обработка нового наблюдательного материала базируется на стандартных процедурах, применяемых при спектроскопических наблюдениях астрофизических объектов. Архивные спектроскопические данные,

включающие в себя измерения лучевых скоростей звезд в изучаемых системах и спектрограммы в районах исследуемых спектральных линий, взяты из научной литературы и электронных научных баз данных. Расчеты, включающие в себя приближение наблюдаемых положений и профилей спектральных линий, сравнение рядов кривых лучевых скоростей и распределений масс, основываются на общепринятых алгоритмах оптимизации и реализованы в виде отдельных программ на языке программирования Python. Зависимость темпа потери массы звездой WR от ее текущей массы выводится на основе надежных динамических оценок по вековому увеличению орбитального периода короткопериодических двойных систем типа WR+OB. Эволюционная связь звезд WR и черных дыр в двойных системах изучается путем сравнения эмпирических распределений их масс при минимуме модельных предположений.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов гарантируется тщательным подходом к спектральным исследованиям звезд WR, новыми наблюдательными данными и использованием проверенных архивных данных, опубликованных в научной литературе по двойным системам со звездами Вольфа-Райе и черными дырами. Надежность применения кривых лучевых скоростей для оценки темпа векового изменения орбитального периода двойных систем типа WR+OB методом «О-С» обоснована путем сравнения с результатами применения классического метода «О-С» по моментам минимума блеска. При вычислении темпа потери масс звезды WR по наблюдаемому темпу векового увеличения орбитального периода двойной системы типа WR+OB отдельно исследованы возможные источники систематических ошибок при применении классической формулы джинсовской моды, такие как конечный радиус звезды и возможные эффекты ориентации в звездном ветре. Зависимость темпа потери массы звезды WR \dot{M}_{WR} от массы звезды M_{WR} исследована на основе динамических оценок для звезд WR в достаточно широком диапазоне масс ($\sim 10-25 M_{\odot}$), не отягощенных трудно учитываемым эффектом клочковатости ветра. Сравнение распределений масс звезд WR и ЧД выполнялось по представительным выборкам объектов данных типов. Использование при сравнении только эмпирических оценок массы с учетом различного рода неопределенностей в их индивидуальных распределениях позволяет получать модельно-независимые результаты.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование кривых лучевых скоростей тесных двойных систем типа WR+OB, подобно кривым блеска затменных систем, позволяет получить динамическую оценку темпа векового изменения орбитального периода \dot{P} методом «О-С». Для затменных систем

- V444 Cyg, CQ Ser и CX Ser значения темпа изменения периода \dot{P} , определённые спектроскопическим методом «O-C», согласуются с оценками \dot{P} , полученными методом «O-C» из фотометрических кривых блеска. Системы WR 127 = Hеп 3-1772 и WR 141 = V2183 Cyg обладают вековым увеличением орбитальных периодов.
2. Эмпирическая зависимость темпа потери массы звезды WR от её текущей массы, построенная по динамическим оценкам \dot{P} в четырёх системах типа WR+OB с массами звезд WR в диапазоне $M_{WR} \approx 10 - 25 M_{\odot}$, имеет степенной характер с показателем степени около 1.7.
 3. Распределение масс звезд WR перед гравитационным коллапсом связано с распределением масс черных дыр в двойных звездных системах степенным преобразованием, близким к теоретической зависимости массы CO-ядра звезды WR от её массы.
 4. Доплеровские ширины эмиссионных линий WR в спектрах нескольких десятков двойных типа WR+OB не показывают значимой корреляции с углом наклона орбиты ни в случае систем со звездами WR спектрального подкласса WN, ни для систем со звездами WC.

Апробация работы

Положения диссертационной работы докладывались автором на следующих конференциях и научных школах:

1. Ломоносовские чтения - 2023. Секция астрономии, МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, 13 апреля 2023 г. Устный доклад.
2. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звезд: теория и наблюдения», МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, 27-30 июня 2023 г. Устный доклад.
3. II Всероссийская школа Национального центра физики и математики по экспериментальной лабораторной астрофизике и геофизике, НЦФМ, г. Саров, Нижегородская область, Россия, 1-5 июля 2024 г. Устный доклад.
4. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2024 «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», САО РАН, п. Нижний Архыз, республика Карачаево-Черкесия, Россия, 25-31 августа 2024 г. Устный доклад.
5. Международная конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2024)», ИКИ РАН, г. Москва, Россия, 23-26 декабря 2024 г. Стендовый доклад.

6. 52-я Всероссийская с международным участием студенческая научная конференция «Физика Космоса», Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, с. Слобода, Свердловская область, Россия, 27-31 января 2025 г. Устный доклад.
7. Всероссийская Школа-конференция молодых астрономов «Космос, Астрофизика, Солнце, Планеты» – КАСП - 2025, ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, 19-23 мая 2025 г. Устный доклад.
8. Летняя школа Фонда «БАЗИС» — 2025 «Актуальные вопросы современной теоретической астрофизики», Международный академический центр «Гармония», г. Санкт-Петербург, Россия, 14-22 июля 2025 г. Стендовый доклад.
9. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звезд в эпоху многоволновых наблюдений», СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, 22-26 сентября 2025 г. Устный доклад.
10. Международная конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2025 (HEA-2025)», ИКИ РАН, г. Москва, Россия, 22-25 декабря 2025 г. Устный доклад.

Личный вклад

Результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

В статье 1 (личный вклад 70%) автором был выполнен комплексный анализ архивных и новых фотометрических и спектроскопических наблюдений тесных двойных типа WR+OB CQ Cep и CX Cep, проведены измерения лучевых скоростей, вычислены элементы спектроскопических орбит и оценен темп векового изменения орбитального периода этих двух систем. В статье 2 (личный вклад 70%) автором была проделана аналогичная работа по системе V444 Cyg. В статьях 3 (личный вклад 70%) и 4 (личный вклад 100%) был выполнен анализ архивных и новых спектроскопических наблюдений тесных двойных типа WR+OB WR 127 = Hen 3-1772 и WR 141 = V2183 Cyg, проведены измерения лучевых скоростей, вычислены элементы спектроскопических орбит и оценен темп векового изменения орбитального периода этих двух систем. В статье 5 (личный вклад 70%) автором были проанализированы архивные работы, посвященные спектроскопии двойных систем типа WR+OB и оценками углов наклона орбит этих систем, проведены измерения доплеровских ширин эмиссионных линий WR в доступных для анализа спектрах двойных систем типа WR+OB и исследованы корреляции ширин линий в спектрах WR с различными орбитальными и физическими параметрами. В статье 6 (личный вклад 70%) автором были проанализированы архивные работы, посвященные оценке

масс звезд WR в двойных системах типа WR и черных дыр в двойных звездных системах, а также были разработаны аналитические и численные методы вычисления преобразования между распределениями масс звезд WR и черных дыр в двойных системах. Во всех приведенных работах вклад автора в работу над текстом статей и формулировку основных выводов является решающим.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 155 страниц, включая 29 рисунков и 37 таблиц. Список литературы содержит 265 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** описана актуальность темы, цели и задачи работы, научная новизна и методология, научная и практическая значимость исследования, достоверность и обоснованность результатов, личный вклад автора, публикации и апробация результатов, а также сформулированы выносимые на защиту положения.

В **главе 1** описывается методика и результаты спектральных наблюдений двойных систем типа WR+OB, проведенные на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ. Детально описываются результаты наблюдений пяти короткопериодических двойных систем типа WR+OB WR 155 = CQ Cep, WR 151 = CX Cep, WR 139 = V444 Cyg, WR 127 = Hen 3-1772 и WR 141 = V2183 Cyg, приводятся уточненные элементы их спектроскопических орбит и новые оценки масс звезд в этих системах.

В **главе 2** описываются результаты поиска эволюционных изменений орбитальных периодов наиболее изученных ТДС типа WR+OB. В первом разделе главы описывается мотивация работы, формулируются цели и постановка задачи. В следующих двух разделах приводится детальный обзор архивных фотометрических и спектроскопических данных, используемых для анализа стабильности орбитальных параметров исследуемых ТДС типа WR+OB. Затем дается описание метода «O-C», используемого для оценки \dot{P} , и результаты его применения сперва для затменных ТДС типа WR+OB (по кривым блеска и кривым лучевых скоростей), а затем для спектрально-двойных ТДС типа WR+OB (только по лучевым скоростям). В последнем разделе главы приведены итоговые оценки \dot{P} для пяти исследованных двойных систем.

В **главе 3** описаны наблюдательные исследования крупномасштабной структуры ветров звезд WR в двойных системах типа WR. Применимость обобщенной джинсовской моды для корректной оценки темпа потери массы звездой WR в ТДС типа WR+OB по измерению

векового изменения орбитального периода предполагает высокую степень изотропии ветра. Эта изотропия гипотетически может нарушаться быстрым вращением звезды WR или влиянием массивного спутника. В приливно-синхронизированных ТДС типа WR+OB эти эффекты должны проявляться в корреляции доплеровских ширин эмиссионных линий WR, формирующихся в ветре, и угла наклона плоскости орбиты i . С целью поиска этих эффектов было исследовано около 30 двойных систем типа WR+OB с качественными спектральными данными и надежными оценками i . Отдельный раздел главы посвящен обзору методов измерения наклона орбиты i в случае двойных систем типа WR+OB и обоснованию выбора лучшей оценки для каждой системы в выборке. Анализ корреляции FWHM спектральных линий WR с i проводился по двум наборам линий отдельно для звезд WR подтипов WN и WC и включал в себя предварительную редукцию за спектральные классы звезд каждой системы. Проведенный анализ не выявил статистически значимой корреляции ни для систем со звездами WN, ни для случая звезд WC.

Глава 4 посвящена оцениванию темпа потери масс звездами WR в ТДС типа WR+OB. В начале главы обсуждаются теоретические соотношения между темпами потери масс звезд в тесной двойной системе и темпом изменения орбитального периода – классические медленная мода и мода Джинса, а также обобщение джинсовской моды на случай, когда размеры истекающих звезд нельзя считать пренебрежимо малыми по сравнению с размерами орбиты. Оценки \dot{P} четырех систем типа WR+OB, полученные во второй главе, используются для вычисления \dot{M}_{WR} и построения эмпирической зависимости $\dot{M}_{WR}(M_{WR})$. Показано, что эта зависимость имеет вид, близкий к степенному с показателем степени около 1.7. Обсуждается сравнение оценок \dot{M}_{WR} и зависимости $\dot{M}_{WR}(M_{WR})$, полученных разными методами.

В главе 5 показано соответствие распределения масс СО-ядер звезд WR перед коллапсом с распределением масс черных дыр в двойных системах, обосновывающее эволюционную связь черных дыр со звездами WR. Эта работа выполнялась на основе наблюдаемых масс звезд WR в ТДС типа WR+OB и черных дыр, построенных по данным о приблизительно 30 двойных системах типа WR+OB и около 50 черных дырах, преимущественно в составе рентгеновских двойных систем. Наблюдаемые массы звезд WR скорректированы к их массам в конце эволюционной стадии WR с помощью зависимости $\dot{M}_{WR}(M_{WR})$, выведенной в четвертой главе. Обсуждаются методы аппроксимации наблюдаемых распределений параметрическим законом (в данном случае логнормальным), а также прямой метод сравнения распределений по квантиль-квантильному графику. Анализ распределений финальных масс звезд WR и масс ЧД показал, что эти два распределения связаны соотношением, близким к зависимости массы

СО-ядра гелиевой звезды от ее полной массы. Этот результат подтверждает эволюционную связь звезд WR и ЧД как двух последовательных стадий поздней эволюции массивных звезд, переход между которыми осуществляется через гравитационный коллапс СО-ядра звезды WR.

В **Заключении** подчеркивается важность полученных в работе эмпирических зависимостей $M_{WR}(M_{WR})$ и $M_{ВН}(M_{СО})$ для моделей астрофизического популяционного синтеза при исследовании поздней эволюции тесных двойных систем с массивными компонентами. При дальнейшем накоплении наблюдательных данных по звездам WR и релятивистским объектам в двойных звездных системах эти соотношения будут уточняться. Обсуждаются перспективы дальнейшей работы с данными спектроскопических наблюдений двойных систем типа WR+OB, уже полученными и запланированными к получению на 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. **Shaposhnikov, I.A.**, Cherepashchuk, A.M., Dodin, A.V., Postnov, K.A. Spectroscopic searches for evolutionary orbital period changes in WR+OB binaries: the case of CQ Cep and CX Cep // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – Vol. 523, № 1. – pp. 1524-1537. EDN: UDACXY. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад 70%. Объем 1.68 печатных листов.
2. **Shaposhnikov, I.A.**, Cherepashchuk, A.M., Dodin, A.V., Postnov, K.A. Spectroscopic searches for evolutionary orbital period changes in WR+OB binaries: the case of V444 Cyg // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2023. – Vol. 526, № 3. – pp. 4529-4534. EDN: XNXTKM. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад 70%. Объем 0.72 печатных листов.
3. **Shaposhnikov, I.A.**, Cherepashchuk, A.M., Dodin, A.V., Postnov, K.A. Spectroscopic searches for evolutionary orbital period changes in WR+OB binaries: The case of WR 127 (Hen 3-1772) // Astronomy and Astrophysics. – 2024. – Vol. 683. – L17. EDN: QFQYOC. Импакт-фактор 1.30 (JCI). Личный вклад 70%. Объем 0.60 печатных листов.
4. **Шапошников, И.А.** Спектроскопический поиск эволюционных изменений орбитального периода в двойных системах типа WR+OB. Случай WR 141 // Астрономический журнал. – 2024. – Т. 101, № 12. – С. 1034-1042. EDN: IDJZMQ. Импакт-фактор 1.08 (РИНЦ). Личный вклад 100%. Объем 0.56 печатных листов.

- Shaposhnikov, I.A.** Spectroscopic Searches for Evolutionary Orbital Period Changes in WR+OB Binaries: the Case of WR 141 // *Astronomy Reports*. – 2024. – Vol. 68, № 12. – pp. 1145-1152. EDN: GEXVBTX. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Личный вклад 100%. Объем 0.96 печатных листов.
5. Черепашук, А.М., **Шапошников, И.А.** Поиск эффектов ориентации в звездном ветре звезд Вольфа-Райе // *Астрономический журнал*. – 2025. – Т. 102, № 9. – С. 790-809. EDN: DZLJQD. Импакт-фактор 0.48 (РИНЦ). Личный вклад 70%. Объем 2.40 печатных листов.
Cherepashchuk, A.M., **Shaposhnikov, I.A.** Search for Orientation Effects in the Stellar Winds of Wolf–Rayet Stars // *Astronomy Reports*. – 2025. – Vol. 69, № 7. – pp. 591-608. EDN: AXCBGZ. Импакт-фактор 0.19 (JCI). Личный вклад 70%. Объем 2.16 печатных листов.
6. Postnov, K.A., **Shaposhnikov, I.A.**, Cherepashchuk, A.M. Empirical correlation between masses of black holes and Wolf–Rayet stars derived from their mass distributions in spectroscopic binaries // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2025. – Vol. 544, № 1. – pp. L83-L88. EDN: LZXXJJ. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад 70%. Объем 0.72 печатных листов.

Список литературы

1. *Postnov K.A., Yungelson L.R.* The Evolution of Compact Binary Star Systems // *Living Reviews in Relativity*. – 2014. – Vol. 17, no. 1. – P. 3.
2. *Масевич А.Г., Тутуков А.В.* Эволюция звезд: теория и наблюдения. – изд. 2, испр. изд. – М. : УРСС, 2025.
3. *Черепашук А.М.* Тесные двойные звезды : в 2 ч. – М. : Физматлит, 2013. – Т. 2.
4. *Wolf C.J.E., Rayet G.* Spectroscopie stellaire // *Academie des Sciences Paris Comptes Rendus*. – 1867. – Vol. 65. – Pp. 292–296.
5. *Тутуков А.В., Юнгельсон Л.Р.* Эволюция первичных компонент тесных двойных звезд большой массы // *Научные информации Астросовета АН СССР*. – 1973. – Т. 27. – С. 284–292.
6. *Тутуков А.В., Юнгельсон Л.Р.* Эволюция массивных тесных двойных систем // *Научные информации Астросовета АН СССР*. – 1973. – Т. 27. – С. 284–292.

7. *Paczynski B.* Evolutionary Aspects of Wolf-Rayet Stars // Wolf-Rayet and High-Temperature Stars / Ed. by M.K.V. Bappu, Jorge Sahade; Cambridge University Press. — Vol. 49 of *IAU Symposium*. — 1973. — Pp. 141–162.
8. *van den Heuvel E.P.J.* Wolf-Rayet Systems and the Origin of Massive X-ray Binaries // *Nature Physical Science*. — 1973. — Vol. 242, no. 118. — Pp. 71–72.
9. *van den Heuvel E.P.J.* Late Stages of Close Binary Systems // Structure and Evolution of Close Binary Systems / Ed. by Peter Eggleton, Simon Mitton, John Whelan. — Vol. 73 of *IAU Symposium*. — 1976. — Pp. 35–61.
10. The Sixth Catalogue of Galactic Wolf-Rayet Stars - Their Past and Present / K.A. van der Hucht, P.S. Conti, I. Lundstrom, B. Stenholm // *Sp. Sci. Rev.* — 1981. — Vol. 28, no. 3. — Pp. 227–306.
11. Galactic Wolf-Rayet Catalogue. — URL: <https://pacrowther.staff.shef.ac.uk/WRcat/Description.php>.
12. *Новиков И.Д., Фролов В.П.* Физика черных дыр. — М. : Наука, 1986.
13. *Зельдович Я.Б.* Судьба звезды и выделение гравитационной энергии при аккреции // *Доклады Академии наук*. — 1964. — Т. 155. — С. 67–69.
14. *Salpeter E.E.* Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects // *Astrophys. J.* — 1964. — Vol. 140. — Pp. 796–800.
15. *Shakura N.I., Sunyaev R.A.* Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. Astrophys.* — 1973. — Vol. 24. — Pp. 337–355.
16. *Novikov I.D., Thorne K.S.* Black holes / Ed. by C. DeWitt, B. DeWitt. — New York : Gordon and Breach, 1973.
17. Evidence for X-Rays From Sources Outside the Solar System / R. Giacconi, H. Gursky, F.R. Paolini, B.B. Rossi // *Phys. Rev. Let.*. — 1962. — Vol. 9, no. 11. — Pp. 439–443.
18. *Shklovskii I.S.* The Nature of the X-Ray Source Sco X-1. // *Soviet Astronomy*. — 1968. — Vol. 11. — P. 749.
19. Cosmic X-ray Sources / S. Bowyer, E.T. Byram, T.A. Chubb, H. Friedman // *Science*. — 1965. — Vol. 147, no. 3656. — Pp. 394–398.
20. *Лютый В.М., Сюняев Р.А., Черепашук А.М.* Природа оптической переменности HZ Геркулеса = Геркулес X-1 и BD+34°3815 = Лебедь X-1 // *Астрон. журнал*. — 1973. — Т. 50. — С. 3–11.
21. *Bolton C.T.* Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868 // *Nature*. — 1972. — Vol. 235, no. 5336. — Pp. 271–273.

22. *Brucato R., Kristian J.* Spectroscopic Observations of the Optical Candidate for Cygnus X-1 // *Astrophys. J. Let.* — 1973. — Vol. 179. — P. L129.
23. *Лютый В.М., Сюняев Р.А., Черепашчук А.М.* Природа оптической переменности HZ Геркулеса = Геркулес X-1 и V1357 Лебеда = Лебедь X-1. II // *Астрон. журнал.* — 1974. — Т. 51. — С. 1150–1161.
24. *Krawczynski H., Beheshtipour B.* New Constraints on the Spin of the Black Hole Cygnus X-1 and the Physical Properties of its Accretion Disk Corona // *Astrophys. J.* — 2022. — Vol. 934, no. 1. — P. 4.
25. On the Nature of the Optical Variations of HZ Her = Her X1 / *A.M. Cherepashchuk, Yu.N. Efremov, N.E. Kurochkin et al.* // *Information Bulletin on Variable Stars.* — 1972. — Vol. 720. — P. 1.
26. *Bahcall J.N., Bahcall N.A.* The period and light curve of HZ Herculis // *Astrophys. J.* — 1972. — Vol. 178. — Pp. L1–L4.
27. *Попов С.Б., Прохоров М.Е.* Популяционный синтез в астрофизике // *Успехи физических наук.* — 2007. — Т. 117. — С. 1179–1206.
28. *Корнилов В.Г., Липунов В.М.* Нейтронные звезды в массивных двойных системах. I. Классификация и эволюция // *Астрон. журнал.* — 1983. — Т. 60. — С. 284–292.
29. *Корнилов В.Г., Липунов В.М.* Нейтронные звезды в массивных двойных системах. II. Численное моделирование // *Астрон. журнал.* — 1983. — Т. 60. — С. 574–583.
30. *Липунов В.М.* Астрофизика нейтронных звезд. — М. : Наука, 1987.
31. Описание «Машины сценариев» / *В.М. Липунов, К.А. Постнов, М.Е. Прохоров, А.И. Богомазов* // *Астрон. журнал.* — 2009. — Т. 86, № 10. — С. 985–1013.
32. *Khaliullin Kh.F.* Mass loss by Wolf-Rayet stars // *Soviet Astronomy.* — 1974. — Vol. 18. — P. 229.
33. Polarization Variability among Wolf-Rayet Stars. III. A New Way to Derive Mass-Loss Rates for Wolf-Rayet Stars in Binary Systems / *N. St.-Louis, A.F.J. Moffat, L. Drissen et al.* // *Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 330. — Pp. 286–304.
34. *Prinja R.K., Barlow M.J., Howarth I.D.* Terminal Velocities for a Large Sample of O Stars, B Supergiants, and Wolf-Rayet Stars // *Astrophys. J.* — 1990. — Vol. 361. — P. 607.
35. *Howarth I.D., Schmutz W.* Near-infrared spectroscopy of galactic Wolf-Rayet stars. // *Astron. Astrophys.* — 1992. — Vol. 261. — Pp. 503–522.