

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Шапошникова Ивана Андреевича**  
**на тему «Спектральные исследования звезд Вольфа-Райе в**  
**двойных системах типа WR+OB как эволюционных предшественников**  
**релятивистских объектов»**  
**по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Диссертация Шапошникова И.А. посвящена спектроскопическим исследованиям звезд типа Вольфа-Райе (WR) в составе двойных систем типа WR+OB. Основное внимание в данной работе уделено эволюционным аспектам — потере массы на стадии WR и взаимосвязи звезд WR с черными дырами в двойных звездных системах.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, благодарностей и списка литературы, а также из приложений.

В **Главе 1** приводится описание аппаратуры, использованной для получения новых наблюдательных данных — 2.5-метрового телескопа КГО ГАИШ МГУ и установленного на нем оптического спектрографа низкого разрешения TDS, дается характеристика наблюдательной программы и полученных в ходе ее реализации результатов. Для пяти короткопериодических двойных систем типа WR+OB, детально исследуемых в следующей главе, описывается методика измерения лучевых скоростей звезд и приводятся результаты решения кривых лучевых скоростей, а также уточненные оценки масс звезд. Подробные наблюдательные данные (журналы спектральных наблюдений, спектрограммы с отождествленными деталями и кривые лучевых скоростей) вынесены в отдельные приложения.

**Глава 2** посвящена спектроскопическому поиску эволюционных изменений орбитальных периодов пяти короткопериодических двойных систем типа WR+OB. Медленное увеличение орбитального периода двойной WR+OB связано с уносом массы и углового момента из системы в виде мощного ветра звезды WR, поэтому оценка темпа изменения периода позволяет оценить темп потери массы звезды WR наиболее надежным (динамическим) образом. Исторически для этих целей использовались невязки между наблюдаемыми моментами минимума блеска затменных систем и рассчитанными по некоторым принятым эфемеридам теоретическими моментами (метод «O-C»). Автор же применил для этой цели архивные кривые лучевых скоростей, полученных по измерениям положений эмиссионных линий звезды WR для ионов с высокими потенциалами ионизации (N V, N IV), что позволяет исследовать стабильность орбитальных параметров для двойных систем без затмений. На примере трех хорошо изученных затменных систем автор продемонстрировал хорошее согласие результатов оценки темпа изменения орбитального периода, полученных по кривым блеска и по кривым лучевых скоростей, а затем применил предложенный в работе «спектральный» метод «O-C» для поиска эволюции орбитального периода для двух спектроскопических двойных типа WR+OB, у которых удалось открыть увеличение орбитального периода.

В **Главе 3** описывается поиск эффектов ориентации в звездном ветре WR путем исследования корреляции между ширинами эмиссионных линий в спектре двойных систем типа WR+OB и углов наклона орбит этих систем. Отдельный раздел главы посвящен методам оценки угла наклона орбит в двойных системах типа WR+OB, сравнению полученных разными методами оценок и выбору наиболее удачной. Также автор рассматривает зависимость ширин спектральных линий от спектральных классов компонент системы, учет которой требуется для выделения возможности зависимости от

наклонения орбиты. Проведенный анализ не выявил значимой корреляции, что, по мнению автора, свидетельствует о высокой степени изотропии звездного ветра WR.

**Глава 4** посвящена вычислению темпов потери массы звездами WR в двойных системах типа WR+OB по наблюдаемому темпу эволюционного изменения орбитального периода. Теоретическое описание орбитальной эволюции тесной двойной системы путем классической медленной моды и моды Джинса дополнено учетом конечных размеров звезд-источников ветра, что оказывается критически важным для расчета уносимого ветром углового момента для наиболее тесных систем. Для четырех из пяти детально исследованных в представленной работе систем, для которых было обнаружено вековое увеличение орбитального периода, автором были даны оценки темпов потери массы звездами WR, что позволило оценить зависимость темпа потери массы звездами WR от массы WR. Данная зависимость оказалась близка степенной с показателем около 1.7.

В **Главе 5** автором исследована эмпирическая корреляция между массами звезд WR в двойных системах типа WR+OB и массами черных дыр в двойных звездных системах. С использованием зависимости темпа потери массы звезды WR от ее массы и данных о массах в примерно 30 двойных системах типа WR+OB, было оценено распределение конечных масс звезд WR. Затем, на основе оценок масс примерно 50 черных дыр в двойных звездных системах, было построено наблюдательное распределение масс черных дыр. Оказалось, что оба распределения хорошо аппроксимируются логнормальным распределением, а преобразование от распределения конечных масс звезд WR к распределению масс черных дыр имеет вид, очень близкий к теоретической зависимости массы СО-ядра гелиевой звезды от ее полной массы, что, по мнению автора, подтверждает эволюционную связь между черными дырами и СО-ядрами массивных звезд WR.

У меня есть два связанных друг с другом **замечания** по поводу теоретического описания эволюции двойной системы, рассмотренной в Главе 4:

1) Во-первых, представляется, что описание потери и обмена массы в двойной носит чересчур идеализированный характер, особенно для тесных систем. Для таких систем необходимо учитывать моменты вращения звезд и их эволюцию в уравнении баланса полного углового момента, возможность аккреции газа, выброшенного ветром одного компонента на другой и/или взаимодействия ветров, и т. д. Для достаточно полного описания подобных эффектов, влияющих на эволюцию большой полуоси в системах с потерей и обменом массы см. например формулы (15-22), обсуждение и ссылки в недавнем обзоре L. Siess, *New Astronomy Reviews*, 2026, 102, id.101748. По моему мнению, необходим последовательный анализ этих эффектов для систем, рассмотренных диссертантом.

2) Во-вторых, диссертант полностью пренебрегает приливными взаимодействиями, считая компоненты двойной системы синхронизованными, а орбиту — круговой. Мне кажется, что это предположение нуждается в дополнительном обосновании, так как сама эволюция большой полуоси, а также торможение вращения звезд за счет оттекающего ветра, могут привести к потере синхронизации вращения звезд с орбитальным движением. Мне не удалось найти ссылки, в которых этот эффект обсуждается в системах, содержащих звезды, рассматриваемые диссертантом (WR+OB), но качественно похожие эффекты обсуждались, например, в работе H. F. Song и др., *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 609, id.A3, в которой была рассмотрена тесная двойная система, содержащая OB звезду с достаточно большим магнитным полем. В этой статье, в предположении о том, что приливы могут быть описаны в рамках известной

теории Зана, показано, что частота собственного вращения звезды может достаточно существенно отличаться от орбитальной, см. рис. 3.

Неучет эффектов, указанных в пунктах 1-2 может привести к систематическим погрешностям при оценке потери массы звезды по эволюции орбитального периода.

Также отмечу, что хотя текст написан весьма ясным языком и содержит совсем небольшое количество опечаток и грамматических неточностей, они, тем не менее, встречаются. Например, в таблице 14 имеется опечатка в значении темпа изменения орбитального периода системы CQ Сер, на стр. 88 присутствуют «изогнутые» скобки вместо фигурных, на следующей странице читаем « а третье выражает поправку за радиусы звезд».

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования, основные замечания скорее носят характер рекомендаций к дальнейшей научной деятельности диссертанта. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Шапошников Иван Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

**Официальный оппонент:**

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник отдела теоретической астрофизики Астрокосмического центра Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук»

**ИВАНОВ Павел Борисович**

**01 июня 2026 года**

**Контактные данные:**

тел.: +7 (495) 333-33-66, e-mail: ivanovpb@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.02 — Астрофизика и радиоастрономия

**Адрес места работы:**

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53,

Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, астрокосмический центр, отдел теоретической астрофизики

Тел.: +7 (495) 333-33-66, e-mail: office@lebedev.ru

Подпись П. Б. Иванова заверяю: