

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 исследованиям некоторых аспектов поздней эволюции массивных звезд на основе оптической спектроскопии двойных систем, включающих звезду Вольфа-Райе (WR) и звезду спектральных классов OB, а также сравнению распределений масс звезд WR и известных черных дыр звездных масс. **Актуальность** темы диссертации обусловлена тем, что WR играют ключевую роль в эволюции массивных звезд: они выступают предшественниками сверхновых типов Ib/Ic и могут приводить к образованию черных дыр.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений. В **Главе 1** описана аппаратура (2.5-м телескоп КГО ГАИШ МГ и спектрограф TDS), на которой получены наблюдательные данные, методика измерения лучевых скоростей и приведены уточненные массы для пяти короткопериодических систем типа WR+OB. **Глава 2** описывает спектральную модификацию метода «О-С» поиска эволюционных изменений орбитального периода, проверка которой проведена на затменных

системах. Новый метод был применен к двум спектроскопическим двойным, затмения в которых не наблюдаются. **Глава 3** посвящена поиску корреляции между шириной эмиссионных линий в спектрах WR в системах WR+OB и наклоном орбит — значимой связи не найдено, на основе чего делается вывод об изотропии звездного ветра WR. В **Главе 4** представлена методика расчета и определены темпы потери массы звездами WR по наблюдаемому увеличению периода (для четырех систем) с учетом конечных размеров звезд, получена степенная зависимость темпа от массы WR с показателем ~ 1.7 . В **Главе 5** исследуется эмпирическая зависимость между массами звезд Вольфа-Райе с учетом потерь вещества к концу стадии WR и массами черных дыр: в ней показано, что распределения конечных масс WR (по ~ 30 системам) и масс черных дыр (по ~ 50 системам) близки к логнормальным, а переход от массы WR к массе черной дыры согласуется с теоретической формулой для массы СО-ядра, что можно рассматривать как указание на их эволюционную связь.

Достоверность результатов базируется на применении хорошо зарекомендовавших себя методов обработки и анализа наблюдательных данных и проведенной проверке предложенной автором модификации метода (O-C), а также согласии полученных значений параметров с оценками других авторов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- Получены новые наблюдательные данные для ряда систем WR+OB, на основе которых построены кривые лучевых скоростей и выполнена переоценка масс звезд, входящих в состав исследуемых двойных систем.

- Предложен оригинальный метод определения вековых изменений орбитальных периодов двойных систем на основе анализа кривых лучевых скоростей.
- В двух системах WR+OB обнаружены вековые вариации орбитальных периодов.
- На основе анализа данных по ~ 30 двойным системам WR+OB подтверждено отсутствие корреляции между доплеровскими ширинами профилей эмиссионных линий звезд WR и углом наклона плоскости орбиты двойной системы.
- Получены оценки темпов потери массы для четырех звезд WR, на основании которых для звезд данного типа предложена эмпирическая зависимость скорости потери вещества от массы звезд.
- Выведена эмпирическая связь между конечными массами звезд WR и массами черных дыр.

Хотелось бы отметить высокий уровень представленной диссертации, оригинальность ряда использованных в работе методов и подходов. Основные результаты опубликованы в шести статьях, опубликованных в ведущих российских и зарубежных журналах, и неоднократно представлялись на научных конференциях разного уровня. Во всех выносимых на защиту результатах личный вклад автора диссертационной работы является значимым, либо определяющим.

Имеются следующие основные замечания к диссертационной работе.

В Главе 1 детально описываются инструменты и наблюдательная программа, в ходе которой получены спектральные данные, послужившие основой диссертационного исследования. Однако, в тексте отсутствует информация о фактическом размере звездных изображений во время наблюдений: указывается лишь медианное качество изображений, полученное во время астроклиматических исследований 2007-2015 годов. Поскольку в редких случаях удастся выставить звезду точно на щель, размер звездных изображений важен для оценки неравномерности засветки щели спектрографа, которая может приводить к существенным систематическим ошибкам в измерениях лучевых скоростей. В этой связи также возникает вопрос, предпринимались ли какие-то действия по учету этого эффекта на этапе обработки и анализа данных?

Ни в таблице 1, где приводятся уточненные массы звезд в исследуемых системах, ни далее по тексту не встретил информации о принятых в работе расстояниях до объектов, точности их значений и учитывались ли эти неопределенности в ошибках измеряемых параметров.

В ряде важных случаев при описании проблематики и результатов наблюдений автор приводит ссылки на классические работы 1980-1990 годов, но не представляет более свежие данные и расчеты. Так, в самом начале Главы 3 (стр. 59) говорится, что стандартная теория ускорения ветров горячих массивных звезд не объясняет большие темпы потери массы в ветрах WR со ссылкой на работу Lamers & Cassinelli 1999. За последние два десятилетия наметился значительный прогресс в понимании формирования ветров подобных звезд, и хотелось бы видеть в тексте упоминание результатов моделирования различных групп (например, Gräfener et al. 2017,

A&A, 608, id.A34; обзор Sander 2024, Proceedings of the IAU, 361 и ссылки в нем). В отличие от О-звезд, в оптически толстых атмосферах WR излучение звезды многократно рассеивается в ветре, что увеличивает эффективность ускорения ветра.

Утверждение на стр. 61 (Глава 3), что «эффекты быстрого вращения ядер звезд WN должны сильнее всего сказываться на профилях эмиссии N V, поскольку область формирования линий этого иона лежит ближе всего к ядру WN» выглядит достаточно спорным. С учетом высокой плотности и большой протяженности зоны ускорения ветра WR, области формирования наблюдаемых в спектрах звезд эмиссий будут располагаться на значительно больших расстояниях, чем гидростатический радиус звезды, а следовательно, возникает вопрос, насколько эффективны измерения ширины этих линий для оценки скорости вращения звезд?

По поводу зависимости темпа потери массы от массы, представленной на рисунке 4.2 Главы 4. Во-первых, для оценки, насколько выше или ниже полученного автором соотношения лежат значения dM/dt , полученные иными методами, хорошо бы показать на графике доверительный интервал. Во-вторых, различия в наклоне зависимости « $M - dM/dt$ » могут оказаться связаны с различиями в подтипах звезд Вольфа-Райе, для которых эти измерения проведены (см, например, Namann et al. 2006, A&A, 457, 1015-1031).

Очень большую неопределенность в оценки финальных масс звезд вносит принятая продолжительность стадии Вольфа-Райе. Обсуждению этой проблемы выделено всего около одной страницы текста подраздела 5.2.1

Главы 5, причем в итоге было принято решение считать, что звезды подтипа WN находятся в самом начале стадии WR, а WC/WO – в середине. Вместо фиксации возраста звезд уместно было бы рассмотреть несколько вариантов и проверить, как это сказывается на результирующем распределении звезд WR по массам перед коллапсом.

Из более мелких замечаний стоит отметить на мой взгляд не очень удачное оформление детализированного описания проблематики перед главами 2-5 в виде «Целей и постановки задачи» при наличии соответствующего раздела во Введении к диссертации, а также наличие в тексте диссертации опечаток. Количество последних невелико, однако, заметна тенденция к увеличению их числа к последним главам, особенно это касается пропусков и повторов слов. На стр 61 диссертации имеется более грубая описка, которая, полагаю, допущена по невнимательности: «Определенную трудность здесь представляет наличие у звезд WR протяженной оптически **тонкой** атмосферы».

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. 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:

кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией физики звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории физики звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

ВИНОКУРОВ Александр Сергеевич

01 июня 2026 года

Контактные данные:

тел.: +7-(878)-229-33-19 , e-mail: vinokurov@sao.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена

диссертация: 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

Адрес места работы:

369167, Карачаево-Черкесская республика, Зеленчукский район, п. Нижний Архыз, САО РАН, лаборатория физики звезд

Тел.: +7(878) 784-63-36; e-mail: admsao@sao.ru

Подпись А. С. Винокурова заверяю:

Ученый секретарь Специальной астрофизической обсерватории РАН

к.ф.-м.н.

Е. И. Кайсина