

**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**

Диссертационная работа И.А. Шапошникова посвящена звездам Вольфа-Райе (WR). Тема диссертации интересна и **актуальна** в связи с тем, что звезды WR представляют собой важное звено в цепи эволюционных трансформаций массивных звезд, являются предшественниками SN Ib/Ic, могут порождать черные дыры. Важной характеристикой звезд WR является мощный звездный ветер, который влияет на параметры двойных систем и до известной степени определяет массы предсверхновых. Соискатель исследует массы звезд WR, потерю ими вещества звездами, связь звезд WR с черными дырами. Неотъемлемой частью работы являются наблюдения, проведенные диссертантом, на материале которых основана значительная часть исследований, проведенных в работе и которые могут использоваться в дальнейшем.

Диссертация И.А. Шапошникова состоит из Введения, пяти глав, Заключение и имеет два приложения. Объем работы – 155 стр., включая 29 рисунков, 37 таблиц, список литературы из 265 наименований.

В Введении тематика диссертации вписана в исторический контекст, обоснованы актуальность исследования, научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы.

В главе 1 описаны методика и результаты спектроскопических наблюдений двойных систем с компонентами-звездами Вольфа-Райе (WR+OB) CQ Cep, CX Cep, V444 Cyg, Hen 3-1772 и V2183 Cyg,

проведенных диссертантом на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории (КГО) ГАИШ МГУ. Кроме того, автор провел фотометрические наблюдения CQ Сер, CX Сер и V444 Cyg в фильтрах BVRI на 60-см роботизированном телескопе КГО. В результате были дополнены многолетние ряды наблюдений этих звезд. Получены оценки масс компонентов упомянутых систем.

В Главе 2 приведен детальный обзор имеющихся в литературе наблюдательных данных, относящихся к исследованным двойным системам. Предложен метод оценки периодов по кривым лучевых скоростей «(O-C)», надежность и достоверность которого проверена по системам с хорошо известными периодами. Найдены изменения орбитальных периодов пяти систем WR+OB. Стоит отметить, что у систем Hen 3-1772 и V2183 Cyg, орбитальные периоды которых существенно больше чем у остальных систем и для которых нет оценок изменений периодов по фотометрии, производные  $dP/dt$  в несколько раз, а то и на 1-2 порядка величины превосходят  $dP/dt$  для остальных систем. От других систем Hen 3-1772 и V2183 Cyg отличаются только несколько большей массой звезды WR. Интересным результатом является найденное диссертантом уменьшение орбитального периода CQ Сер, нетипичное для остальных хорошо исследованных систем WR+OB.

В Главе 3 диссертант исследовал крупномасштабную структуру ветра звезд WR, с привлечением данных о 30 звездах. Целью исследования была проверка гипотезы о том, что большая скорость потери вещества этими звездами может быть связана с их вращением, что должно приводить, в частности, к анизотропии ветра. Диссертантом для ряда звезд, доступных на северном небе, были проведены спектроскопические наблюдения на 2.5-метровом телескопе КГО. Детальный анализ возможной корреляции величин FWHM с углами наклона плоскостей орбит для звезд WR различных

подклассов такую корреляцию не выявил, что позволяет утверждать что крупномасштабная анизотропия звездного ветра отсутствует.

В Главе 4 диссертант оценивает скорости потери массы звездами WR в системах, для которых им оценена скорость изменения периода. Предложено важное уравнение (4.19), которое позволяет учитывать конечные радиусы компонентов при оценке скорости изменения массы системы. Детально проанализирован случай CQ Сер и показано, что  $dP/dt < 0$  может быть объяснена, если часть вещества, потерянного звездой класса O, перетекает на спутник, компенсируя потерю массы и момента импульса системой в целом. Конечно, подтверждение такой гипотезы требует построения газодинамической модели движения вещества в системе, что, пока неосуществимо. Интересно, что найдены ограничения на отношения масс компонентов при которых возможно уменьшение периодов при учете конечных размеров O-звезды. Предложена эмпирическая формула для зависимости скорости потери вещества от массы звезд WR. Оценки темпа потери массы исследованными системами (рис. 4.2). сравниваются с оценками, доступными в литературе. Стоит обратить внимание на то, что оценки  $dM/dt$  хорошо согласуются с «законом» Нугиса-Ламерса для звезд с  $\lg(M/M_{\odot}) \leq 1.2$ , но ниже для наиболее массивной из исследованных звезд с массой около 25 солнечных. Важно, что оценки  $dM/dt$  не являются модельно-зависимыми и не зависят от плохо известного фактора клочковатости звездного ветра.

В Главе 5 рассмотрена связь между массами звезд WR и массами черных дыр, главным образом, в рентгеновских системах большой и малой массы. Массы звезд WR были экстраполированы к конечным массам звезд перед предполагаемым коллапсом их ядер с использованием зависимости темпа потери массы от массы звезды, найденной в работе. Показано, что распределения звезд WR по массам в конце эволюции и черных дыр по

массам имеют одинаковую функциональную форму (распределены по логнормальному закону). Это позволило получить соотношение между предполагаемыми массами черных дыр и массами СО-ядер звезд WR с массами большими примерно  $6M_{\odot}$  на стадии предколлапса в виде простого степенного закона, который сходен с зависимостью, полученной в детальных расчетах строения звезд.

В Заключении просуммированы результаты работы и очерчены перспективы использования полученных результатов и развитых в диссертации методов.

**Научная новизна** исследования определяется следующим. Выполнены новые наблюдения ряда звезд, построены кривые лучевых скоростей, заново оценены их массы. Предложен новый метод оценки изменений периодов двойных систем по кривым лучевых скоростей. Открыты вековые изменения периодов двух систем с звездами WR. С использованием данных о 30 системах WR+OB показано, что звездный ветер изотропен, следовательно, вращение не играет значительной роли в генерации ветра звезд. Оценены скорости потери массы пятью звездами WR и на этой основе предложен эмпирический закон потери ими вещества в зависимости от массы. Найдены распределения звезд WR и черных дыр в рентгеновских источниках по массам, соотношения между массами черных дыр, которые могут сформироваться в результате коллапса ядер звезд WR и массами СО-ядер звезд перед коллапсом.

**Практическая значимость** результатов диссертанта определяется возможностью использования полученного наблюдательного материала дальнейших исследованиях и применимостью развитого им метода оценки значений «О-С» по кривым лучевых скоростей к другим звездам. Оценки скорости потери массы могут быть использованы в качестве репера при

построении моделей атмосфер. Соотношения, описывающие связь  $dM(WR)/dt$  от  $M(WR)$  и  $M(BH)$  от  $M(CO)$ , могут использоваться в популяционном синтезе. Важно, что это модельно-независимые результаты.

**Достоверность и надежность** результатов определяется хорошим совпадением найденных новым методом «(O-C)» изменений орбитальных периодов звезд с ранее определенными для хорошо изученных звезд.

**Результаты апробированы** в докладах на 10 всероссийских и международных конференциях.

По теме диссертации **опубликованы** 5 статей в рецензируемых российских и международных журналах, рекомендованных ВАК для публикации диссертационных работ. Одна статья сольная, в трех диссертант является первым автором.

**Автореферат соответствует** содержанию диссертации. Выводы по диссертации соответствуют выводам опубликованным в автореферате.

Имеются следующие замечания.

Замечание редакционного характера. Разбиение содержания глав 1 и 2 представляется не оптимальным, т.к. гл. 2 содержит обзор литературы по исследуемым системам. Было бы логичным вначале обсудить наблюдательные данные, имеющие отношение к тематике работы, а затем использовать эти данные.

В гл. 1 приведены новые определения масс компонентов в пяти системах с звездами WR. К сожалению, не проведено сравнение с литературными данными, которое позволило бы понять значимость уточнений. Отметим, что для CQ Сер и CX Сер оценки существенно ниже, чем приводимые в литературе.

В гл. 2 утверждается, что «Для кривых лучевых скоростей использование только приведенных в литературе средних эпох также может приводить к ошибкам. Поэтому для корректного построения диаграммы «О-С» разумно уточнить эти эпохи непосредственно по наблюдательным данным с помощью метода Герцшпрунга [127].» Насколько можно понять, автор в некоторых случаях заново интерпретировал оригинальные наблюдения и определил эпохи минимумов, отличные от найденных авторами наблюдений. Насколько корректна такая методика по отношению к оригинальным исследованиям?

Для V444 Cyg согласие с более поздними результатами определения  $dP/dt$  Антохиным (2025) неудивительно, т. к. Антохин использовал те же данные, включая точки Шапошникова и др.

В формулах (3.1) – (3.7) есть не поясненные величины.

В 4.2.1. упоминается, что «для наиболее тесных систем возможен также перенос массы между компонентами, приводящий к орбитальной эволюции в медленной моде». Системы с звездой О, заполняющей полость Роша неизвестны. Но, конечно, в детальной газодинамической модели движения вещества в WR+O системах может оказаться, что при определенных условиях аккректор действительно способен захватить часть вещества, потерянного О-звездой. То, что диссертант называет «медленной модой» – это попросту консервативный обмен веществом без изменения полной массы и момента импульса системы. От ф-лы (4.7) к ф-ле (4.12) можно перейти прямо, без промежуточных преобразований. В выражении (4.19) потеряна правая фигурная скобка. Упражнения с исключением отдельных параметров из ур. (4.19) в разделе 4.2.3 корректны, но представляются излишними. В Табл. 22 представление масс и скоростей потери вещества в логарифмах в дополнение к абсолютным величинам, безусловно, лишние. Не недостаток, но пожелание – сравнить полученные оценки скорости потери массы не только с «законом» Нугиса-Ламерса (рис. 4.2), но и с другими «законами», например, Финка (2017), Ёона (2017), которые часто используются в

расчетах эволюции звезд и связывают  $dM/dt$  с эффективной температурой и обилием гелия на поверхности звезд.

Найденное в Гл. 5 соотношение между массами звезд перед коллапсом и массами черных дыр безусловно является упрощением. Масса ядра – не единственный критерий, определяющий исход коллапса. Существует т.н. «способность взрываться» (explodability). По крайней мере согласно существующим одномерным моделям, нет простого порога по массе, разделяющего Сверхновые и коллапс с образованием черных дыр (см. , напр., Ertl et al. 2016, ApJ, 818, 124; Luo et al. 2026, A&A, 707, A390) Масса ядра и способность взрываться – не монотонные функции исходной массы звезд. Справедливости ради стоит отметить, что диссертант и его соавторы это вскользь отмечают. Тем не менее, предложенная функция вполне может использоваться для оценок и/или популяционного синтеза.

В автореферате не вполне корректно противопоставление моделей звезд и сценариев эволюции. Сценарии связывают между собой модели тесных двойных систем на различных стадиях эволюции. Совокупность LMXB - не обязательно только объекты с оптическими компонентами-звездами спектральных классов M/K. Например, в Cyg X-2 оптическая звезда F/G-субгигант. В тот же класс попадают UCXB. Отсутствие наблюдаемых O-звезд с маломассивными спутниками – очевидный эффект селекции (см. Мое, М. & Di Stefano, R. 2017, ApJS, 230, 2, 15).

Хотелось бы заметить следующее. В Введении справедливо отмечено, что основы численного популяционного синтеза были заложены В.Г. Корниловым и В.М. Липуновым (1983) на основе сценарного подхода к описанию эволюции звезд, предложенного Э ван ден Хёвелом и др. и Тутуковым и Юнгельсоном в начале 1970г.г. Результаты расчетов по первым программы популяционного синтеза с розыгрышем  $\sim 1e5$  систем были

опубликованы практически одновременно Липуновым и др. (1987) и Dewey & Cordes (1987). На сегодняшний день существует порядка дюжины мощных программ популяционного синтеза, базирующихся на аналитических аппроксимациях эволюционных треков. Но они начинают уступать место более точным программам, основанным на интерполяции в сетках из десятков тысяч заранее рассчитанных треков, напр., POSYDON (Fragos et al. 2023, ApJ, 264, 45).

В диссертации есть опечатки, пропущенные и повторяющиеся слова. Использован жаргон, например, «угловой момент» это момент импульса. Использованы то «компонента», то «компонент». Корректно последнее.

Приведенные выше 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. Полученные результаты представляют значительный практический интерес и могут быть востребованы в астрономических учреждениях России (ГАИШ, ИНАСАН, УрГУ, СПбГУ, САО), а также международным астрономическим сообществом.

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, ведущий научный сотрудник отдела физики и эволюции звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт астрономии Российской академии наук

**ЮНГЕЛЬСОН Лев Рафаилович**

**01 июня 2026 года**

Контактные данные:

тел.: +7-(495)-951-27-35 , e-mail: lry@inasan.ru

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

Адрес места работы:

119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48

ИНАСАН, отдел физики и эволюции звезд

Тел.: + 7 (495) 951-54-61; e-mail: admin@inasan.ru

Подпись Л. Р. Юнгельсона заверяю:

Ученый секретарь Института астрономии РАН

к.ф.-м.н.

М. С. Мурга