

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Антохина Игоря Ивановича на тему**  
**«Горячие массивные звезды в двойных системах»**  
**по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Горячие массивные звезды спектральных классов O-B, WR являются представителями молодых звездных населений галактик и во многом определяют процессы химического обогащения межзвездной среды в галактиках, через их мощные звездные ветра, а также на более поздних стадиях вспышек Сверхновых. В то же время, определение и анализ фундаментальных параметров массивных O-B, WR звезд как раз и осложняется наличием истекающих от них мощных ветров. Особенно сложным анализ становится в массивных двойных системах, в которых наблюдаются эффекты столкновений звездных ветров компонент, приводящие к образованию ударных волн, сопровождаемых ультрафиолетовым и рентгеновским излучением. С точки зрения астрономических наблюдений весь этот комплекс астрофизических процессов в системах с ветрами порождает невероятно большое разнообразие наблюдаемых проявлений в различных диапазонах электромагнитного излучения – от рентгена до радио, для описания которых требуется разработка новых и развитие существующих аналитических и численных методов и методик. В связи с указанным, задачи, решаемые в диссертации, являются **чрезвычайно актуальными**. Диссертация Антохина И.И. представляет из себя широкомасштабное исследование представительной группы массивных O-B, WR-звезд, в котором, с одной стороны, использованы наиболее точные современные астрономические наблюдения

в различных областях спектра, полученные, в том числе, при непосредственном участии диссертанта, а с другой стороны, в работе развиты на новом уровне методы решения кривых блеска двойных систем, и применены современные методики анализа спектров излучения сложных астрофизических систем. Эти обстоятельства во многом обусловили **новизну** полученных в диссертации результатов.

Диссертационная работа Антохина И.И. 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 библиографические ссылки.

Во **Введении** показана актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, а также перечислены положения, выносимые на защиту. Обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Дана информация о методологии и методах исследования, степени достоверности и апробации результатов.

В **Главе 1** диссертантом представлены разработанные им методы решения кривых блеска двойных систем, состоящих из звездных компонент  $WR+O$ .

Вначале описан непараметрический метод, основанный на идеях академика А.Н. Тихонова, в частности, описан метод решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода, к которому сводится уравнение, в наиболее общем виде описывающее затмение в двойной звездной системе. Решением уравнения является эмпирическое распределение непрозрачности и яркости по диску компоненты  $WR$ , при котором не используются явные параметрические выражения для этих распределений. Дополнительно представлен метод решения интегрального уравнения Абеля, которое связывает не-

прозрачность ветра компонента WR на расстоянии  $s$  от звезды, найденную из решения уравнения Фредгольма, и линейный коэффициент поглощения  $\alpha(r)$  на расстоянии  $r$  от звезды.

В отдельном разделе Главы 1 представлен метод решения уравнений, описывающих кривые блеска систем WR+O в рамках параметрической модели, в которой скорость ветра как функция расстояния от звезды задается параметрически, при этом предполагается, что компоненты имеют сферическую форму. Этот метод реализован в виде **авторского программного кода**. Кроме того, представлен параметрический метод решения кривых блеска для тесных двойных систем WR+O с приливно-деформированными компонентами. Показано, что 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.

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. Важным и **новым** результатом, полученным диссертантом, является то, что учет поглощения излучения спутника в ветре компоненты WR существенно влияет на определяемые параметры системы. Принципиально важным для дальнейших исследований массивных горячих звезд является вывод диссертанта о том, что общепринятый глобальный закон изменения скорости ветра, “beta-закон”, может быть не оптимален для звезд WR.

Результаты, полученные диссертантом в Главах 1 и 2 по моделированию кривых блеска двойных систем являются **новыми** и исключительно **оригинальными**. Их **достоверность** подтверждается соответствием расчетных кривых блеска высокоточным экспериментальным данным.

В **Главе 3** для представительной группы одиночных и двойных звезд ранних спектральных классов, а также нескольких десятков таких звезд в ассоциации Carina OB1, представлены результаты исследования их наблюдательных оптических и рентгеновских характеристик. **Новым и значимым** результатом исследования является вывод диссертанта о том, что в среднем, рентгеновские характеристики **не сильно отличаются** у одиночных и двойных звезд. Кроме того, им установлено, что (вопреки первоначальным теоретическим ожиданиям по моделированию столкновений ветров) некоторые двойные системы не показывают повышенной рентгеновской светимости и жестких рентгеновских спектров. А с другой стороны, показано, что некоторые звезды без признаков двойственности обладают жесткими спектрами.

В **Главе 4** диссертантом представлена **оригинальная** стационарная модель столкновения ветров в двойных системах с горячими массивными компонентами, в радиативном приближении. В рамках этой модели Антохиным И.И. реализован компромисс между нестационарными гидродинамическими моделями, сталкивающимися со значительными сложностями в моделировании радиативных ударных волн, и простыми моделями тепловой плазмы, использующимися в широко известной программе XSPEC. Диссертантом рассчитаны теоретические спектры и кривые блеска тестовых моделей двойных систем, которые позволяют показать влияние их параметров на теоретические спектры и кривые блеска. В качестве примера получения **достоверных** астрофизических результатов, представлены результаты использования модели, **разработанной диссертантом**, для анализа рентгеновских спектров двойной системы HD 159176, полученных на телескопе XMM-Newton.

Завершающая **Глава 5** посвящена исследованию уникальной двойной системы Cyg X-3, состоящей из звезды WN4-8 и релятивистского объекта. Приведены результаты исследования эволюции орбитального периода систе-

мы и ее природы, а также результаты исследования средних рентгеновских и инфракрасных кривых блеска системы Cyg X-3.

Большой объем по рентгеновским кривым блеска были извлечен диссертантом из архивов спутников RXTE и MAXI и однородным образом проанализирован. Важно отметить, что **оригинальные** ИК наблюдения в фильтрах JHK были получены на 2.5 м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. На основе совместного анализа рентгеновских и инфракрасных наблюдений Антохиным И.И. построена **новая** модель системы.

**Новым** результатом по системе Cyg X-3 является вывод диссертанта о наличии в ветре WR сложных структур и наличии в системе точечного инфракрасного источника.

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

В целом диссертационная работа Антохина И.И. представляет собой **масштабное фундаментальное исследование** с многочисленными методическими разработками автора и реализованными программными кодами.

Работа написана очень ясным и грамотным языком, позволяющим понять все детали проделанного автором многолетнего исследования.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается их опубликованием в 35 статьях, в том числе, в 19 статьях в ведущих российских и международных журналах с высокими индексами цитирования и экспертизы научных результатов статей. Аппробация диссертационной работы была выполнена представлением результатов на десятках

международных и российских конференциях, о чем свидетельствуют 16 публикаций автора в Трудах этих конференций.

Результаты научных исследований и практических разработок автора диссертации могут использоваться во многих астрономических организациях, как российских - САО РАН, КраО РАН, ИНАСАН, ИКИ РАН, ГАО РАН, ГАИШ МГУ, КФУ, СпГУ и др., так и зарубежных.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Содержание диссертации соответствует специальности **1.3.1. Физика космоса, астрономия**, а именно следующим ее направлениям – тесные двойные системы, физика звездных атмосфер, рентгеновские, оптические и инфракрасные наблюдения.

В работе имеются **недостатки**, к числу которых можно отнести следующие:

1. В Главе 2, на рис. 2.4 и 2.5 стр. 78, 79, и на рис. 2.16, стр. 91, показаны рассчитанные диссертантом теоретические кривые блеска в сравнении с наблюдениями, для звезды V444 Cyg в узкополосном фильтре 4244 А. При отличном согласии расчетов с наблюдениями для фаз затмения, видны отклонения наблюдаемых величин от расчетных для промежуточных фаз на углах Theta в диапазоне 70 -100 градусов. Из текста диссертации не ясно, чем могут быть обусловлены эти наблюдаемые отклонения от расчетных кривых блеска?
2. В Главе 2 в разделе 2.3 приводятся результаты анализа кривой блеска для звезды WR22, полученные на системе космических наноспутников BRITTE по наблюдениям в красном фильтре в широком интервале

длин волн 545 – 695 нм. Оценивалось ли возможное влияние на наблюдаемую фотометрическую кривую блеска переменности интенсивностей в эмиссионных линиях в спектре WR22 ?

3. На стр. 162, по видимому, имеется опечатка – “Принимая **абсолютную** величину  $M_V$  величину всей тройной системы равной 8.82” . Эта величина соответствует видимой **визуальной** звездной величине, а не абсолютной.
4. В диссертационной работе в Главе 2 уточняются параметры кинематики звездного ветра в WR звездах по сравнению с общепринятым beta-законом на основании решения кривых блеска затменных двойных систем. Использовались ли дополнительно наблюдаемые профили спектральных линий в исследуемых звездах для подтверждения полученных в работе выводов о возможных отклонениях от “beta-закона” ?

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, 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 Антохин Игорь Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, академик Академии наук Республики Татарстан, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории астрофотометрии и звездных атмосфер Института физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории астрофотометрии и звездных атмосфер Института физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», профессор кафедры астрономии и космической геодезии Института физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Бикмаев Ильфан Фяритович

06 сентября 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7(843)-292-77-97, e-mail: Ifan.Vikmaev@kpfu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.03.02 — Астрофизика и радиоастрономия

Адрес места работы:

420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18, Казанский (Приволжский) федеральный университет  
Тел.: +7 (843) 233 74 00 ; e-mail: public.mail@kpfu.ru