

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**о диссертации Волкова Игоря Михайловича**  
**на тему «Исследование затменных систем с эллиптическими орбитами»,**  
**представленной на соискание ученой степени**  
**доктора физико-математических наук**

Исследования затменных двойных систем очень важны для астрофизики, поскольку они позволяют определять фундаментальные параметры звезд независимо от расстояния до системы. Современные высокоточные фотометрические и спектральные наблюдения затменных систем в комбинации с эффективными методами интерпретации, основанными на применении мощных компьютеров, позволяют получать астрофизические результаты первостепенного значения. Особый интерес представляют исследования затменных систем с эллиптическими орбитами, в которых можно не только получать надежные значения масс, радиусов и температур звезд, но и исследовать их внутреннюю структуру, что важно для проверки теории звездной эволюции.

В диссертации И. М. Волкова поставлена и реализована обширная программа наблюдательных и теоретических исследований затменных двойных систем звезд с эллиптическими орбитами. Для 61 системы получено около 100 000 индивидуальных фотометрических наблюдений с точностью порядка  $0^m.01$ . Построены соответствующие кривые блеска, а для некоторых систем и кривые лучевых скоростей. Результаты всех фотометрических наблюдений опубликованы. Выполнено моделирование этих систем, определены фундаментальные параметры звезд, включая оценки их внутренней структуры, а также исследованы тонкие эффекты у нескольких пекулярных затменных систем. Проведен поиск невидимых спутников и установлен эволюционный статус систем.

Таким образом, актуальность темы диссертации и научная новизна полученных диссертантом результатов не вызывают сомнения.

Диссертация состоит из Введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы, 164 наименования.

**Во введении** обоснована актуальность темы работы и резюмированы ее результаты.

**В первой главе** описана история исследований затменных систем и суммированы нерешенные проблемы, которые требуют дополнительных исследований.

**Во второй главе** описаны методы наблюдательных исследований затменных систем в том числе, с помощью аппаратуры, сконструированной диссертантом. Диссертант подробно описал использованные им методы наблюдений, обработки и редукции широкополосных фотометрических исследований, в том числе с учетом различия в цветах компонент исследуемой системы, а также звезд сравнения (эффект Форбса). Важно то, что в большинстве затменных систем, отнаблюдённых диссертантом, компоненты имеют близкие спектральные классы, а в случае системы  $\alpha$  Северной короны, где спектральные классы компонент сильно различаются, диссертант при наблюдениях использовал узкополосные интерференционные фильтры, что свело к минимуму влияние эффекта Форбса. Следует отметить, что первые наблюдения по программе исследования затменных систем были начаты диссертантом в Тянь-шаньской высокогорной экспедиции ГАИШ. Диссертант поработал в группе В. Г. Корнилова и Х. Ф. Халиуллина, которая опубликовала высококачественный Каталог ярких звезд, содержащий сведения о 12 тысячах звезд северного неба. В этой группе вопросам редукции широкополосных фотометрических наблюдений уделялось большое внимание. Опыт работы в этой группе, имеющей мировую известность, помог диссертанту в реализации его многолетней программы фотометрических наблюдений затменных звезд.

Высокая точность наблюдений, реализуемых диссертантом, потребовала тщательного учета различных типов физической микропеременности компонентов затменных систем, в ряде случаев приводящих к необходимости введения небольших корректирующих коэффициентов, именуемых диссертантом как ночные поправки.

**В третьей главе** описан используемый диссертантом известный математический аппарат, начиная от метода интерпретации затменной кривой блеска системы с эллиптической орбитой и кончая методикой определения из найденного наблюдаемого апсидального периода системы параметра апсидального вращения, который определяет степень концентрации вещества в теле звезды. В основу метода интерпретации кривой блеска затменной системы в рамках модели двух сферических звезд диссертант положил компьютерную программу, созданную Х. Ф. Халиуллиным и А. И. Халиуллиной, в которую он внес некоторые усовершенствования. Диссертант использовал простейший линейный закон потемнения к краю для звезд, предварительно исследовав роль квадратичного члена в этом законе. Показано, что при точности наземных фотометрических наблюдений влияние квадратичного члена на точность определения моментов затменных минимумов несущественно.

Здесь же кратко описаны методы расчета орбиты третьего тела в системе в случае наличия светового уравнения, а также так называемый косвенный метод определения абсолютных характеристик звезд, который можно использовать при отсутствии данных спектральных наблюдений.

**В четвертой главе** суммированы данные о физических параметрах систем и звезд, определенных диссертантом с использованием своих наблюдений.

Для 61 затменной системы диссертантом построены кривые блеска, выполнена их интерпретация, получены абсолютные физические параметры звезд. Во всех этих случаях диссертант своими наблюдениями заложил новые эпохи в исследованиях затменных систем с эллиптическими орбитами и для половины исследованных систем открыл эффект вращения линии апсид, что

важно для оценки внутренней структуры звезд. В ряде случаев, диссертанту удалось уточнить известные величины скорости поворота линии апсид, а также выявить наличие светового уравнения и оценить орбиту и параметры третьего тела в системе.

Для шести систем впервые получены высокоточные многоцветные кривые блеска, найдены физические характеристики систем и определен эволюционный статус звезд. Для трех систем (AS Cam, V451 Cyg и  $\alpha$  CrB) наблюдения диссертанта позволили ему устранить некоторые противоречия между теорией и наблюдениями. Для системы  $\alpha$  CrB впервые было обнаружено наклонное вращение главной компоненты на основе анализа эффекта Росситера-Маклафлина.

Результаты своих исследований диссертант суммировал в трех таблицах (табл. II, III и IV). Эти результаты основаны на наблюдениях диссертанта, охватывающих 1592 ночи. Для систем, включенных в эти таблицы диссертант приводит краткие комментарии. Кроме того, диссертант на основе своих наблюдений выделил группы систем, представляющих особый интерес. Это системы, пригодные для исследования внутреннего строения звезд, которые состоят из звезд близких по своим характеристикам, системы с относительно большими массами компонент и значительными эксцентриситетами орбит, для которых существенно релятивистское апсидальное вращение орбит, системы, у которых эксцентриситеты орбит велики и превышают 0.4. Особый интерес представляют системы с компонентами, обладающими физической микропеременностью – звездами типа  $\delta$  Щита и  $\beta$  Цефея. Диссертант исследовал физическую переменность типа  $\delta$  Щита у компонент систем V577Orh и V961Ser, а также выявил их тройственность. В системах ASCam и V957Ser диссертантом исследована физическая переменность компонент типа  $\beta$  Цефея.

Среди изученных звезд диссертантом обнаружено 8 тройных систем, а система BU CMi изучена как четверная. Выделены также системы – компоненты визуально двойных систем, возможные связанные четверные

системы, системы с избыточным межзвездным поглощением, системы с аномально быстрым апсидальным вращением, а также так называемые конфликтные системы  $\alpha$  CrB, DI Her, AS Cam, BU CMi. Исследованию этих систем диссертант уделил особое внимание.

**Последующие пятая, шестая и седьмая главы диссертации** посвящены углубленному и детальному исследованию отдельных конфликтных систем, в которых наблюдаются аномальные эффекты.

**Пятая глава** посвящена решению проблемы апсидального вращения в системе AS Жирафа. Подробно изложена история исследований этой системы, интерес к которой был привлечен после обнаружения Х. Ф. Халиуллиным и В. С. Козыревой аномально медленного апсидального вращения в системе. Диссертант выполнил высокоточные измерения блеска и показателей цвета системы как для внезатменного участка кривой блеска, так и для каждой компоненты в отдельности, а также дал оценку величины межзвездного поглощения для системы. Далее он провел анализ и независимую интерпретацию многоцветных кривых блеска, полученных разными авторами и сравнил эти результаты с результатами интерпретации своих наблюдений. Кроме того он использовал и проанализировал спектральные наблюдения AS Жирафа и привел оценки спектроскопических элементов орбиты этой системы.

Были выявлены следующие особенности системы: главная компонента оказалась физической переменной звездой типа  $\beta$  Ser, что убедительно доказывается диссертантом анализом высокоточных спутниковых наблюдений, полученных с борта космической обсерватории TESS, а сама система AS Cam является тройной. Влияние третьего тела приводит к возрастанию со временем эксцентриситета орбиты AS Cam и, в итоге, к заниженному значению скорости изменения долготы периастра орбиты двойной системы. Таким образом, диссертанту удалось дать надежные абсолютные характеристики звезд-компонент системы AS Cam, выяснить их эволюционный статус и объяснить аномалии этой системы.

Диссертант выявил наличие третьего тела лишь по световому уравнению и ему не удалось выявить третье тело в системе как проявление третьего света в кривой блеска, но это – задача для будущих исследований.

**Шестая глава** посвящена изучению пекулярной затменной двойной системы  $\alpha$  Северной Короны.

Система является очень яркой ( $V= 2^m.21$ ) с большим орбитальным периодом и ее кривая блеска имеет неглубокие главный и вторичный минимумы. Поэтому исследовать ее трудно, и на момент начала исследования диссертанта были доступны лишь две фотоэлектрические кривые блеска этой системы.

Диссертант при фотометрических наблюдениях использовал узкополосные интерференционные фильтры, что позволило ему ослабить блеск системы, и что очень важно, свести практически к нулю влияние эффекта Форбса.

Фотометрические наблюдения диссертанта охватывают интервал времени почти в 40 лет. Ему удалось получить высокоточные и надежные кривые блеска  $\alpha$  CrV для двух эпох (1988 и 2016 годы). Это позволило ему дать надежные определения как абсолютных характеристик звезд и параметров орбиты, так и скорости апсидального вращения орбиты, которая оказалась почти в два раза меньше ожидаемого значения при условии синхронности осевого и орбитального вращения. Проанализировав спектральные наблюдения Маклафлина, диссертант объяснил это расхождение на основании гипотезы Н.И.Шакуры о наклонном вращении компонент в двойной системе.

**Седьмая глава** посвящена исследованию уникальной четверной системы ВU Малого Пса, в которой наблюдаются две затменные системы. На протяжении многих лет фотометрическое поведение системы казалось очень сложным, и окончательного вывода о природе ВU CMi сделано не было. Диссертант выполнил многолетние фотометрические и спектральные наблюдения этой системы и, используя высокоточные спутниковые

наблюдения с борта космической обсерватории TESS, полностью разобрался в природе этой непростой системы.

Используя свои наблюдения и наблюдения других авторов, диссертант расшифровал сложную фотометрическую переменность, выделил отдельно затненную систему "А" и систему "В" и привел графики О-С, характеризующие апсидальное вращение в каждой из компонент этой четверной системы.

При этом он определил как скорости апсидального вращения для каждой двойной системы, так и учел влияние одной системы на другую. Этот эффект оказался незначительным и с его помощью не удалось объяснить аномально быстрое апсидальное вращение орбит двух затменных систем. После учета апсидального вращения на кривых блеска остался эффект светового уравнения, обусловленный движением центров масс двух затменных систем относительно центра масс четверной системы. Из наблюдаемого эффекта светового уравнения (эффекта Ремера) диссертант определил параметры внешней орбиты для компонент "А" и "В" и функции масс для этих систем. С известными из спектральных наблюдений массами компонент диссертант оценил угол наклона внешней взаимной орбиты и показал, что плоскость взаимной орбиты не совпадает с плоскостью орбиты затменных систем. По окончательным остаточным отклонениям О-С диссертант выявил эффект нутации орбиты в звездных парах с периодом около 60 дней, который обусловлен сложным коллективным взаимодействием компонент этой четверной системы.

Таким образом, многолетние фотометрические и спектральные наблюдения четверной затменной системы с эллиптическими орбитами компонент и тщательный анализ этих наблюдений позволили диссертанту впервые дать адекватную модель этой уникальной системы, что важно для понимания структуры и динамики кратных звездных систем.

Оценивая работу в целом, можно заключить, что диссертантом выполнена большая и важная работа по массовому исследованию затменных систем звезд с эллиптическими орбитами. Наблюдения диссертанта уникальны

поскольку они выполнены с высокой точностью, охватывают сорокалетний период (~1590 наблюдательных ночей) и реализованы для большого числа затменных систем с эллиптическими орбитами (61 система). 100 000 индивидуальных измерений блеска этих систем позволили диссертанту заложить новые эпохи наблюдений для этих систем, что важно для дальнейшего поиска и уточнения эффекта апсидального вращения их орбит. У половины исследованных систем диссертант открыл эффект вращения линии апсид. Тонкий анализ особенностей наблюдательных проявлений ряда пекулярных систем позволил диссертанту устранить противоречия в интерпретации их наблюдений и построить адекватные модели этих систем.

Как отмечалось выше, актуальность темы диссертации не вызывает сомнения, поскольку изучение апсидального вращения в затменных системах представляет собой важный источник информации о внутреннем строении звезд, недоступной прямым наблюдениям, что важно для тестирования теории звездной эволюции.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций весьма высока и гарантируется как большим объемом высококачественных наблюдений диссертанта, так и тщательным анализом наблюдательных данных, позволившим диссертанту построить адекватные модели исследованных систем, а в ряде случаев открыть новые эффекты.

Достоверность научных выводов и рекомендаций диссертанта подтверждается тонким анализом наблюдательных данных и подтверждением ряда важных выводов диссертации в публикациях других авторов.

Новизна положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнения. Несколько результатов, представленных в диссертации, например, результаты исследования четверной системы BU CMi, имеют характер открытия.

Отметим некоторые критические замечания по диссертации.

1) При описании математического аппарата в главе 3 диссертант не упоминает важную деталь. В случае, когда наклонение орбиты двойной системы с эллиптической орбитой отличается от  $90^\circ$ , момент соединения



компонент не совпадает с моментом затненного минимума кривой блеска. Поскольку наклонение орбит исследуемых диссертантом систем не сильно отличаются от  $90^\circ$ , это различие относительно невелико. Но и требуемая точность наблюдательного определения моментов затненных минимумов кривой блеска весьма велика. Диссертанту следовало бы количественно убедиться в том, что в пределах точности его наблюдений влиянием указанного эффекта можно пренебречь.

2) В главе 3 не упоминаются важные работы Х. Ф. Халиуллина и А. И. Халиуллиной 2010 и 2011 годов, опубликованные в MNRAS по определению вращения компонент затненной системы из наблюдаемого поворота линии апсид. В этих работах показано, что при современной точности моделирования внутреннего строения звезд вполне возможно с помощью исследований апсидального вращения определять скорости вращения звезд и даже выявлять эффекты нетвердотельного вращения звезд.

3) В работе не описан метод оценки вклада третьего света в затменной системе. Поскольку диссертант в ряде случаев выявляет эффект третьего тела в системе по световому уравнению, ему следовало бы описать и метод оценки вклада третьего света в суммарный блеск системы при интерпретации затменной кривой блеска.

4) Имеется ряд замечаний редакционного характера.

Прежде всего, читателя текста диссертации раздражает то, что часть таблиц с важными данными диссертант разместил в конце текста, после списка цитируемой литературы. Это затрудняет чтение диссертации.

Кроме того в тексте много опечаток. Например, на стр. 218 в подписи к рис. 53 сказано, что на рисунке представлены значения  $O-C$  после вычета светового эффекта, а на самом деле здесь приведены  $O-C$  после вычета эффекта апсидального вращения. На стр. 175 в подписи к табл. X сказано, что расстояние в сутках. На стр. 161 не указано, в каких единицах выражены периоды  $P_1$  и  $P_2$ . На стр. 176 в подписях к рис. 35, 36 сказано, что компоненты обозначены кружками и квадратами, а на самом деле обе компоненты обозначены

кружками и их трудно различить. На стр. 103 по осям отложены значения масс, но не указано, в каких единицах. Подобное замечание относится и к таблицам II, III, IV. Там не всегда указано, в каких единицах выражены значения параметров. Из физического смысла параметров можно догадаться, в каких единицах они выражены, но это затрудняет чтение текста диссертации.

Иногда встречаются ошибки стилистического характера, например, перистые облака названы как перьевые облака, спутник Гиппаркос назван как Гиппарх, системы звезд с эллиптическими орбитами называются как эллиптические системы, и т.п.

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

Результаты диссертации опубликованы в 27 научных статьях, причем одна статья опубликована совместно со всемирно известным специалистом по исследованию тесных двойных систем, основателем метода синтеза кривых блеска затменных систем, профессором Робертом Вильсоном. Результаты диссертации докладывались автором на десятках отечественных и международных научных конференций.

Диссертация отвечает требованиям, установленным в Московском государственном университете 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 Волков И.М. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заведующий отделом звездной астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Черепашук Анатолий Михайлович

04 сентября 2024 года

Контактные данные:

тел.: 8(495)9394348, e-mail: cher@sai.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

Адрес места работы:

119234, Москва, Университетский проспект, 13 ГАИШ МГУ

Тел.: 8(495)9392858, e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ А.М.Черепашука удостоверяю:

Начальник отдела Канцелярии Л. Н. Новикова