

На правах рукописи



Соболев Андрей Владимирович

Структура магнитогидродинамических течений в полярах

1.3.1. – Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук

Научный руководитель:

Жилкин Андрей Георгиевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Отдела физики и эволюции звезд ФГБУН Института астрономии РАН, г. Москва

Научный консультант:

Бисикало Дмитрий Валерьевич, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, заместитель научного руководителя АНО «Национальный центр физики и математики», г. Москва

Официальные оппоненты:

Моисеенко Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н., руководитель отдела наблюдательной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии ФГБУН Института космических исследований РАН

Хайбрахманов Сергей Александрович, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник кафедры гидроаэромеханики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Ведущая организация:

ФГБУН Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук (ГАО РАН), г. Санкт-Петербург

Защита состоится 16 апреля 2024 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при ФГБУН Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru/>.

Автореферат разослан «11» марта 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.032.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Исследование структуры МГД течений в тесных двойных системах представляет собой сложную задачу, поскольку в большинстве случаев эта структура является существенно трёхмерной. Тем не менее эта задача представляет значительный научный интерес, поскольку все наблюдаемые явления в ТДС обусловлены аккрецией вещества на один из компонентов. В магнитных ТДС аккреция на компактный объект, обладающий собственным магнитным полем, может приводить к ряду дополнительных наблюдаемых проявлений. К ним можно отнести излучение из области аккреционных колонок, переменность, связанную с образованием горячих пятен на поверхности аккретора, высокочастотные квазипериодические осцилляции рентгеновского излучения и многие другие. Изучение этих явлений является важной задачей как для наблюдателей, так и для теоретиков, о чём свидетельствует множество статей и монографий [1, 2, 3].

Другим важным моментом в исследовании магнитных двойных звёзд является трудность непосредственного наблюдения элементов течения в таких системах в силу их значительной удалённости от наблюдателя и малых угловых размеров. Получаемые наблюдательные данные имеют интегральный характер, поэтому они не могут быть интерпретированы без привлечения предварительных теоретических предположений о пространственной структуре течения вещества. Данные предположения строятся на физических моделях, чем и определяется их важность. С другой стороны, физические модели включают в себя независимые

параметры, значения которых не могут быть определены без привлечения данных наблюдений. Таким образом, построение детальной картины течения в полярах и промежуточных полярах невозможно без тесного взаимодействия наблюдателей и теоретиков.

Первые попытки численного моделирования структуры течения в магнитных ТДС были предприняты ещё в начале 1990-х годов. Из-за высокой сложности проблемы эти исследования имели ряд ограничений и упрощений. Так, например, в работах [4, 5, 6, 7, 8] для решения данной задачи использовался метод квазичастиц [9, 10, 11, 12, 13]. Было показано, что структура течения в промежуточных полярах, в зависимости от конфигурации магнитного поля, может включать как аккреционный диск, аналогичный дискам в немагнитных катаклизмических переменных, так и удерживаемые магнитным полем аккреционные потоки. Однако в этих расчетах не учитывался ряд важных эффектов, таких как влияние газового и магнитного давлений, процессы нагрева-охлаждения, генерация магнитного поля в диске и другие.

Аккреционные процессы в магнитосфере белого карлика изучались более тщательно. В работах [14, 15, 16, 17] приведены результаты трёхмерного численного моделирования аккреции плазмы на гравитирующий объект с магнитным полем дипольного типа, ось которого не совпадает с осью орбитального вращения. Эти работы позволили детально изучить структуру потока в области магнитосферы белого карлика, где магнитное поле играет доминирующую роль. Однако вычислительная область модели включала лишь небольшую окрестность звезды-аккректора, поэтому получить полную картину течения вещества в ней не удалось.

Другим подходом к моделированию структуры потока в рассматри-

ваемых двойных звездах является гидродинамика сглаженных частиц (SPH) [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Используя этот подход, в работах [26, 27] была исследована система с аккреционным диском, в которой ось собственного вращения аккретора, орбитальная ось и ось магнитного диполя имели различное направление. В этой двойной системе диск рассматривался как совокупность частиц с заданными свойствами, а вариации параметров частиц определялись внешними силами, действующими на частицы. В частности, введение дипольного магнитного поля в SPH-код, свойственного звезде-аккретору, также учитывалось в качестве внешней силы, сообщающей ускорение тестовым частицам диска. Наличие поля естественным образом приводит к появлению отрицательных супергорбов на кривых блеска, что согласуется с результатами работ, в которых наклонение аккреционного диска выполнялось искусственно. Однако рассматриваемые авторами величины напряжённости магнитного поля соответствуют начальным промежуточным полярам. При более сильном поле применяемая модель становилась менее описательной и требовала внедрения МГД кода.

Таким образом, применение SPH-подхода даёт удовлетворительные результаты только при малых значениях напряжённости магнитного поля. Кроме того, при рассмотрении чисто газодинамического случая (в отсутствии магнитного поля) данный метод обладает малым разрешением, поскольку недостаточно подробно воспроизводит сильные разрывы по плотности (ударные волны), в результате чего решение получается смазанным.

Представленный в данной диссертации подход к описанию структуры течения в ТДС с помощью самосогласованной трёхмерной численной МГД модели [28, 2] позволяет устранить указанные выше недостатки

применявшихся ранее методов. В модели используется полная система уравнений магнитной гидродинамики, позволяющая описать все основные динамические эффекты, связанные с магнитным полем: процессы радиационного нагрева и охлаждения, диффузию магнитного поля за счет диссипации токов в турбулентных вихрях, магнитную плавучесть и волновую МГД турбулентность. Так как расчётная область модели включает в себя полости Роша донора и аккректора, то формирование и последующая эволюция аккреционного потока происходят естественным образом в результате процесса массопереноса вещества через внутреннюю точку Лагранжа. Кроме того, представляемая модель способна учесть некоторые дополнительные эффекты, обусловленные наличием в ТДС магнитного поля сложной конфигурации. Например, сильные наблюдательные свидетельства наличия сложного (имеющего существенную квадрупольную компоненту) магнитного поля имеются в случае асинхронного поляра BY Cam [29]. Как показано в работах [30, 31, 32], в случае сложного магнитного поля аккректора на его поверхности формируется несколько горячих пятен. К аналогичным выводам пришли авторы работ [33, 34, 35], в которых проводилось трехмерное МГД моделирование дисковой аккреции на звезду со сложной геометрией магнитного поля, имеющей квадрупольную и даже октупольную компоненты.

Цели диссертационной работы

Основной целью настоящей диссертационной работы является исследование динамики структуры течения в полярах на основе МГД моделирования и интерпретации наблюдательных данных. Данную цель можно представить в виде следующих положений:

1. Исследование с помощью численного моделирования структуры аккреционных потоков и распределения горячих пятен (зон энерговыделения) на поверхности белого карлика в синхронном поле. Анализ динамики структуры течения на основе движения горячих пятен по поверхности аккретора. Интерпретация наблюдательных данных с помощью полученных результатов.
2. Исследование структуры течения в асинхронном поле для различной пространственной ориентации магнитного поля с помощью разработанной численной МГД модели. Анализ наблюдательных проявлений системы на различных фазах периода биений. Построение синтетических кривых блеска и оценка динамики темпа аккреции поляра с целью интерпретации наблюдений.

Научная новизна

Численное моделирование структуры течения в синхронных и асинхронных полярах в рамках трехмерной МГД в самосогласованной постановке задачи ранее никем не проводилось. В применяемой численной модели поток вещества из оболочки звезды-донора задается не из граничных условий, а формируется естественным путем в результате переполнения полости Роша. Поэтому в рамках такой модели оказывается возможным исследование влияния магнитного поля на сам процесс формирования аккреционного потока. При исследовании структуры течения в асинхронных полярах основное внимание уделяется изучению эффектов, связанных с перестройкой структуры аккреционного потока в течение периода биений. В частности, детально исследуется процесс переключения магнитных полюсов.

Научная и практическая значимость

Полученные в диссертации результаты важны для понимания физики процессов массообмена и аккреции в полярах, которые недоступны для непосредственного изучения при наблюдении в силу значительной удалённости и малых угловых размеров рассматриваемых двойных систем. Эти результаты могут служить основой для интерпретации наблюдательных данных полярных, поэтому подходят для прямого применения в действующих астрофизических обсерваториях.

Методология и методы исследования

Для численного моделирования структуры течения в полярах используется трехмерный МГД код Nurgush 3.0 (номер государственной регистрации — №2022660970). Численный код предназначен для решения системы уравнений МГД с учетом диффузии магнитного поля, а также неадиабатических процессов (радиационный нагрев и охлаждение, а также нагрев за счет диссипации токов). Он основан на разностной схеме Роу–Эйнфельдта–Ошера, способен выполнять параллельные задачи и может эффективно использовать ресурсы современных многопроцессорных суперкомпьютеров.

Система уравнений, лежащая в основе численного кода, представляет собой модификацию разработанной несколько лет назад полуженуменологической МГД модели для описания астрофизических течений в условиях сильного внешнего магнитного поля [36, 28, 2]. В старой модели предполагалось, что динамика плазмы в сильном внешнем магнитном поле определяется медленным средним течением, формирующимся на фоне быстро распространяющихся МГД волн. В этой плазме за харак-

терное динамическое время альфвеновские и быстрые магнитозвуковые волны будут успевать много раз проходить по области течения в продольном и поперечном к магнитному полю направлениях. В результате взаимодействия этих волн будет происходить перераспределение энергии между различными гармониками, что приведет к формированию турбулентного каскада. Для описания такого течения можно использовать процедуру усреднения по ансамблю волновых пульсаций по аналогии со стандартными подходами, использующимися для описания МГД турбулентности.

В новой модели динамика плазмы в сильном магнитном поле характеризуется относительно медленным движением вдоль магнитных силовых линий, дрейфом под действием внешних сил (например, гравитации) в поперечном направлении, а также распространением с большими скоростями альфвеновских и магнитозвуковых волн. Практически вся информация о быстрых пульсациях при этом содержится в выражении для турбулентной магнитной вязкости. Значения свободных параметров определяются путем сравнения получаемых численных решений с соответствующими численными решениями, полученным в рамках строгой магнитной гидродинамики в случае слабого магнитного поля [37]. В используемой численной модели уравнение энтропии заменено уравнением энергии, что позволило более корректно рассчитывать структуру ударных волн для неадиабатических процессов. Описываемый подход успешно применялся ранее для моделирования структуры течения в полярах и промежуточных полярах [38]. Более детальное обоснование этой модели можно найти в работе [39].

Для обработки результатов численных расчётов применяется разработанный соискателем программный код Polina 3.0 (номер государ-

ственной регистрации — № 2022660924). Программа позволяет синтезировать кривые блеска в любом диапазоне электромагнитного спектра, в том числе болометрические, рассчитывать темп аккреции в области горячих пятен, индивидуально для каждого пятна и полное значение для всей поверхности аккректора. Отдельный модуль кода подготавливает данные для построения карт температуры поверхности аккректора (распределения горячих пятен). Визуализация этих данных осуществляется в пакете отображения научной информации Tecplot 360.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применяемая для расчёта структуры течения в полях самосогласованная трёхмерная численная модель, основанная на уравнениях модифицированной МГД, имеет высокое пространственное разрешение и способна предоставить детальную информацию для интерпретации наблюдений. Для обработки результатов численных расчётов разработан комплекс программ, получивший государственную регистрацию. С помощью данного комплекса возможно построение кривых блеска, температурных карт поверхности звезды и оценка параметров аккреции на белый карлик.
2. Численное моделирование структуры течения в синхронном поле V808 Aur для различных состояний активности системы показало, что в зависимости от соотношения длин баллистической и магнитной частей траектории струи, наблюдается смещение горячего пятна по поверхности аккректора. При принятой конфигурации магнитного поля это смещение относительно магнитного полюса может достигать 30° . Такое значение смещения пятна хорошо со-

гласуется с результатами интерпретации наблюдательных кривых блеска данного поляра.

3. Численное моделирование структуры течения в поляре CD Ind показало, что дрейф горячих пятен, обусловленный асинхронным вращением аккректора и переключением течения с одного магнитного полюса на другой, может достигать 20° по долготе и 15° по широте. Сравнение наблюдательных данных с результатами расчёта позволяет утверждать, что модель со смещённым диполем может объяснить наблюдательные проявления в асинхронном поляре CD Ind.
4. Разработана новая методика оценки конфигурации магнитного поля белого карлика по наблюдательным кривым блеска. В предположении дипольной конфигурации магнитного поля эта методика позволяет рассчитать смещение оси диполя относительно центра звезды по соотношению светимостей горячих пятен.

Достоверность представленных результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов исследования структуры течения в полярах обеспечивается применением хорошо обоснованных теоретических моделей, устойчивостью и сходимостью использованной разностной схемы, сравнением с имеющимися данными наземных и космических наблюдений и обсуждением полученных результатов на конференциях и семинарах. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация работы

Основные результаты представлены на следующих российских и зарубежных конференциях:

1. 7-я Тарусская школа-семинар «Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике», г. Таруса, Россия, 17 июня – 21 июня 2019 г.
2. Международная конференция МАС «Challenges and innovations in computational astrophysics - II», On-line, 18 ноября – 21 ноября 2020 г.
3. Международная конференция МАС «Challenges and innovations in computational astrophysics - III», On-line, 17 июня – 22 июня 2021 г.
4. Международная конференция МАС IAU362 «The predictive power of computational astrophysics as a tool discovery», On-line, 08 ноября – 12 ноября 2021 г.
5. 8-я Тарусская школа-семинар «Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике», г. Таруса, Россия, 27 июня – 01 июля 2022 г.
6. Международная конференция «Magnetism & Accretion 2023», г. Кейптаун, ЮАР, 16 января – 19 января 2023 г.
7. 9-я Тарусская школа-семинар «Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике», г. Таруса, Россия, 03 июля – 07 июля 2023 г.

Личный вклад автора Соискатель в равной степени участвовал в постановке задач. Им выполнены численные расчёты, по результатам которых получены трехмерные картины структуры течения, построены карты распределения температуры по поверхности аккретора. Разработанное соискателем программное обеспечение позволило на основе данных численного расчёта синтезировать кривые блеска двойных систем, а также сделать оценку темпа аккреции для обоих магнитных полюсов белого карлика. Эти синтетические данные представляют собой материал для сравнения модельных и наблюдательных характеристик исследуемого объекта. Также соискатель активно участвовал в написании статей, в которых изложены результаты проведённого исследования.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Число страниц в диссертации — 183, рисунков — 57, таблиц — 6. Список литературы содержит 137 наименований.

Содержание работы

Во Введении представлен краткий обзор содержания диссертации, объектов исследования, описана актуальность диссертационной работы, её цели и задачи, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Приведены сведения об апробации полученных результатов, о научных публикациях, а также о степени участия соискателя в проведённом исследовании.

В Главе 1 приводится описание физической и математической моделей исследуемых объектов — полярных звезд. Для целей изучения структуры

массообмена в данных двойных системах представлена трёхмерная численная модель, основанная на уравнениях модифицированной магнитной гидродинамики [40, 41], которые описывают усредненные характеристики течения в рамках волновой МГД турбулентности. В такой численной модели учитывается ряд динамических эффектов, связанных с высокой напряжённостью магнитного поля белого карлика, например, диффузия магнитного поля и процессы радиационного нагрева и охлаждения. Описываемая численная модель применяется в расчётной области, включающей в себя полости Роша донора и аккректора. Это позволяет описывать формирование истечения вещества из внутренней точки Лагранжа естественным путем, а не с помощью граничных условий. Кроме того, такая расчётная область позволяет в дальнейшем по результатам трехмерных расчетов построить синтетические кривые блеска. Для повышения пространственного разрешения схемы в расчётной области используется экспоненциальная сетка, шаг которой уменьшается к центру аккректора. Численное решение МГД уравнений модели выполнялось с помощью разностной схемы высокого порядка Роу-Эйнфельдта-Ошера, описание которой также приведено в данной Главе.

Получаемые результаты трёхмерного численного расчёта включают распределение ряда физических параметров двойной системы (плотности, давления, скорости, энергии, индукции магнитного поля) по ячейкам расчётной области, что позволяет построить картину течения для процесса массопереноса. Кроме того, показано, что представленные решения дают возможность синтезировать оценочные характеристики двойной системы — кривые блеска, графики изменения темпа аккреции, движение горячих пятен по поверхности аккректора, которые служат материалом для интерпретации результатов наблюдений. Методы синтеза

указанных характеристик также представлены в данной Главе.

Описание физической модели полярів содержит оценки её параметров. Целью данных оценок является доказательство обоснованности применения модели в рамках поставленных в работе задач при принятых начальных условиях.

В следующих трёх главах приведены результаты численного моделирования структуры течения для синхронного и асинхронного полярів с применением описанной в Главе 1 численной модели. Исследования проводились в предположении дипольной конфигурации магнитного поля аккректора, в которой ось диполя имеет наклон относительно оси вращения белого карлика. При этом рассматривалось два варианта положения центра диполя: 1) центр диполя совпадает с центром звезды-аккректора; 2) центр диполя смещён относительно центра аккректора вдоль его оси вращения.

В **Главе 2** представлены результаты расчёта структуры течения для типичного синхронного поляра V808 Aur. Численные расчёты проводились для четырёх значений темпа массообмена — от 10^{-8} до $10^{-11} M_{\odot}/\text{год}$, соответствующих различным состояниям активности двойной системы.

Сравнение результатов численных расчетов с наблюдательными кривыми блеска позволило выделить и уточнить ряд особенностей поляра, таких как дрейф горячего пятна, изменения яркости во вторичном минимуме, провал на кривой блеска в высоком состоянии перед входом в затмение, несимметричный профиль затмения в высоком состоянии и другие. Проведенное исследование подтвердило предположение о том, что состояния поляра определяются темпом аккреции, который, в свою очередь, определяется темпом массообмена. В Главе 2 показано, что существенные изменения яркости во вторичном минимуме вызваны прогре-

вом оболочки донора рентгеновским излучением из зон аккреции. Расчёты демонстрируют рост длины баллистической части аккреционной струи с увеличением темпа массообмена, где поток вещества контролируется в основном гравитацией и силами инерции (центробежная сила и сила Кориолиса). Это приводит к изменению пространственной конфигурации потока и заметному (до 30° по долготе) дрейфу области энерговыделения на поверхности белого карлика. Такие изменения структуры течения приводят к визуальным проявлениям на кривой блеска, которые хорошо согласуются с имеющимися наблюдениями.

Проведённое исследование распределения горячих пятен по поверхности аккретора в зависимости от темпа массообмена обнаружило формирование двух зон аккреции, сосредоточенных около северного (основная зона) и южного (вторичная зона) магнитных полюсов белого карлика. Южная зона аккреции является гораздо менее интенсивной, поскольку формируется за счет потока вещества из околосредней оболочки. Форма, интенсивность, а также расположение северного горячего пятна существенно зависят от темпа аккреции. При переходе к высокому состоянию это пятно смещается как по долготе, так и по широте. Расчёты показали, что в высоком состоянии северное горячее пятно дрейфует относительно северного магнитного полюса белого карлика на 30° по долготе и на 20° по широте. Эти результаты хорошо согласуются с наблюдениями. Основные результаты данной главы опубликованы в работе [A1].

В **Главе 3** исследована структура течения в асинхронном поле CD Ind в предположении дипольной конфигурации магнитного поля белого карлика со смещённым относительно центра звезды диполем. Изучение структуры проводилось в рамках стационарной модели для десяти

фаз периода биений при постоянном темпе массообмена.

Выполненные численные расчёты позволили выделить такие особенности системы, как дрейф горячих пятен на поверхности белого карлика, зависимость структуры течения от фазы периода биений, процесс переключения течения между магнитными полюсами. Показано, что зоны энерговыведения в течение периода биений смещаются по долготе в среднем на 20° , что соответствует величине 0.05 фазы орбитального периода. Кроме того, из-за особенностей геометрии магнитных силовых линий и их ориентации относительно экваториальной плоскости двойной системы горячие пятна формируются ближе к экватору относительно соответствующих магнитных полюсов по широте.

Выполненные численные расчёты выявили в системе CD Ind наличие процесса переключения магнитных полюсов, который происходит дважды за период биений. В течение этого процесса обнаружено резкое изменение конфигурации аккреционной струи. В начале переключения активным является один магнитный полюс, на который идет аккреция, а в его конце активным становится другой магнитный полюс. Центральная фаза процесса характеризуется аккрецией на оба полюса с одинаковой интенсивностью, а структура течения вещества принимает форму арки. При этом из-за смещенного центра диполя относительно центра звезды, а также из-за наклона диполя относительно оси вращения этот процесс происходит несимметричным по времени образом. Первое переключение полюсов осуществляется в интервале фаз периода биений от 0.0 до 0.1, второе переключение — между фазами 0.5 и 0.6.

По результатам расчетов были синтезированы болометрические и оптические кривые блеска с целью продемонстрировать особенности изменения потока излучения от системы в течение орбитального периода и

периода биений. Полученные синтетические кривые блеска в оптическом диапазоне с учетом всех необходимых факторов (V-фильтр, прогрев донора рентгеновским излучением из зон аккреции, поглощение излучения веществом аккреционной струи) вполне согласуются с наблюдаемыми кривыми, приведенными в работе [42]. Основные результаты данной главы опубликованы в работе [A2].

Глава 4 посвящена трехмерному численному МГД моделированию структуры течения в асинхронном поляре CD Ind в моменты переключения струи между магнитными полюсами аккретора. Для изучения процессов переключения использовался нестационарный тип численной модели, учитывающий собственное асинхронное вращение аккретора. Численное моделирование выявило качественные изменения структуры течения в процессах переключения аккреции. В частности, наблюдалось увеличение сечения струи в начале магнитной части траектории и формирование арки плотного вещества во внутренней области магнитосферы белого карлика, обращенной к донору. Образование арки происходит примерно в течение 5-ти орбитальных периодов. Далее ее внутренний радиус начинает уменьшаться, что соответствует сближению горячих пятен на поверхности аккретора. На 9-м орбитальном периоде происходит быстрое размыкание струи с предыдущим магнитным полюсом и формирование новой однополюсной аккреции. Длительность самих переключений при этом различна: отрыв струи от южного полюса происходит за половину орбитального цикла системы, а от северного полюса — примерно за один орбитальный период. Построенные карты температуры поверхности первичного компонента показывают заметный дрейф горячих пятен в процессах переключения полюсов. Их смещение происходит преимущественно по долготе, в среднем на $15^\circ \div 25^\circ$, и сопровождается

взаимным сближением при формировании арки вещества в магнитосфере белого карлика.

Анализ темпа аккреции выявил эффект накопления вещества в моменты переключения. При переключении с южного полюса на северный значительного накопления вещества не наблюдается, а рост и последующий спад темпа аккреции происходит плавно за короткое время, порядка 7-ми орбитальных периодов поляра. Увеличение темпа аккреции в этот момент времени не превышает 10% относительно среднего значения униполярного режима аккреции. Обратное переключение, наоборот, характеризуется существенным накоплением вещества. При этом большая его часть выпадает на южный магнитный полюс за короткое время, около двух орбитальных периодов, что приводит к росту темпа аккреции на 15%. Однако полный сброс накопленной материи завершается в течение продолжительного интервала времени, что не приводит к значительному увеличению светимости поляра.

Синтетические болометрические кривые блеска показали, что при смещении диполя общая светимость системы заметно отличается (примерно в 2 раза) в периоды однополюсной аккреции. В моменты же переключения аккреции быстрые колебания светимости могут отличаться в $3 \div 16$ раз в зависимости от направления процесса. Основные результаты данной главы опубликованы в работе [A3].

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы. Даны рекомендации для дальнейшего развития темы диссертации.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] Жилкин А. Г., Соболев А. В., Бисикало Д. В., Габдеев М. М. Структура течения в затменном поляре V808 Aur. Результаты трёхмерного численного моделирования // *Астрономический журнал*. 2019. Т. 96, №9. С. 748-775.
- [A2] Соболев А. В., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В., Бакли Д. А. Х. Трёхмерное численное моделирование структуры течения в асинхронном поляре CD Ind в приближении смещённого дипольного магнитного поля белого карлика // *Астрономический журнал*. 2020. Т.97, №6. С. 443-475.
- [A3] Соболев А. В., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В., Бакли Д. А. Х. Трёхмерная модель структуры течения в асинхронном поляре CD Ind в момент переключения магнитных полюсов // *Астрономический журнал*. 2021. Т.98, №5. С. 387-406.
- [A4] Bisikalo D. V., Sobolev A. V., Zhilkin A. G. Hot spot drift in synchronous and asynchronous polars: results of tree-dimensional numerical simulation // *Galaxies*. 2021. V. 9. P. 110.
- [A5] Bisikalo D. V., Sobolev A. V., Zhilkin A. G. MHD modeling of mass transfer processes in close binary stars // *Galaxies*. 2022. V. 10. P. 110.
- [A6] Сытов А. Ю., Соболев А. В. Применение методов синтетической доплеровской томографии к исследованию затменного поляра V808 Aur // *Астрономический журнал*. 2022. Т. 99. №11. С. 1 - 19.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] Соболев А. В., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В. Метод построения синтетической кривой блеска затменных полярных // Сборник научных трудов ИНАСАН. Москва: Изд-во Янус-К, 2019, Т. 3, С. 231-236.
- [B2] Sobolev A. V., Bisikalo D. V., Zhilkin A. G. Hot spot drift in synchronous and asynchronous polars: synthesis of light curves // IAU Proceedings. Symposium S362: The predictive power of computational astrophysics as a discovery tool. 2023. V. 16, P. 228–233.

Цитируемая литература

1. Warner B. Cataclysmic Variable Stars. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
2. Бисикало Д. В., Жилкин А. Г., Боярчук А. А. Газодинамика тесных двойных звёзд. М.: Физматлит, 2013.
3. Черепашук А. М. Тесные двойные звезды. Т. 1–2. М.: Физматлит, 2013.
4. King A. R. The accretion of diamagnetic blobs by a rotating magnetosphere // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1993. V. 261. №1. P. 144.
5. Norton A., Wynn J. A. Somerscales R. V. The spin periods and magnetic moments of white dwarfs in magnetic cataclysmic variables // Astrophysical Journal. 2004. V. 614, P. 349.
6. Ikhsanov N.R., Neustroev V. V., Beskrovnaya N. G. On the mass

- transfer in AE Aquarii // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 421, P. 1131.
7. Norton A. J., Butters O. W., Parker T. L., Wynn G. A. The Accretion Flows and Evolution of Magnetic Cataclysmic Variables // *Astrophysical Journal*. 2008. V. 672. №1. P. 524.
 8. Бисноватый-Коган Г. С., Рузмайкин А. А. Аккреция вещества коллапсирующей звездой в присутствии магнитного поля. II. Самосогласованная стационарная картина // *Астрофизика и космическая наука*. 1976. Т. 42, С. 401–424.
 9. Allen M. P., Tildesley A. K. Computer simulation of liquids. Oxford: Clarendon Press, 1987.
 10. Evans M. W., Halrow F. H. The particle-in-cell method for hydrodynamic calculations // *Los Alamos Scientific Laboures*. 1957. LA-2139.
 11. Harlow F. H., Welch J. E. Numerical calculations of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface // *Physics of Fluids*. 1965. V. 8, №12, P. 2182.
 12. Григорьев Ю. Н., Вшивков В. А., Федорук М. П. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках. М.: Изд. СО РАН, 2004.
 13. Gingold R. A., Monaghan J. J. Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics // *Journal of computational physics*. 1982. V. 46, P. 429.
 14. Koldoba A. V., Romanova M. M., Ustyugova G. V., Lovelace R.V.E. Three-dimensional magnetohydrodynamic simulations of accretion to an inclined rotator: The «Cubed Sphere» Method // *Astrophysical Journal*. 2002. V. 576. №1. P. L53–L56.
 15. Romanova M. M., Ustyugova G. V., Koldoba A. V., Wick J.

- V., Lovelace R. V. E. Magnetohydrodynamic simulations of disk-magnetized star interactions in the quiescent regime: funnel flows and angular momentum transport // *Astrophysical Journal*. 2003. V. 595, P. 1009.
16. Romanova M. M., Ustyugova G. V., Koldoba A. V., Wick J. V., Lovelace R. V. E. Three-dimensional simulations of disk accretion to an inclined dipole. II. Hot spots and variability // *Astrophysical Journal*. 2004 V. 610, P. 920.
17. Romanova M. M., Ustyugova G. V., Koldoba A. V., Wick J. V., Lovelace R. V. E. The propeller regime of disk accretion to a rapidly rotating magnetized star // *Astrophysical Journal*. 2004. V. 616, P. L151.
18. Monaghan J. J., Gingold R. A. Shock simulation by the particle method SPH // *Journal of computational physics*. 1983. V. 52, P. 374.
19. Monaghan J. J., Lattanzio J. C. A refined particle method for astrophysical problems // *Astronomy and astrophysics*. 1985. V. 149, P. 135.
20. Monaghan J. J. An introduction to SPH // *Computer physics communications*. 1988. V. 48, P. 89.
21. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics // *Annual Review of Astronomy and astrophysics*. 1992. V. 30, P. 543.
22. Serna A., Alimi J. M., Chieze J. P. Adaptive smooth particle hydrodynamics and particle-particle coupled codes: energy and entropy conservation // *Astrophysical Journal*. 1996. V. 461, P. 884.
23. Owen J. M., Villumsen J. V., Shapiro P. R., Martel H. Adaptive smoothed particle hydrodynamics: II. Methodology // *Astrophysical*

- Journal Supplement Series. 1998. V. 116, P. 155.
24. Cummins S. J., Rudman M. A SPH projection method // Journal of computational physics. 1999. V. 152, P. 584.
 25. Schiessler J., Schmitt D. Comments on smoothed particle hydrodynamics // Astronomy and astrophysics. 1981. V. 97, P. 373.
 26. Thomas D., Wood M. The emergence of negative superhumps in cataclysmic variables: smoothed particle hydrodynamics simulations // Astrophysical Journal. 2015. V. 803, P. 55.
 27. Nagasawa M., Matsuda T., Kuwahara K. Smoothed particle rendering for fluid visualization «Three-dimensional accretion disk and jet formation» // Numerical Astrophysics Japan. 1991. V. 2, P. 27.
 28. Бисикало Д. В., Жилкин А. Г., Боярчук А. А. Структура течения в тесных двойных звёздах с учётом магнитного поля // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, С. 121.
 29. Mason P., Ramsay G., Andronov I., Kolesnikov S., Shakhovskoy N., Pavlenko E. Evidence for pole switching in the magnetic cataclysmic variable BY Cam // Monthly Notes of the Royal Astronomical Society. 1998. V. 295, P. 511.
 30. Pavlenko E. P., Andreev M., Babina Ju. V. Observational evidence for a complex magnetic field structure of the asynchronous polar BY Cam // The Astronomical society of the pacific conference series. 2007. V. 372, P. 537.
 31. Жилкин А. Г., Бисикало Д. В., Масон П. А. Трёхмерное МГД моделирование структуры аккреционного течения в магнитных катаклизмических переменных с сильным и сложным магнитным полем // Астрономический журнал. 2012. Т. 89, С. 291.

32. Wu K., Wickramasinghe D. T. Accretion onto AM Herculis binaries with a multipole magnetic field // The Astronomical society of the pacific conference series. 1992, V. 29, P. 203.
33. Long M., Romanova M. M., Lovelace R. V. E. Accretion to stars with non-dipole magnetic fields // Monthly Notes of the Royal Astronomical Society. 2007. V. 374, P. 436.
34. Long M., Romanova M. M., Lovelace R. V. E. Three-dimensional simulations of accretion to stars with complex magnetic fields // Monthly Notes of the Royal Astronomical Society. 2008. V. 386, P. 1274.
35. Romanova M. M., Long M., Lamb F. K. Global 3D simulations of disc accretion onto the classical T Tauri star V2129 Oph // Monthly Notes of the Royal Astronomical Society. 2011. V. 411, P. 915.
36. Zhilkin A. G., Bisikalo D. V. Formation of an accretion disc in close binary systems with magnetic field // Astronomical Journal. 2010. V. 87, P. 1155.
37. Zhilkin A. G., Bisikalo D. V., Ustyugov V. A. New magnetohydrodynamic model for close binary stars: Applicability for moderate magnetic fields // AIP Conference Proceedings. 2013. V. 1551, P. 22.
38. Жилкин А. Г., Бисикало Д. В. Влияние магнитного поля на структуру аккреционных дисков в полуразделенных двойных системах // Астрономический журнал. 2009. Т.86, С. 475.
39. Курбатов Е. П., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В. Модель модифицированной магнитной гидродинамики с учётом волновой турбулентности в приложениях к астрофизике // Успехи физических наук. 2017. Т. 187, №8, С. 857-878.

40. Moffatt H. K. Magnetic field generation in electrically conducting fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
41. Тихонов А. Н., Самарский А. Л. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966.
42. Nakala P., Ramsay G., Potter S. B., Beardmore A., Buckley D. A. H., Wynn G. TESS observations of the asynchronous polar CD Ind: mapping the changing accretion geometry // Monthly Notes of the Royal Astronomical Society. 2019. V. 486, P. 2549.

Благодарности Автор выражает благодарность научному руководителю Жилкину А. Г. за всестороннюю помощь в проведении исследований и создании материала для диссертационной работы, в частности за предоставленный трёхмерный численный код, научному консультанту Бисикало Д. В. за критические замечания и соавторство в написании статей, Кайгородову П. В. за техническую поддержку и помощь в работе. Также автор благодарит за предоставленный наблюдательный материал по полюру V808 Aur команду наблюдателей CAO РАН под руководством Габдеева М. М. и по полюру CD Ind группу сотрудников Южноафриканской Обсерватории во главе с Дэвидом Бакли.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-52-60001.

Численные расчёты выполнялись с использованием оборудования центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мегакласса» НИЦ «Курчатовский институт», <http://ckp.nrcki.ru/>, а также вычислительного кластера Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.