

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи



Исакова Полина Борисовна

**Особенности структуры течения в  
магнитных катаклизмических переменных**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018



## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Когда люди смотрят на ночное небо, многие из них не догадываются, что большая часть звезд, по-видимому, является двойными (или кратными) [1, 2]. И среди двойных звезд около половины обмениваются веществом. Обмен веществом между звездами — важный процесс, он существенно влияет на эволюцию двойной системы. Такая эволюция не похожа на эволюцию одиночной звезды, и в ходе жизни двойных звезд возникают объекты, которые не могут рождаться в результате развития одиночных звезд. Но обмен массой между звездами — сложный процесс, и до сих пор можно найти такие системы, наблюдения которых не описываются теорией. Около каждой из компонент двойной звезды можно выделить некоторый объем. В системе отсчета, вращающейся вместе с двойной системой, наибольшее влияние на движение пробной частицы в этой области будет оказывать притяжение именно этой звезды, а не притяжение со стороны ее компаньона или центробежная сила. Эта полость называется полостью Роша. Она ограничивается поверхностью равного потенциала Роша и содержит первую (внутреннюю) точку Лагранжа  $L_1$ . Внутренняя точка Лагранжа находится на прямой, соединяющей центры масс двух звезд, и находится ближе к звезде меньшей массы. В этой точке равнодействующая сила притяжений обеих звезд равна нулю. Поэтому если одна из звезд в ходе своей эволюции заполняет свою полость Роша, то становится возможным перетекание вещества от этой звезды к другой. В этом случае звезда, которая теряет вещество, называется донором, а звезда, которая накапливает вещество, — аккректором.

Звезды в двойных системах могут эволюционировать как одиночные, если они находятся достаточно далеко друг от друга и не взаимодействуют — так называемые разделенные двойные системы (ни одна звезда не заполняет полость Роша). Если в результате эволюции одна звезда влияет на другую, такие системы называются тесными. Последние могут быть полуразделенными (одна звезда заполняет полость Роша) и контактными двойными системами (обе звезды заполняют свои полости Роша). В разделенных двойных системах возможен тоже обмен веществом, но только посредством звездного ветра (например, у симбиотических звезд).

В ходе своей эволюции тесные двойные звезды взаимодействуют друг с другом. В процессе взаимодействия важными являются и магнитное поле, и вращение звезд, и их массы, и то, на каком расстоянии

они находятся друг от друга, на каком этапе эволюции находятся. Вещество, которое движется от одной звезды к другой, может образовывать диск вокруг второй звезды, может перетекать потоком разной толщины, может выбрасываться из системы сразу же, а может и окружать обе звезды одновременно.

Обмен веществом между компонентами двойной системы может кардинально изменить эволюцию звезд [3]. При наблюдениях как одиночных, так и двойных звезд может наблюдаться переменность их блеска, и такие звезды называют переменными. Колебания блеска могут иметь разную физическую природу. Среди переменных двойных звезд выделяют затменные, в которых одна звезда периодически затмевает другую. Примером таких звезд является известный издавна Алголь. Среди переменных также выделяют подкласс неправильных переменных, блеск которых изменяется без строгой периодичности. Спектральные исследования этих звезд показывают, что во время их вспышек (быстрое увеличение блеска) увеличивается скорость движения вещества, поэтому неправильные переменные стали называть катаклизмическими (взрывными).

Как показали исследования, во многих тесных двойных системах магнитное поле играет значительную роль в процессах массообмена и аккреции. К таким системам, в первую очередь, относятся магнитные катаклизмические звезды. Это тесные двойные звезды, состоящие из звезды-донора (маломассивной звезды позднего спектрального класса (К или М), как правило, красного карлика) и звезды-аккретора (белого карлика). В ходе своей эволюции красный карлик заполняет свою полость Роша (угловой момент уносится из системы магнитным звездным ветром, а компоненты сближаются до момента такого заполнения). Во внутренней точке Лагранжа  $L_1$  градиент полного давления оказывается не уравновешен силой гравитации, поэтому начинается перетекание вещества во внутреннюю полость Роша белого карлика. Дальнейшее развитие двойной системы зависит от ее параметров. Магнитные катаклизмические переменные можно разделить на так называемые полярные и промежуточные полярные, основываясь на их наблюдениях [4]. Полярные получили свое название из-за того, что у них наблюдается высокая степень круговой поляризации излучения в видимом диапазоне (до 9%), которая предполагает присутствие сильного магнитного поля, а в промежуточных полярных не наблюдается поляризации в видимом диапазоне [4]. Промежуточные полярные занимают пограничное положение между полярными и немагнитными катаклизмическими переменными. [5].

Согласно современной физической интерпретации, в полярных белый

карлик обладает сильным собственным магнитным полем  $10^7 - 10^8$  Гс на поверхности [4]. Такие системы обладают короткими орбитальными периодами от 1 до 5 часов. Считается, что аккреционные диски в полярах не образуются, а собственное вращение компонентов является синхронным. Влияние магнитного поля приводит к тому, что вещество с красного карлика перетекает на белый карлик в виде коллимированного потока. При этом вещество выпадает на поверхность белого карлика в районе одного из его магнитных полюсов.

В промежуточных полярах индукция магнитного поля белого карлика значительно меньше и составляет  $10^4 - 10^6$  Гс [6]. Орбитальные периоды таких систем находятся в промежутке от нескольких часов до нескольких десятков часов, они существенно длиннее периодов вращения белого карлика. Асинхронность вращения аккретора объясняется взаимодействием его магнитного поля с веществом диска в области границы магнитосферы. Чем меньше магнитное поле, тем больший диск образуется и тем медленнее идет перетекание вещества. И наоборот, у большего магнитного поля перетекание вещества идет быстрее, оно как бы ускоряется магнитным полем.

Исследование структуры течения в этих системах относится к числу наиболее важных, интересных и актуальных задач современной астрофизики. Это обусловлено тем, что все наблюдаемые явления в двойных системах так или иначе связаны с аккрецией вещества на одну из компонент, при этом аккреция сопровождается значительным энерговыделением. Аккреция на компактный объект с магнитным полем может приводить к ряду интересных наблюдаемых явлений, таких как излучение из области горячих колонок; переменность, связанная с образованием горячих пятен на поверхности аккретора; необычная вспышечная активность. Эти явления притягивают внимание и наблюдателей и теоретиков, им посвящено множество статей и монографий [4, 5, 7]. Однако, детали многих процессов остаются до сих пор загадкой.

Предметом изучения в первой главе диссертационной работы является система AE Aqr, относящаяся к типу так называемых «суперпропеллеров», в которых происходит интенсивный отток вещества из системы вместо традиционной аккреции. При этом в наблюдениях система является нестационарной, ее вспышки происходят почти во всех частях электромагнитного спектра. Однако, несмотря на большое количество публикаций по AE Aqr, наблюдательные проявления в ней до сих пор остаются необъясненными, что во многом связано с экстремальностью условий (недостижимых в земных лабораториях), в которых находится плазма. Например, большое значение играет вращение звезды-аккрето-

ра. Взаимодействии вращения с магнитным полем может приводить к тому, что вещество не будет попадать на поверхность звезды-аккретора вообще, а будет выбрасываться из системы. Для системы AE Aqr, в частности, до сих пор не известна природа вспышечной активности. Поэтому актуальной задачей является объяснение ее вспышечной активности в рамках согласованных физических моделей.

Предметом изучения второй и третьей глав диссертационной работы является система EX Нуа. Эта двойная звезда является типичным промежуточным поляром и расположена близко к Земле, что делает ее удобным наблюдательным источником и идеальным объектом для проверки теоретических моделей. В частности, для нее был проведен спектральный анализ рентгеновского излучения и анализ ее периодической и стохастической переменности для определения геометрических размеров аккреционной колонки. В результате было показано, что площадь аккреционной колонки не превышает долей процента от площади поверхности белого карлика. С помощью самосогласованной МГД модели нами проведен анализ картины течения и объяснение найденных в наблюдениях закономерностей. Эти результаты представляются актуальными в свете интерпретации наблюдений данного объекта и других типичных представителей промежуточных полярков.

В четвертой главе изучается типичный поляр, в котором белый карлик обладает сильным собственным магнитным полем. Как показали предыдущие результаты трехмерных расчетов структуры течения в таких системах [8], струя вещества из оболочки донора сразу же расщепляется на несколько потоков, которые движутся вдоль магнитных силовых линий и достигают магнитных полюсов звезды-аккретора. Такой характер течения совершенно не соответствует классической картине формирования струи у полярков [9] и поэтому нуждается в более детальном исследовании. Эта задача исследуется в диссертационной работе с помощью численной модели путем расширения расчетной области, таким образом, что она полностью включает в себя полость Роша звезды-аккретора, а также частично полость Роша звезды-донора. Это позволяет описывать формирование естественным путем истечения из оболочки звезды-донора в окрестности внутренней точки Лагранжа и изучить влияние магнитного поля белого карлика на течение вещества в окрестности внутренней точки Лагранжа.

## Цели диссертационной работы

1. Исследование особенностей структуры течения в магнитных катаклизмических переменных типа «суперпропеллер» на примере системы АЕ Аqr.
2. Исследование процесса аккреции в промежуточных полярах с магнитным полем дипольного типа в присутствии волновой МГД турбулентности.
3. Численное моделирование аккреционной шторки в промежуточных полярах на примере системы ЕХ Нуа.
4. Численное моделирование структуры течения в окрестности внутренней точки Лагранжа в полярах.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Предложен новый механизм вспышечной активности в АЕ Аqr, связанный с чередованием ламинарного и турбулентного режимов аккреционного потока в рамках разработанной трехмерной численной модели для описания структуры течения в магнитных катаклизмических переменных типа «суперпропеллер» в приближении неполного проникновения магнитного поля аккретора в плазму.
2. Трехмерное численное моделирование структуры магнитосферы белого карлика в промежуточных полярах в рамках модифицированной магнитной гидродинамики, описывающей усредненные характеристики течения в условия волновой МГД турбулентности.
3. С помощью численного моделирования процесса аккреции в промежуточных полярах сделан вывод о том, что приближение полностью проникающего в плазму магнитного поля аккретора не позволяет получить в расчетах тонкую аккреционную шторку, наблюдаемую в системе ЕХ Нуа. Показано, что для достижения согласия с наблюдениями следует использовать модель диамагнитного диска, где магнитное поле звезды лишь частично проникает в плазму диска.

4. Вывод о том, что в полярах взаимодействие вещества аккреционного потока из оболочки звезды-донора с магнитным полем звезды-аккретора должно приводить к формированию иерархической структуры магнитосферы, поскольку менее плотные части аккреционного потока останавливаются магнитным полем белого карлика раньше, чем более плотные. Учет такой структуры магнитосферы может повлиять на результаты анализа и интерпретации наблюдательных данных.

## Научная новизна

Следующие основные результаты получены впервые:

1. Впервые предложена самосогласованная трехмерная численная модель для описания структуры течения в магнитных катаклизмических переменных типа «суперпропеллер» в рамках приближения неполного проникновения магнитного поля аккретора в плазму. Впервые предложен механизм вспышечной активности в системе AE Aqr, связанный с чередованием ламинарного и турбулентного режимов аккреционного потока.
2. Впервые предложена трехмерная численная модель, позволяющая детально исследовать структуру магнитосферы белого карлика в промежуточных полярах в рамках модифицированной магнитной гидродинамики, учитывающей наклон магнитной оси по отношению к оси вращения, процессы диффузии магнитного поля, радиационный нагрев и охлаждение и описывающей усредненные характеристики течения в условия волновой МГД турбулентности.
3. На основе проведенных численных расчетов в рамках двумерной осесимметричной модели впервые сделан вывод о том, что приближение полностью проникающего в плазму магнитного поля аккретора не позволяет получить тонкую аккреционную шторку, наблюдаемую в системе EX Hya. Показано, что для достижения согласия с наблюдениями следует использовать модель диамагнитного диска, где магнитное поле звезды лишь частично проникает в плазму диска.
4. Впервые предложена модель формирования иерархической структуры магнитосферы в полярах. Подобная схема формирования иерархической магнитосферы в полярах существенно отличается от клас-

сической и ее учет может повлиять на результаты анализа и интерпретации наблюдательных данных.

### **Научная и практическая значимость**

Полученные в диссертации результаты важны для понимания физики процесса аккреции в магнитных катаклизмических переменных. Проведенные исследования также важны для объяснения наблюдаемых характеристик полярных и промежуточных полярных. Основные результаты используются при интерпретации наблюдательных данных как у нас в стране, так и за рубежом.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал активное участие в постановке задач, разработке физических моделей, проведении численных расчетов, анализе результатов моделирования, обсуждении и подготовке к публикации полученных результатов. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором в результате совместных исследований. Результаты, выносимые на защиту, согласованы с соавторами.

### **Достоверность представленных результатов**

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов исследования структуры течения в магнитных катаклизмических переменных обеспечивается применением хорошо обоснованных теоретических моделей, устойчивостью и сходимостью использованных разностных схем, 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**

Результаты, представленные в диссертации, были представлены в качестве устных и стендовых докладов:

- на международных конференциях:
  - «Physics at the Magnetospheric Boundary» (Женева, Швейцария, 2013 г.)
  - «40th COSPAR Scientific Assembly» (Москва, 2014 г.)

- «5th Black Sea Biennial School and Workshop on Space Plasma Physics» (Китен, Болгария, 2014 г.)
- «EuroWD16: 20th European White Dwarf Workshop» (Уорвик, Англия, 2016 г.)
- «Accretion Processes in Cosmic Sources» (Санкт-Петербург, 2016 г.)
- «Физика звезд: от коллапса до коллапса» (Нижний Архыз, 2016 г.)
- «The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects - IV» (Палермо, Италия, 2017 г.)
- «Accretion Processes in Cosmic Sources II» (Санкт-Петербург, 2018 г.)
- на всероссийских конференциях:
  - 38 «Физика космоса» (Екатеринбург, 2009 г.)
  - XI и XII «Забабахинские научные чтения» (Снежинск, 2012, 2014 гг.)
  - «ВАК-2013 Многоликая вселенная» (Санкт-Петербург, 2013 г.)
  - «ВАК-2017 Астрономия: познание без границ» (Ялта, Крым, 2017 г.)
- на конференциях Института астрономии РАН:
  - Конкурс молодых ученых (Москва, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.)
  - Вторая международная школа для студентов и молодых ученых «Экзопланеты в двойных звездных системах» (Москва, 2017 г.)
- на астрофизических семинарах:
  - «Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике» (Таруса, 2014, 2018 г.)
  - Венского университета. (Вена, Австрия, 2014 г.)
  - Института астрономии РАН (Москва, 2015, 2016 гг.)
  - Кафедры теоретической физики ЧелГУ (Челябинск, 2016 г.)

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации 126 страниц, включая 27 рисунков, 1 таблицу и список цитируемой литературы из 116 наименований.

## Содержание работы

**Во Введении** рассматривается актуальность данной работы, а также поставленные задачи, обсуждается научная новизна полученных результатов, и оценивается научная значимость и применимость проведенных исследований.

**В Главе 1** «Моделирование процесса массообмена в системе АЕ Aqr» исследована структура течения в магнитных катаклизмических переменных с сильными магнитными полями и быстрым вращением звезды-аккретора на примере системы АЕ Aqr. В таких системах в рамках базовой модели [B1], [B2] магнитосфера слишком эффективно передает угловой момент веществу, что не позволяет сформироваться аккреционному диску. Однако эта картина не согласуется с результатами наблюдений, где вещество присутствует в полости Роша белого карлика. Поэтому были проанализированы физические механизмы уменьшения эффективности передачи углового момента от вращающейся магнитосферы веществу из внутренней точки Лагранжа. Самым эффективным оказался механизм, связанный с неполным проникновением магнитного поля в плазму. Было проведено трехмерное численное моделирование в рамках этого механизма. Показано, что вспышечная активность в системе АЕ Aqr связана с переходами между ламинарным и турбулентным режимами течения [A2], [B5].

**В Главе 2** «Численная модель процесса аккреции в промежуточных полях» изучена структура течения вблизи поверхности аккретора в типичном промежуточном поле. Была разработана численная модель, включающая в себя диффузию магнитного поля, а также процессы радиационного нагрева и охлаждения. Модель основана на уравнениях модифицированной магнитной газодинамики, которые описывают усредненные характеристики течения в рамках волной МГД-турбулентности. Было проведено трехмерное численное моделирование процесса аккреции для двух значений собственного магнитного поля аккретора. По результатам моделирования были построены и проанализированы распределения плотности и скорости, показывающие, что вблизи аккрето-

ра формируется магнитосфера, а процесс аккреции имеет колонковый характер. Аккреционные колонки имеют форму не трубок, а шторок, поскольку не являются замкнутыми.. Структура течения меняется с изменением величины магнитного поля. С увеличением индукции магнитного поля расширяется зона магнитосферы, увеличиваются вакуумные области, уменьшаются углы раскрытия шторок, а также увеличивается площадь горячих пятен на поверхности белого карлика и уменьшаются углы их раскрытия. Результаты данной главы опубликованы в статье [A1].

**В Главе 3** «Взаимодействие магнитосферы белого карлика с аккреционным диском в промежуточных полярах» исследуется зависимость толщины аккреционных шторок от толщины аккреционного диска. Предполагается, что толщина аккреционной шторки у поверхности аккретора связана с ее толщиной у основания аккреционного диска на примере системы EX Нуа. В рамках модели [A3] было проведено двумерное численное моделирование, которое показало, что толщина аккреционных шторок слабо зависит от толщины аккреционного диска. Однако из наблюдений данной системы следует, что толщина шторки должна быть гораздо меньше, чем было получено в данных расчетах. Был сделан вывод о том, что в численной модели магнитное поле звезды полностью проникает в плазму диска, что может объяснить получение толстых аккреционных шторок. Для уменьшения толщины аккреционной шторки предложено использовать приближение диамагнитного диска, полностью или частично экранирующего магнитное поле звезды. В этом случае толщина аккреционной шторки должна определяться толщиной диффузионного слоя на границе магнитосферы. Приведенные оценки показывают, что соответствующие значения толщины аккреционной шторки хорошо согласуются с наблюдательными данными [B6].

**В Главе 4** «Особенности структуры течения в окрестности внутренней точки Лагранжа в полярах» изучена структура течения в полярах на примере системы с параметрами, соответствующими SS Cyg. В рамках численной модели, основанной на приближении модифицированной магнитной гидродинамики, которое описывает динамику плазмы в очень сильном внешнем магнитном поле с учетом турбулентности альфвеновских волн при малых магнитных числах Рейнольдса, было проведено трехмерное численное моделирование перетекания вещества из звезды-донора внутрь полости Роша звезды-аккретора. Подробно была изучена окрестность внутренней точки Лагранжа, где происходит формирование аккреционного потока. По результатам моделирования было показано, что вещество формирует коллимированные аккреционные по-

токи, движущиеся к магнитным полюсам белого карлика. В окрестности внутренней точки Лагранжа поток из-за влияния магнитного поля расщепляется на два отдельных потока. Взаимодействие вещества аккреционного потока из оболочки звезды-донора с магнитным полем приводит к формированию иерархической структуры магнитосферы. Менее плотные (периферийные) части потока попадают под влияние магнитного поля на более далеких расстояниях от звезды-аккретора и формируют внешние области магнитосферы. Более внутренние и более плотные части потока отклоняются магнитным полем на более близких расстояниях от аккретора. Самые внутренние и плотные части потока проникают сквозь магнитное поле глубже всего и формируют самые внутренние области магнитосферы в непосредственной близости от аккретора. Однако вблизи магнитных полюсов все эти отдельные потоки должны снова сливаться и формировать у поверхности белого карлика аккреционные колонки или шторки. Такая схема формирования иерархической магнитосферы в полярных областях существенно отличается от классической и ее учет может повлиять на результаты анализа и интерпретации наблюдательных данных. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [A4], [B3], [B4].

**В Заключении** кратко повторяются полученные результаты и отмечены возможные направления дальнейшей работы по теме диссертации.

## Публикации по теме диссертации

### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] *Исакова П. Б., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В.* Численная модель процесса аккреции в промежуточных полярах с магнитным полем дипольного типа // *Астрон. журн.* 2015. Т. 92. №9. С. 720–727.
- [A2] *Исакова П. Б., Ихсанов Н. Р., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В., Бескровная Н. Г.* Особенности течения вещества в пекулярной взрывной (катаклизмической) переменной АЕ Водолея // *Астрон. журн.* 2016. Т. 93. №5. С. 474–485.
- [A3] *Исакова П. Б., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В., Семена А. Н., Ревнивцев М. Г.* Особенности аккреции в системе ЕХ Hydrae: результаты численного моделирования // *Астрон. журн.* 2017. Т. 94. №7. С. 566–579.
- [A4] *Исакова П. Б., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В.* Особенности структуры течения в окрестности внутренней точки Лагранжа в полярах // *Астрон. журн.* 2018. Т. 95. №8. С. 519–529.

### Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] *Isakova P., Zhilkin A., Bisikalo D.* Features of the mass transfer in magnetic cataclysmic variables with fast-rotating white dwarfs // Труды конференции «Physics at the Magnetospheric Boundary». EPJ Web of Conferences. 2014. V. 64, article id. 03002. Ред. E. Bozzo, P. Kretschmar, M. Audard, M. Falanga, C. Ferrigno.
- [B2] *Isakova P. B., Zhilkin A. G., Bisikalo D. V., Ikhsanov N. R.* A possible mechanism of the flaring activity in АЕ Aqr // Труды конференции «5th Black sea biennial school and workshop on space plasma physics». AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1714, article id. 020003. Ред. Zhelyazkov I., Mishonov T.
- [B3] *Isakova P. B., Zhilkin A. G., Bisikalo D. V.* The flow structure in the vicinity of the inner Lagrangian point in magnetic cataclysmic variables // Труды конференции «20th European white dwarf workshop». AIP Conference Proceedings. 2017. V. 509. P. 495–500. Ред. Tremblay P. -E., Gänsicke B., Marsh T.

- [B4] *Исакова П. Б., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В.* Особенности структуры течения в окрестности внутренней точки Лагранжа в полярах и промежуточных полярах // Сборник трудов мемориальной конференции 2018 г., посвященной памяти академика А.А. Боярчука. 2018. С. 221–226.
- [B5] *Исакова П. Б., Жилкин А. Г., Бисикало Д. В.* Аккреция на быстро вращающиеся белые карлики // Сборник трудов мемориальной конференции 2018 г., посвященной памяти академика А.А. Боярчука. 2018. С. 239–244.
- [B6] *Жилкин А. Г., Исакова П. Б., Бисикало Д. В.* Режим аккреции в EX Нуа // Сборник трудов мемориальной конференции 2018 г., посвященной памяти академика А.А. Боярчука. 2018. С. 186–191.

## Цитируемая литература

1. *Duchêne G., Kraus A.* Stellar Multiplicity // *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* 2013. V. 51. P. 269–310.
2. *Moe M., Di Stefano R.* Mind Your Ps and Qs: The Interrelation between Period (P) and Mass-ratio (Q) Distributions of Binary Stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2017. V. 230, article id. 15.
3. *Масевич А. Г., Тутуков А. В.* Эволюция звезд: теория и наблюдения / Изд. Москва: Наука, 1988.
4. *Warner B.* Cataclysmic Variable Stars / Изд. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
5. *Бисикало Д. В., Жилкин А. Г., Боярчук А. А.* Газодинамика тесных двойных звезд / Изд. Москва: Физматлит, 2013.
6. *Campbell C. G.* Magnetohydrodynamics in binary stars / Изд. Dordrecht: Kluwer Acad. Publishers, 1997.
7. *Черепашук А. М.* Тесные двойные звезды Т. 1, Т. 2 / Изд. Москва: Физматлит, 2013.
8. *Бисикало Д. В., Жилкин А. Г., Боярчук А. А.* Структура течения в тесных двойных звёздах с учётом магнитного поля // *Усп. физ. наук.* 2012. Т. 182. №2. С. 121–145.
9. *Lubow S. H., Shu F. H.* Gas dynamics of semidetached binaries // *Astrophys. J.* 1975. V. 198. P. 383–405.