

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга

На правах рукописи

Подпись

Константин Леонидович Маланчев

Нестационарные процессы в астрофизических аккреционных дисках

01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена на кафедре экспериментальной астрономии Физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Шакура Николай Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга, заведующий отделом релятивистской астрофизики.

Официальные оппоненты:

- *Бикмаев Ильфан Фяритович*, доктор физико-математических наук, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, Казанский федеральный университет, Институт физики, заведующий кафедрой астрономии и космической геодезии.
- *Блинников Сергей Иванович*, доктор физико-математических наук, профессор, Институт теоретической и экспериментальной физики, главный научный работник лаборатории физики плазмы и астрофизики.
- *Лутовинов Александр Анатольевич*, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Институт космических исследований РАН, отдел Астрофизики высоких энергий, заведующий лаборатории релятивистских компактных объектов и рентгеновской навигации.

Защита диссертации состоится 22 июня 2017 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 при МГУ имени М. В. Ломоносова, расположенном по адресу: г. Москва, Университетский пр-т, дом 13.

E-mail: malanchev@physics.msu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М. В. Ломоносова (г. Москва, Ломоносовский пр-т, дом 27) и на сайте <http://istina.msu.ru/dissertations/53583915/>.

Автореферат разослан 16 мая 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Подпись С. О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность работы На сегодняшний день в астрофизике не существует единого мнения о детальном физическом механизме переноса момента импульса в аккреционных дисках. Поэтому α -модель Шакуры—Сюняева [1; 2] остаётся актуальной, причём способна довольно хорошо описывать наблюдения. Однако, применение этой модели для объяснения наблюдаемых кривых блеска рентгеновских и карликовых новых требует использовать довольно большие значения параметра $\alpha \gtrsim 0,1$. И, если для карликовых новых характерные значения α не превосходят 0,3 [3], то для рентгеновских новых могут требоваться значения более 0,5 [4]. Такие большие значения α , требуемые для объяснения наблюдений, с одной стороны, не объясняются в рамках современных расчётов магнитно-ротационной неустойчивости, а с другой стороны, ставят вопрос о применимости α -модели, в которой значение α ограничено сверху единицей. В связи с этим, модели, призванные в рамках α -теории объяснять наблюдения, должны быть достаточно точными, чтобы показать, что даже при оценках снизу параметра α получаются довольно большие значения.

Также, актуален вопрос о развитии неустойчивости в ламинарных аккреционных дисках. Существует несколько механизмов, которые для некоторых важных частных случаев демонстрируют развитие малых возмущений (например, магнитно-ротационная неустойчивость, о которой говорилось выше). Поэтому, интерес представляет поиск механизмов, которые могли бы привести к развитию турбулентности в ламинарном диске и обеспечить перенос момента импульса, описанный в рамках теории Шакуры—Сюняева.

Ещё одной актуальной задачей является развитие моделей, используемых для проведения глобального трёхмерного численного моделирования аккреционного течения в двойных системах. Проведение подобного моделирования может объяснить наблюдаемые нестационарные особенности взаимодействия струи с аккреционным диском. На данный момент существуют достаточно по-

дробные модели для таких расчётов, однако современное оборудование и методы моделирования позволяют усложнить эти модели, и использовать более детальное уравнение состояния аккрецирующего вещества.

Цели работы Целью работы является исследование различных нестационарных процессов в геометрически тонких аккреционных дисках.

- Одним из классов исследуемых объектов являются рентгеновские двойные системы с чёрными дырами. Исследованы особенности рентгеновских и оптических кривых блеска двух вспышек рентгеновских новых: A 0620—00 1975 года и 4U 1543—47 2002 года. Для вспышки A 0620—00 была поставлена задача объяснения вторичного пика на кривых блеска и построения единой модели эволюции аккреционного диска в течение первых ста дней после максимума светимости источника. Также, была поставлена задача о вертикальной структуре внешних частей диска, в которых водород частично ионизирован. Для вспышки в системе 4U 1543—47 целью работы являлось создание модели эволюции аккреционного диска, способной объяснить наблюдаемое короткое характерное время спада кривой блеска (около 15 дней) для системы с орбитальным периодом более суток. Кроме того, для определения параметров аккреционного диска требовалось создать быстрый программный код для подгонки модели под данные наблюдений.
- Исследован вопрос о построении структуры геометрически тонкого ламинарного аккреционного потока с микроскопическим коэффициентом вязкости и о конвективной устойчивости этой структуры. Требовалось разрешить этот вопрос для двух предельных случаев: потока, в котором можно пренебречь излучением, а перенос энергии осуществляется за счёт теплопроводности, и оптически толстого потока, в котором перенос энергии осуществляется излучением в условиях локального термодинамического равновесия.

- Рассмотрена задача об объяснении орбитальных кривых блеска затменной карликовой новой V 1239 Her в спокойном состоянии. Стояла задача дополнения системы гидродинамических уравнений, описывающих поведение аккреционного потока, уравнением состояния для частично ионизованного водорода. Для согласования с наблюдениями было необходимо разработать подход к расчёту кривой блеска на основе полученной в ходе численного расчёта трёхмерной структуры аккрецирующего вещества.

Научная новизна

- В работе разработана новая модель конвекции во внешних частях аккреционных дисков при частичной ионизации водорода. Указанная модель основывается на модели конвекции с длиной перемешивания, но включает в себя учёт вариации вязкого выделения энергии в конвективном потоке.
- Разработан программный код для решения уравнения вязкой эволюции аккреционного диска. Имеются две вариации данного кода: с численным расчётом вертикальной структуры с учётом рентгеновского облучения, конвекции и использованием табличных значений коэффициента непрозрачности, и с аналитическим расчётом вертикальной структуры, позволяющим быстро производить моделирования кривых блеска (код FREDDI).
- Впервые найдено аналитическое выражение для структуры ламинарного тонкого аккреционного потока с микроскопическими коэффициентами вязкости и теплопроводности. Найдено критическое значение числа Прандтля, при превышении которого такой поток становится конвективно неустойчивым по всей толщине.
- Найдены новые полуаналитические решения вертикальной структуры аккреционного диска для нескольких степенных зависимостей коэффициента непрозрачности от температуры и плотности и нескольких степенных зависимостей динамической вязкости от тех же величин. В том числе,

впервые построено полуаналитическое решение вертикальной структуры аккреционного диска со степенным законом непрозрачности, данным в работе К. Р. Белла и Д. Н. С. Лина (1994) [5] для температур порядка 10 000 – 100 000 К.

- Был разработан метод расчета болометрических орбитальных кривых блеска карликовых новых на основе данных численных трёхмерных гидродинамических расчётов.

Практическая значимость

- Код FREDDI¹, разработанный для моделирования кривых блеска рентгеновских новых, открыт и доступен всем желающим. FREDDI может быть использован как для моделирования оптических кривых и эволюции темпа аккреции блеска рентгеновских новых, так и для выявления общих закономерностей в эволюции аккреционных дисков в рентгеновских двойных системах.
- Разработанная модель конвекции во внешних частях аккреционного диска, в которых водород частично ионизован, может быть использована для уточнения численного расчёта структуры аккреционных дисков.
- Полученная структура ламинарного аккреционного диска с микроскопическими коэффициентами переноса может быть использована для решения задачи о поиске устойчивых и неустойчивых мод колебаний в таком диске. Наличие неустойчивых мод означает, что возмущения, наложенные на поток, будут расти экспоненциально, что может привести к возникновению турбулентности.
- Показано, что учёт частичной ионизации водорода в трёхмерных гидродинамических расчётах аккреции в тесных двойных системах важен для

¹ Исходный код можно найти на странице <http://xray.sai.msu.ru/~malanchev/freddi/>

правильного понимания геометрии структуры, образующейся при взаимодействии струи и диска.

Положения, выносимые на защиту

- Построена теория конвекции с длиной перемешивания в аккреционных дисках с учётом эффектов, связанных с генерацией энергии за счёт турбулентной вязкости.
- Создан программный код FREDDI, предназначенный для моделирования кривых блеска рентгеновских новых, демонстрирующих быстрый рост и экспоненциальный спад.
- Найдено решение для уравнений вертикальной структуры ламинарного потока с микроскопическими коэффициентами вязкости и теплопроводности. Показано, что в случае, когда потерями на излучение можно пренебречь, этот поток оказывается конвективно неустойчивым.
- Разработана физическая модель, предназначенная для расчета орбитальных кривых блеска карликовых новых по данным трехмерного гидродинамического расчета.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 5 публикациях в реферируемых изданиях:

1. *Malanchev K. L., Postnov K. A., Shakura N. I.* Convection in axially symmetric accretion discs with microscopic transport coefficients // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. 2017. Янв. Т. 464. С. 410—417. DOI: [10.1093/mnras/stw2348](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2348). arXiv: [1609.03799](https://arxiv.org/abs/1609.03799) [[astro-ph.HE](https://arxiv.org/archive/astro-ph)]
2. 3D modelling of accretion disc in eclipsing binary system V1239 Her / V. V. Lukin, K. L. Malanchev [и др.] // **Monthly Notices of the Royal**

Astronomical Society. 2017. Май. Т. 467. С. 2934–2942. DOI: [10.1093/mnras/stx309](https://doi.org/10.1093/mnras/stx309). arXiv: [1702.00587](https://arxiv.org/abs/1702.00587) [astro-ph.SR]

3. *Lipunova G. V., Malanchev K. L.* Determination of the turbulent parameter in the accretion disks: effects of self-irradiation in 4U 1543-47 during the 2002 outburst // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. 2017. DOI: [10.1093/mnras/stx768](https://doi.org/10.1093/mnras/stx768). eprint: [1610.01399](https://arxiv.org/abs/1610.01399) (astro-ph.HE)
4. *Маланчев К. Л., Шакура Н. И.* Вертикальная конвекция в турбулизованном аккреционном диске и кривые блеска вспышки рентгеновской Новой A0620–00 1975 года // **Письма в Астрономический журнал**. 2015. Т. 41, № 12. С. 859–871. DOI: [10.7868/S0320010815120086](https://doi.org/10.7868/S0320010815120086). arXiv: [1511.02356](https://arxiv.org/abs/1511.02356) [astro-ph.HE]
5. *Malanchev K.* Vertical convection in turbulent accretion disk and light curves of X-ray Nova A0620-00 // **Journal of Physics: Conference Series**. Т. 675. 02.2016. С. 032020. (Journal of Physics: Conference Series). DOI: [10.1088/1742-6596/675/3/032020](https://doi.org/10.1088/1742-6596/675/3/032020)

Кроме того, автор диссертации является соавтором 1 коллективной монографии [11], 1 реферируемой статьи [12], 3 тезиса докладов [13–15] и 1 астрономической телеграммы [16].

Апробация результатов работы

Результаты работы были доложены на 10 конференциях:

1. Международная школа «Cosmic accelerators» (Каржез, Франция, 2013): стендовый доклад «Non-stationary disk accretion in X-ray Novae».
2. XII всероссийская конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 2015): устный доклад «Исследование вторичного пика на кривых блеска рентгеновских Новых».

3. Международная конференция «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей» (ГАИШ МГУ, Москва, 2015): устный доклад «Численное моделирование нестационарной дисковой аккреции в рентгеновских Новых».
4. Международная конференция «Black Hole Accretion and AGN Feedback» (Шанхай, Китай, 2015): стендовый доклад «Non-stationary disk accretion in X-ray Novae».
5. Международный симпозиум «IUTAM Symposium on Growing solids» (Москва, 2015): устный доклад «Numerical Simulation of X-Ray Nova Light Curves».
6. Международная конференция «The International Conference on Particle Physics and Astrophysics» (МИФИ, Москва, 2015): устный доклад «Vertical convection in turbulent accretion disk and light curves of X-ray Nova A 0620–00».
7. Международная конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра HEA-2015» (ИКИ РАН, Москва, 2015): стендовый доклад «Вязкая эволюция аккреционного диска вокруг чёрной дыры в рентгеновской новой 4U 1543–47 2002 г.».
8. Всероссийская конференция «Успехи Российской астрофизики 2015: теория и эксперимент» (ГАИШ МГУ, Москва, 2015): устный доклад «Дисковая аккреция: вертикальная конвекция на периферии диска».
9. XIII всероссийская конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 2016): устный доклад «Модель эволюции аккреционного диска в широкой рентгеновской двойной 4U 1543–47 во время вспышки 2002 года»

10. Международная конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра НЕА-2016» (ИКИ РАН, Москва, 2016): стендовый доклад «Freddi — новый инструмент для моделирования рентгеновских Новых».

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 138 страниц, включая 30 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 171 ссылку.

Во **введении** дано общее описание темы исследования, даётся исторический обзор работ по теме. Обсуждаются актуальность диссертационной работы, её цель и новизна, практическая значимость. Также формулируются положения, выносимые на защиту, приводится список работ, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации, описывается личный вклад автора в проделанную работу, даётся обзор структуры и объёма диссертации.

Первая глава посвящена моделированию кривых блеска рентгеновских новых на примере знаменитой вспышки А 0620—00 1975 года. Описывается модель нестационарной дисковой аккреции, выводятся основные уравнения этой модели. Рассматривается вопрос о связи радиальных распределений поверхностной плотности диска и момента вязких сил в нём через решение уравнений вертикальной структуры аккреционного диска. Представлен вывод этих уравнений для внешних частей диска с учётом нескольких важных физических эффектов. Во-первых, принято во внимание наличие рентгеновского излучения, приходящего от внутренних частей аккреционного диска и падающего на внешние его части. Во-вторых, разработана модель вертикальной конвекции с длиной перемешивания, в которую включены эффекты, отвечающие за генерацию энергии вязкими силами. Разработанная модель применяется для моделирования оптической и рентгеновской кривых блеска рентгеновской новой А 0620—00 1975 года. Выдвигается гипотеза о дополнительном притоке массы со звезды-донора для объяснения вторичного максимума блеска на этих кривых. Демонстриру-

ются модельные кривые блеска и подобранные параметры турбулентной вязкости α для двух возможных масс чёрной дыры в этой системе: $6,6 M_{\odot}$ и $12 M_{\odot}$. Показано, что недостаток модельной оптической светимости системы по сравнению с наблюдениями, частично может быть объяснён добавлением постоянного третьего света, связанного, например, со светимостью прогретой звезды-компаньона или внешней части диска. В приложении к Главе изложены подробности используемой модели вертикальной конвекции.

Во **второй главе** рассматривается моделирование необычной рентгеновской новой 4U 1543–47 2002 года. Обсуждаются возможные сценарии быстрой наблюдаемой эволюции аккреционного диска с довольно большим приливным радиусом в этой двойной системе. Особое внимание в Главе уделяется рассмотрению эффектов рентгеновского самооблучения диска, от которых сильно зависит характер эволюции аккреционного диска. Для набора масс и параметров Керра чёрной дыры по данным рентгеновских наблюдений восстановлена зависимость темпа аккреции от времени в течении вспышки. Для разных параметров самооблучения с помощью программы FREDDI производится моделирование и подгонка параметров вспышки, в первую очередь параметра турбулентной вязкости α . Продемонстрировано, что типичные значения параметров самооблучения, используемые в литературе, слишком велики и не могут быть использованы для объяснения вспышки. Этот факт, независимо от численного моделирования вязкой эволюции диска, подтверждается на основании сопоставления оптических и рентгеновских наблюдений. В приложении к Главе дано описание кода FREDDI.

В **третьей главе** рассмотрена задача о конвективной устойчивости тонкого ламинарного аккреционного диска с микроскопическим коэффициентом вязкости. В первой части Главы записывается и решается уравнение энергии для случая, в котором можно пренебречь потерями на излучение. Исследуется конвективная устойчивость такого решения и вводится критическое значение числа Прандтля, выше значения которого течение оказывается конвективно неустойчивым. Во второй части Главы рассматривается задача о построении

решения уравнений вертикальной структуры аккреционного диска, в котором перенос энергии осуществляется излучением, но давление вещества преобладает над давлением излучения. Получен ряд новых решений вертикальной структуры диска с коэффициентами непрозрачности и вязкого энерговыделения, зависящими от плотности и температуры степенным образом. Также, эти решения исследованы на конвективную устойчивость, показано, что имеющиеся в литературе критерии конвективной неустойчивости таких течений являются необходимыми, но недостаточными.

В **четвёртой главе** идёт речь о трёхмерном газодинамическом численном моделировании движения аккрецирующего вещества в затменной карликовой новой V 1239 Her. В начале Главы описываются орбитальные кривые блеска этой системы в спокойном состоянии, кривые распределяются по трём группам. Далее приводится физическая модель, используемая в вычислениях. Модель включает в себя уравнения течения газа в гравитационном потенциале двух звёзд, учёт потерь энергии вещества на излучение и уравнение состояния для частично ионизованного водорода. Демонстрируется результат расчёта с использованием данной модели, полученные кривые блеска сравниваются с наблюдениями, выдвигается гипотеза об изменении темпа истечения вещества со звезды-компаньона для объяснения всех трёх групп орбитальных кривых блеска. На рисунках показана полученная в расчётах геометрия аккреционного диска, его взаимодействие со струёй втекающего вещества, приводится сравнение с результатами подобных работ.

Заключение посвящено перечислению основных результатов диссертации и обсуждению перспектив дальнейших исследований по её теме. Выказываются благодарности тем, без кого эта работа не состоялась бы.

Личный вклад автора Автор диссертации внёс существенный вклад в каждую часть данной работы. Ниже описан вклад автора по каждой из глав диссертации.

Личный вклад в Главу 1

На основе стандартной теории дисковой аккреции Шакуры—Сюняева [1; 2] построена модель нестационарного аккреционного диска во время вспышки рентгеновской новой в тесной двойной системе.

Вязкая эволюция аккреционного диска описывается с помощью уравнения диффузии [17; 18]. Для численного решения этого уравнения автором диссертации разработан специальный программный код, детальное описание которого представлено в Главе 2.

При решении задачи о вязкой эволюции аккреционного диска необходимо построение модели его вертикальной структуры. Темп аккреции на центральную чёрную дыру, который определяет рентгеновскую светимость источника, зависит от эволюции внешних частей диска, так как в этой области содержится подавляющая часть его массы. Поэтому, при составлении уравнений вертикальной структуры диска, не учитывались важные во внутренних его частях релятивистские эффекты и давление излучения. Уравнения гидростатического равновесия и уравнение для поверхностной плотности хорошо известны, и их вывод даётся для полноты описания.

В выражение для генерации энергии входят два слагаемых: первое отвечает за турбулентную вязкость, а второе за термализацию падающего из внутренних частей диска рентгеновского излучения. Выражение, описывающее нагрев диска за счёт рентгеновского самооблучения, получено автором диссертации на основе работы А. В. Мещерякова и др. (2011) [19] для приближения полубесконечного диска.

Перенос энергии вдоль вертикального направления осуществляется за счёт радиационной теплопроводности и конвекции [20; 21]. Для описания конвекции в диске используется теория конвекции с длиной перемешивания. Эта теория и ранее применялась в теории дисковой аккреции [22; 23], однако без учёта влияния генерации энергии на конвективное течение. Автором диссертации была

разработана модель конвекции с длиной перемешивания и учётом вязкого энерговыделения на основе модели, используемой для описания конвекции в звёздах [24]. Для расчёта используются табличные значения коэффициента непрозрачности из проекта OPAL [25] и работы Дж. В. Фергюсона и др. (2005) [26], интерполируемые с помощью сплайнов Акимы [27], гарантирующих отсутствие резких скачков значений.

Для решения полной системы уравнений вертикальной структуры автором диссертации был написан специальный программный код. Численное нахождение вертикальной структуры для одного набора входных параметров на одном процессорном ядре может занимать до нескольких секунд, поэтому программный код содержит несколько оптимизаций. Во-первых, при использовании многоядерной архитектуры, решение уравнений вертикальной структуры для каждого набора параметров производится на своём процессорном ядре. Во-вторых, при нахождении вертикальной структуры в качестве начального приближения используется найденное ранее решение с близкими значениями входных параметров. В-третьих, для экономии расчётного времени была использована таблица, содержащая искомые интегральные параметры диска. Эта таблица заполнялась значениями по ходу решения задачи о вязкой эволюции диска, а необходимые параметры диска получались в ходе интерполяции между ячейками таблицы. Полученная таблица после конца расчётов сохранялась и при необходимости использовалась заново.

С помощью разработанной программы автором было проведено моделирование эволюции аккреционного диска во время вспышки рентгеновской новой А 0620—00 1975 года. Для объяснения вторичного пика на кривых блеска была предложена гипотеза о дополнительном впрыске вещества со звезды-компаньона. В процессе численного моделирования считалось, что внешний радиус горячего диска смещается внутрь вместе с зоной тепловой неустойчивости, а во внешнем холодном диске аккреция полностью останавливается, как это было сделано в работе Г. В. Липуновой и Н. И. Шакуры (2003) [28]. Недостаток оп-

тического потока в модели через 70–100 дней после начала вспышки объяснён в рамках предположения о достаточно большой яркости звезды-компаньона, которая может быть нагрета рентгеновским излучением диска.

Личный вклад в Главу 2

Была разработана программа FREDDI, предназначенная для моделирования кривых блеска рентгеновских новых с быстрым ростом рентгеновской светимости и последующим экспоненциальным спадом. FREDDI решает уравнение вязкой эволюции аккреционного диска для случая модели вертикальной структуры, описанной в статьях Н. А. Кецариса и Н. И. Шакуры (1998) [29], В. Ф. Сулейманова и др. (2007) [18] и Главе 3. Непрозрачность вещества описывается одной из двух аппроксимаций численной непрозрачности: законом Крамерса или соотношением, данным в работе К. Р. Белла и Д. Н. С. Лина (1994) [5]. При использовании FREDDI в качестве начального условия может быть выбран один из нескольких законов, например, квазистационарное распределение, найденного в работе Г. В. Липуновой и Н. И. Шакуры (2000) [30], или распределение, задающее состояние диска до максимума вспышки. Таким образом, FREDDI может быть использован не только для описания поведения рентгеновской новой после максимума вспышки, но и для описания роста светимости аккреционного диска. FREDDI способен моделировать горячие аккреционные диски с уменьшающимся внешним радиусом, такое изменение размера горячего диска может происходить за счёт рекомбинации водорода и его перехода в холодное состояние, в котором вязкая эволюция сильно замедляется. Автором диссертации продемонстрировано, что при моделировании горячего (с температурой более 10 000 К) диска результаты вычисления FREDDI для обоих используемых законов непрозрачности не сильно отличаются от результатов, полученных кодом, описанным в Главе 1, который численно решает уравнения вертикальной структуры для табличных значений коэффициента непрозрачности. Код FREDDI написан на языке C++, имеет удобный интерфейс для использования в командной

строке и доступен всем желающим в Интернете.

Автором диссертации был разработан программный комплекс на основе FREDDI, предназначенный для подгонки параметров вспышки по зависимости темпа аккреции на чёрную дыру от времени. Этот программный комплекс был применён для нахождения параметра турбулентности α в горячем диске во время вспышки 4U 1543–47 2002 года для различных значений параметра самооблучения, массы и параметра Керра чёрной дыры. Было рассмотрено два случая: радиус горячего диска постоянен и радиус горячего диска определяется потоком рентгеновского облучения, падающего из внутренних частей диска. В первом случае было показано, что получаемая в процессе подгонки модель не может адекватно описать наблюдения в течении 30 дней после максимума блеска. Во втором случае модельная зависимость темпа аккреции на чёрную дыру от времени хорошо описывает точки, полученные соавтором этой работы Г. В. Липуновой из рентгеновских спектральных наблюдений.

Также, с помощью FREDDI были получены модельные оптические кривые блеска источника. Эти кривые блеска сравниваются с наблюдениями в полосах V и J [31]. Показано, что модель горячего аккреционного диска с размером, достигающим приливного радиуса, даёт оптический поток, существенно превышающий данные наблюдений. Модель же с переменным радиусом горячего диска удовлетворительно описывает оптические наблюдения.

Личный вклад в Главу 3

Описана вертикальная структура аккреционных дисков с вязкостью, определяемой микроскопическими процессами, для двух предельных случаев: 1) потери на излучение пренебрежимо малы, а перенос энергии осуществляется за счёт микроскопической теплопроводности, 2) перенос энергии происходит за счёт излучения.

В первом случае для получения уравнения энергии для вертикальной координаты используются коэффициенты теплопроводности и динамической вяз-

кости. В ряде важных физических случаев, в том числе для полностью ионизованного газа или молекулярного газа, эти коэффициенты зависят только от температуры. Автором диссертации было получено уравнение энергии для случая степенной зависимости коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности от температуры. Полученное уравнение является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка для вертикального распределения температуры. Автором диссертации было найдено решение этого уравнения через гипергеометрическую функцию Гаусса. Это решение было исследовано на предмет конвективной устойчивости. Было показано, что если число Прандтля в плоскости симметрии диска превышает критическое значение, которое зависит лишь от кривой вращения диска, то рассматриваемое решение не может быть конвективно устойчивым. Если число Прандтля меньше критического, но коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности зависят от температуры, то верхний слой течения всё равно конвективно неустойчив. Если же эти коэффициенты постоянны, то вертикальная структура диска будет политропной, причём показатель политропы будет зависеть лишь от безразмерных величин: числа Прандтля, удельных теплоёмкостей и кривой вращения диска.

Во втором случае рассмотрен диск, в котором генерация энергии осуществляется за счёт микроскопической вязкости, а перенос энергии — за счёт излучения. Для определения вертикального распределения температуры в этом случае потребовалось записать четыре уравнения вертикальной структуры вместо единственного уравнения энергии. Эти уравнения записаны для случая степенной зависимости коэффициентов непрозрачности и динамической вязкости от давления и температуры. Была разработана программа для численного решения этой системы уравнений, работа которой была верифицирована по результатам расчётов Н. А. Кецариса и Н. И. Шакуры (1998) [29], проведённых для α -диска и диска с постоянной удельной генерацией энергии. В результате численных расчётов автор диссертации показал, что конвекция, если она возникает, начнётся вблизи плоскости симметрии диска. Также было показано, что для

возникновения конвекции требуется очень резкая зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры. Было обнаружено, что если генерация энергии происходит за счёт ионной вязкости, а перенос энергии определяется процессами рассеяния, то вертикальная структура аккреционного течения оказывается близка к политропной с коэффициентом политропы $5/2$.

Личный вклад в Главу 4

Автор диссертации предложил метод учета частичной ионизации водорода для проведения численного трёхмерного газодинамического расчёта аккреции в катаклизмических переменных. На основе известных выражений [24; 32] было записано уравнение состояния газа, состоящего из частично ионизованного водорода.

Был разработан подход к расчёту кривой блеска в белом свете на основе полученной в ходе газодинамического моделирования структуры газа. Автор диссертации предложено использовать для вычисления оптической толщи усреднённый по Планку коэффициент поглощения, а для вычисления интенсивности излучения использовать усреднённую за временной шаг гидродинамического расчёта функцию охлаждения. Показано, что функция охлаждения и усреднённый по Планку коэффициент поглощения связаны друг с другом простым соотношением вследствие закона Кирхгофа. Автор диссертации показал, что точность вычисления наблюдаемого потока практически не зависит от выбора конкретного значения предельной оптической толщи, на которой измеряется интенсивность излучения, из широкого диапазона значений.

Для сопоставления модельной кривой блеска с данными наблюдений [33], была проведена свертка данных наблюдений с фазой орбитального периода.

Список литературы

1. *Шакура Н. И.* Дискковая модель аккреции газа релятивистской звездой в тесной двойной системе. // *Астрономический Журнал*. — 1972. — Окт. — Т. 49. — С. 921.
2. *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance. // *A&A*. — 1973. — Т. 24. — С. 337–355.
3. *Kotko I., Lasota J.-P.* The viscosity parameter α and the properties of accretion disc outbursts in close binaries // *A&A*. — 2012. — Сент. — Т. 545. — A115. — DOI: [10.1051/0004-6361/201219618](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219618). — arXiv: [1209.0017](https://arxiv.org/abs/1209.0017) [[astro-ph.SR](#)].
4. *Suleimanov V. F., Lipunova G. V., Shakura N. I.* Modeling of non-stationary accretion disks in X-ray novae A 0620-00 and GRS 1124-68 during outburst // *A&A*. — 2008. — Ноябрь. — Т. 491. — С. 267–277. — DOI: [10.1051/0004-6361:200810155](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810155). — arXiv: [0805.1001](https://arxiv.org/abs/0805.1001).
5. *Bell K. R., Lin D. N. C.* Using FU Orionis outbursts to constrain self-regulated protostellar disk models // *ApJ*. — 1994. — Июнь. — Т. 427. — С. 987–1004. — DOI: [10.1086/174206](https://doi.org/10.1086/174206). — eprint: [astro-ph/9312015](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9312015).
6. *Malanchev K. L., Postnov K. A., Shakura N. I.* Convection in axially symmetric accretion discs with microscopic transport coefficients // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. — 2017. — Янв. — Т. 464. — С. 410–417. — DOI: [10.1093/mnras/stw2348](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2348). — arXiv: [1609.03799](https://arxiv.org/abs/1609.03799) [[astro-ph.HE](#)].
7. 3D modelling of accretion disc in eclipsing binary system V1239 Her / V. V. Lukin [и др.] // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. — 2017. — Май. — Т. 467. — С. 2934–2942. — DOI: [10.1093/mnras/stx309](https://doi.org/10.1093/mnras/stx309). — arXiv: [1702.00587](https://arxiv.org/abs/1702.00587) [[astro-ph.SR](#)].

8. *Lipunova G. V., Malanchev K. L.* Determination of the turbulent parameter in the accretion disks: effects of self-irradiation in 4U 1543-47 during the 2002 outburst // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**. — 2017. — DOI: [10.1093/mnras/stx768](https://doi.org/10.1093/mnras/stx768). — eprint: [1610.01399](https://arxiv.org/abs/1610.01399) (astro-ph.HE).
9. *Маланчев К. Л., Шакура Н. И.* Вертикальная конвекция в турбулизованном аккреционном диске и кривые блеска вспышки рентгеновской Новой A0620–00 1975 года // **Письма в Астрономический журнал**. — 2015. — Т. 41, № 12. — С. 859–871. — DOI: [10.7868/S0320010815120086](https://doi.org/10.7868/S0320010815120086). — arXiv: [1511.02356](https://arxiv.org/abs/1511.02356) [astro-ph.HE].
10. *Malanchev K.* Vertical convection in turbulent accretion disk and light curves of X-ray Nova A0620-00 // **Journal of Physics: Conference Series**. Т. 675. — 02.2016. — С. 032020. — (Journal of Physics: Conference Series). — DOI: [10.1088/1742-6596/675/3/032020](https://doi.org/10.1088/1742-6596/675/3/032020).
11. Аккреционные процессы в астрофизике / Н. И. Шакура [и др.]. — Физматлит Москва, 2016. — С. 416. — ISBN 978-5-9221-1633-6.
12. The curtain remains open: NGC 2617 continues in a high state / V. L. Oknyansky [и др.] // **MNRAS**. — 2017. — Янв. — DOI: [10.1093/mnras/stx149](https://doi.org/10.1093/mnras/stx149). — arXiv: [1701.05042](https://arxiv.org/abs/1701.05042) [astro-ph.HE].
13. *Malanchev K. L., Meshcheryakov A. V., Shakura N. I.* Modeling of Light Curves of X-ray Novae // **Fifty years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies of the Sky. Conference of Young Scientists of CIS Countries** / под ред. А. М. Mickaelian, О. У. Malkov, N. N. Samus. — 05.2012. — С. 114–119.
14. *Маланчев К. Л., Липунова Г. В.* Модель эволюции аккреционного диска в широкой рентгеновской двойной 4U 1543–47 во время вспышки 2002 года // 13-я Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: Сборник трудов. — ИКИ РАН Москва, 2016. — С. 44–53. — (Механика, управление и информатика).

15. *Malanchev K. L., Postnov K. A., Shakura N. I.* A Viscous-convective Instability in Laminar Keplerian Thin Discs // Proceedings of the meeting Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today. — Edit Print Erevan, 2016. — С. 331—337. — arXiv: [1603.04878](https://arxiv.org/abs/1603.04878).
16. New outburst of NGC 2617 / V. L. Oknyansky [и др.] // The Astronomer's Telegram. — 2016. — Май. — Т. 9050.
17. *Lyubarskij Y. E., Shakura N. I.* Nonlinear self-similar problems of nonstationary disk accretion // Soviet Astronomy Letters. — 1987. — Окт. — Т. 13. — С. 386.
18. *Suleimanov V. F., Lipunova G. V., Shakura N. I.* The thickness of accretion α -disks: Theory and observations // Astronomy Reports. — 2007. — Июль. — Т. 51. — С. 549—562. — DOI: [10.1134/S1063772907070049](https://doi.org/10.1134/S1063772907070049).
19. *Mescheryakov A. V., Shakura N. I., Suleimanov V. F.* Vertical structure of the outer accretion disk in persistent low-mass X-ray binaries // Astronomy Letters. — 2011. — Май. — Т. 37. — С. 311—331. — DOI: [10.1134/S1063773711050045](https://doi.org/10.1134/S1063773711050045). — arXiv: [1108.4222](https://arxiv.org/abs/1108.4222) [astro-ph.HE].
20. *Бисноватый-Коган Г. С., Блинные С. И.* Горячая корона вокруг диска, аккрецирующего на чёрную дыру, и модель источника Лебедь X-1 // Письма в Астрономический журнал. — 1976. — Окт. — Т. 2. — С. 489—493.
21. *Bisnovatyji-Kogan G. S., Blinnikov S. I.* Disk accretion onto a black hole at subcritical luminosity // A&A. — 1977. — Июль. — Т. 59. — С. 111—125.
22. *Smak J.* Accretion in cataclysmic binaries. I - Modified alpha-disks with convection // Acta Astron. — 1982. — Т. 32. — С. 199—211.
23. Accretion disc outbursts: a new version of an old model / J.-M. Hameury [и др.] // MNRAS. — 1998. — Авг. — Т. 298. — С. 1048—1060.
24. Cox and Giuli's Principles of Stellar Structure / A. Weiss [и др.]. — 2004.

25. *Iglesias C. A., Rogers F. J.* Updated Opal Opacities // ApJ. — 1996. — ИЮНЬ. — Т. 464. — С. 943. — DOI: [10.1086/177381](https://doi.org/10.1086/177381).
26. Low-Temperature Opacities / J. W. Ferguson [и др.] // ApJ. — 2005. — АПР. — Т. 623. — С. 585—596. — DOI: [10.1086/428642](https://doi.org/10.1086/428642). — eprint: [astro-ph/0502045](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0502045).
27. *Akima H.* Algorithm 761: scattered-data surface fitting that has the accuracy of a cubic polynomial // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). — 1996. — Т. 22, № 3. — С. 362—371.
28. *Lipunova G. V., Shakura N. I.* // Izvestia Akademii Nauk, Seria Fizicheskaya. — 2003. — МАРТ. — Т. 67. — С. 322—327.
29. *Ketsaris N. A., Shakura N. I.* On the Calculation of the Vertical Structure of Accretion Discs // Astronomical and Astrophysical Transactions. — 1998. — Т. 15. — С. 193. — DOI: [10.1080/10556799808201769](https://doi.org/10.1080/10556799808201769).
30. *Lipunova G. V., Shakura N. I.* New solution to viscous evolution of accretion disks in binary systems // A&A. — 2000. — АПР. — Т. 356. — С. 363—372. — eprint: [astro-ph/0103274](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0103274).
31. *Buxton M. M., Bailyn C. D.* The 2002 Outburst of the Black Hole X-Ray Binary 4U 1543-47: Optical and Infrared Light Curves // ApJ. — 2004. — НОЯБ. — Т. 615. — С. 880—886. — DOI: [10.1086/424503](https://doi.org/10.1086/424503). — eprint: [astro-ph/0408156](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0408156).
32. *Landau L. D., Lifshitz E. M.* Statistical physics. Pt.1, Pt.2. — 1980.
33. The dwarf nova V1239 herculis in quiescence / Т. S. Khruzina [и др.] // Astronomy Reports. — 2015. — АПР. — Т. 59. — С. 288—312. — DOI: [10.1134/S1063772915040034](https://doi.org/10.1134/S1063772915040034).