

На правах рукописи

Максимова Ломара Аслановна

**Влияние конвективной неустойчивости и  
поверхностных тепловых волн на структуру  
и эволюцию протопланетного диска**

1.3.1. – Физика космоса, астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

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

**Научный руководитель:**

д.ф.-м.н. Павлюченков Ярослав Николаевич, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института астрономии РАН, г. Москва

**Официальные оппоненты:**

д.ф.-м.н., профессор Гринин Владимир Павлович, заведующий лабораторией звездообразования ФГБУН Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН

к.ф.-м.н., Стояновская Ольга Петровна, старший научный сотрудник ФГБУН Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 15 декабря 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки 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 «12» октября 2023 года.

Учёный секретарь диссертационного совета

24.1.032.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы** В последние годы изучение протопланетных дисков — объектов из газа и пыли вокруг молодых звезд — становится всё более востребованным направлением в астрофизике. Протопланетный диск формируется в результате коллапса плотного ядра межзвёздного молекулярного облака, и его формирование неразрывно связано с эволюцией молодой звезды. Изучение этих объектов — важная и интересная задача, поскольку она помогает углубить понимание механизмов образования планет и условий их формирования, приоткрывая завесу тайны происхождения планетных систем, включая Солнечную, а также объяснить наблюдательные характеристики молодых звёзд и свойственные им проявления активности.

Исследование протопланетных дисков особенно актуально в наши дни, когда имеется беспрецедентная техническая оснащённость телескопами. Первые прямые изображения протопланетных дисков были получены ещё в 1990-х гг. с помощью космического телескопа им. Хаббла [1], однако детальное рассмотрение структуры диска стало возможно на три десятилетия позже благодаря телескопам Subaru [2] и VLT/SPHERE [3] (Very Large Telescope). Колоссальный прорыв в изучении дисков обеспечил и продолжает стимулировать интерферометр ALMA (Atacama Large Millimeter Array) с разрешающей способностью лучше  $1''$  [4], обнаруживший в дисках разнообразие морфологические особенности [5, 6]: светлые кольца, провалы, спиральные структуры. Принципиально новые наблюдательные данные о спектрах, химическом составе и молекулах в протопланетных дисках предлагает орбитальная инфракрасная обсерватория

им. Джеймса Уэбба JWST (James Webb Space Telescope), запущенная в 2021 году.

Разнообразие наблюдаемых морфологических структур дисков стимулирует разработку множества моделей, учитывающих роль различных физических и химических факторов в эволюции протопланетных дисков. Популярными являются модели гравитационной неустойчивости диска, магнитогидродинамической модели вязкого диска, модели, описывающие астрохимическую эволюцию диска, динамику пыли в нем, и пр. Однако ключевой задачей является выявление из всех рассматриваемых механизмов одного или нескольких, играющих первостепенную роль при решении конкретной задачи. Например, необходимой основой для формирования планетезималей (зародышей будущих планет) считается возможность развития потоковой неустойчивости в диске [7]. Тем не менее, несмотря на большие наблюдательные и теоретические достижения в изучении протопланетных дисков, многие вопросы физики дисков окончательно не решены.

В частности, актуальным является вопрос о механизме переноса массы и углового момента, обеспечивающем аккрецию газа. Гравитационная неустойчивость может приводить к тому, что возмущения плотности в диске вырастают в спиральные рукава, обеспечивая эффективную передачу углового момента наружу [9]. Также, к переносу углового момента может приводить и турбулентная вязкость, однако механизм турбулизации вещества до сих пор является дискуссионным. В литературе рассмотрены разные возможные причины возникновения турбулентности, например, магнито-ротационная неустойчивость [9], идея отвода углового момента с помощью магнитного ветра [10], глобальная бароклинная неустойчивость [11]. Во внутренних областях протопланетных

дисков могут складываться условия для возникновения конвекции аккрецируемого газа в полярных направлениях, которая может оказывать влияние на эволюцию диска и, возможно, приводить к турбулизации вещества.

К особенностям некоторых современных численных моделей можно отнести рассмотрение диска исключительно в экваториальной плоскости, лишь приближенно моделируя вертикальную структуру диска. Подобный подход, реализованный, например, в численной модели FEOSAD [12], позволяет получать ценные результаты, например, о существовании гравитационно связанных сгустков на ранних этапах формирования диска и их взаимосвязи со вспышками молодых звезд [13]. Однако подобные модели непригодны для детального рассмотрения конвективной неустойчивости, процессов осаждения пыли или меридиональных течений.

Данная работа, основанная на моделях с детальным восстановлением вертикальной структуры диска, посвящена изучению ряда механизмов, вызывающих неустойчивости в диске. В первой главе рассматривается конвективная неустойчивость, приводящая к эпизодической аккреции в молодом протопланетном диске. С использованием формализма вязкого аккреционного диска и детального восстановления вертикальной структуры диска, исследована устойчивость выявленного характера нерегулярной аккреции и моделируется долговременная эволюция протопланетного диска. Вторая глава посвящена исследованию поверхностных тепловых волн. В ней описана  $1+1D$  модель, иллюстрирующая возможность возникновения тепловых волн на поверхности диска. Третья глава посвящена  $2D$  моделированию, где демонстрируется важность тщательного расчета гидродинамических и радиационных процессов, которые приводят к более быстрой релаксации тепловых неоднородностей

в диске, чем в 1+1D случае.

## **Цели диссертационной работы**

1. Исследовать влияние конвективной неустойчивости в протопланетных дисках на их эволюцию и структуру.
2. Детально исследовать неустойчивость протопланетного диска, связанную с эффектами затенения звездного излучения поверхностными неоднородностями.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Показано, что в протопланетных дисках могут реализовываться условия для возникновения конвективной неустойчивости при наличии дополнительного механизма нагрева (например, фоновой вязкости). Продемонстрировано, что конвекция посредством эпизодической турбулизации диска обеспечивает вспышечный режим аккреции. Характер аккреции вещества из диска на звезду (регулярный, вспышечный или слабоосциллирующий) и параметры возникающих вспышек (интенсивность, продолжительность, период) зависят от темпа притока вещества из оболочки на диск и его эволюции со временем. Нестационарный режим аккреции, обусловленный конвекцией, может быть одним из физических механизмов, ответственных за вспышки светимости у молодых звезд.
2. Исследованы условия возникновения поверхностных тепловых волн, которые предлагаются в качестве одного из механизмов формирования кольцеобразных морфологических структур в протопланет-

ных дисках. Показано, что такие волны действительно возникают при рассмотрении диска в  $1+1D$ -приближении. Впервые показано, что механизм возбуждения этих волн может ограничиваться только приповерхностными слоями.

3. В рамках модели протопланетного диска умеренной массы показано, что совместный учет двумерных эффектов, связанных с гидродинамикой и переносом теплового излучения, подавляет развитие поверхностных тепловых волн. Высказано предположение, что этот эффект может быть критичным и в более общем случае.

**Научная новизна** В рамках данной диссертационной работы исследованы условия возникновения конвекции в рамках модели с детальным восстановлением вертикальной структуры диска. Впервые показано, что в протопланетных дисках конвекция может стать триггером для нерегулярного характера аккреции. Также впервые показано, что параметры вспышек (интенсивность, продолжительность, период) и режим аккреции (регулярный, вспышечный или слабоосциллирующий), вызванные конвективной неустойчивостью, могут меняться в ходе эволюции диска.

Впервые в рамках  $1+1D$  подхода показано, что механизм возбуждения поверхностных тепловых волн может работать в приповерхностных слоях, и оценены характерные времена распространения возмущений, которые при определенных условиях могут быть существенно короче характерного теплового времени, что отличается от выводов других авторов.

Создана двумерная динамическая модель протозвездного диска с детальным расчетом тепловой структуры, которая позволила впервые

оценить важность учета двумерных эффектов при исследовании поведения поверхностных тепловых волн.

**Научная и практическая значимость** Результаты диссертации представляют интерес для специалистов в области изучения протопланетных дисков и теории звездообразования. Исследованный нестационарный режим аккреции, обусловленный конвекцией, может представлять интерес для научных групп, занимающихся моделированием эволюции не только протопланетных дисков, но и дисков в катаклизмических системах. Полученные выводы о развитии поверхностных тепловых волн должны учитываться при интерпретации наблюдений протопланетных дисков.

**Методология и методы исследования** Задачи диссертации решались при помощи численного моделирования собственными кодами. Разработка методов и их реализация в программах проводились на вычислительном кластере ИНАСАН. Результаты анализировались с помощью авторского программного обеспечения.

**Достоверность представленных результатов** Степень достоверности представленных в диссертационной работе результатов подтверждается сравнением с данными других авторов и обсуждением полученных результатов диссертации на научных конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации были представлены на российских и за-



рубежных конференциях и семинарах в качестве устных и стендовых докладов:

1. 48-я студенческая научная конференция "Физика Космоса" (Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 28 января – 01 февраля 2019);
2. Международная конференция "CHALLENGES AND INNOVATIONS IN COMPUTATIONAL ASTROPHYSICS" (ИНАСАН, Санкт-Петербург, 16 – 20 сентября 2019);
3. Международный семинар "The UX Ori type stars and related topics" (КрАО РАН, ГАО РАН, Санкт-Петербург, 30 сентября – 4 октября 2019);
4. Конкурс молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 24 октября 2019);
5. 49-я студенческая научная конференция "Физика Космоса" (Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 27 – 31 января 2020);
6. Международная школа и рабочее совещание "Исследования экзопланет — 2020" для молодых учёных и студентов (ИНАСАН, Москва, 9 – 12 октября 2020, онлайн);
7. Конкурс молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 5 ноября 2020);
8. Конференция "Звездообразование и планетообразование" (АКЦ ФИАН, Москва, 10 – 11 ноября 2020);

9. Международная школа “Исследования экзопланет — 2021” для молодых ученых и студентов (ИНАСАН, Москва, 15 – 16 октября 2021);
10. Международная конференция "The Predictive Power Of Computational Astrophysics As A Discovery Tool"(IAU Symposium 362, онлайн, 8 – 12 ноября 2021);
11. Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования"(ИКИ РАН, Москва, 13 – 15 апреля 2022);
12. Всероссийская конференция "Нестационарные процессы в протопланетных дисках и их наблюдательные проявления"(КрАО РАН, п. Научный, Крым, 11 – 16 сентября 2022);
13. Конкурс молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 15 ноября 2022);
14. Международная школа “Исследования экзопланет – 2022” для молодых ученых и студентов (ИНАСАН, Москва, 17 – 18 ноября 2022);
15. 50-я студенческая научная конференция "Физика Космоса"(Коуровская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 30 января – 3 февраля 2023).

**Личный вклад автора** Соискательница участвовала в постановке задач, написании кода, получении и обработке результатов численных экс-

периментов, проводила расчеты, совместно с соавторами участвовала в обсуждении результатов и формулировке выводов.

В частности, соискательницей:

1. преобразована модель 1+1D-мерной структуры диска в динамическую модель вязкой эволюции диска; для решения этой задачи разработан модуль, ответственный за конечно-разностный метод решения уравнения Прингла;
2. разработана и реализована модель долговременной эволюции конвективно-неустойчивого диска;
3. исследованы особенности нерегулярного характера аккреции для различных параметров;
4. исследованы ограничения модели, связанные с гравитационно-неустойчивыми областями диска;
5. проведен детальный анализ особенностей распределения плотности диска в двумерной модели и определены оптимальные параметры метода моделирования;
6. предложен и реализован метод расчета гидростатического равновесия в двумерной модели;
7. разработан комплекс программ для обработки и визуализации получаемых данных.

**Структура и объём диссертации** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Число страниц в диссертации 118, рисунков 30,

таблица 1. Список литературы содержит 85 наименований. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 4 входит в перечень ВАК.

## Содержание работы

**Во Введении** представлен краткий обзор предмета исследования и содержания диссертационной работы. Описаны актуальность диссертационной работы, цели и задачи, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлена информация по апробации результатов, научным публикациям по результатам исследований и вкладу автора в работу.

**В Главе 1** рассмотрена роль конвекции в осуществлении эпизодического характера аккреции в протопланетном диске при наличии фоновой вязкости.

В данной главе изучаются условия возникновения конвекции и крупномасштабная эволюция конвективного кеплеровского диска на базе модели, особенностью которой является детальный расчет вертикальной структуры диска и учет постоянной аккреции газа на диск из околозвездной оболочки. В Главе 1 демонстрируется, что конвективная неустойчивость возникает при широком наборе параметров модели и оценивается их влияние на характер аккреционного режима. Помимо этого, в Главе 1 рассмотрена долговременная эволюция конвективно-неустойчивого диска.

В разделе 1.1 дается описание исследуемого диска в рамках базовой модели, после чего приведены результаты моделирования и их обсуждение. Целью раздела 1.2 является более детальное исследование нерегулярного аккреционного режима, полученного в предыдущем разделе.

Представлен анализ поведения модели в пространстве исследуемых параметров: сначала дается краткое описание варьируемых параметров, затем описывается их влияние на характер аккреции в рамках простейшего описания падения вещества из оболочки. Раздел 1.3 посвящен исследованию долговременной эволюции диска при более реалистичном описании аккреции вещества из оболочки. В разделе 1.4 кратко перечислены результаты данного исследования.

Основные результаты опубликованы в работах [A1] и [A2].

**В Главе 2** представлены результаты моделирования поверхностных тепловых волн в  $1+1D$  приближении.

Целью данной главы является исследование поверхностной тепловой неустойчивости в рамках более детальной численной модели протопланетного диска, в которой одновременно решается задача переноса излучения звезды в двумерном вертикальном срезе и учитывается нестационарность тепловой структуры диска на всем вертикальном масштабе диска. Моделирование эволюции диска в рамках описанного  $1+1D$ -приближения показывает, что в диске самопроизвольно возникают возмущения, бегущие по направлению к звезде. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости изучения данной неустойчивости в рамках более согласованной модели.

Описание модифицированной модели из Главы 1, в которой при вычислении функции нагрева звездным излучением является принципиально важным учитывать радиальный градиент плотности внутри ячейки, представлено в разделе 2.1. Результаты моделирования самопроизвольно возникающих возмущений в диске в рамках  $1+1D$ -приближения представлены в разделе 2.2. Обсуждение полученных результатов и сравнение с работами других авторов представлено в разделе 2.3.

Основные результаты опубликованы в работе [A3].

**В Главе 3** демонстрируется важность учета двумерных эффектов при моделировании эффектов самозатенения диска.

Целью данной главы является учет процессов динамики газа и диффузии ИК излучения в возбуждении поверхностных тепловых волн. Это исследование проводится с помощью полностью двумерной радиационной гидродинамической модели. В рамках данной модели также реализованы упрощающие предположения 1+1D подходов с целью определения их обоснованности. По результатам данной модели можно сделать глобальный вывод о том, что совместный учет двумерной гидродинамики и переноса теплового излучения подавляет формирование и распространение поверхностных тепловых волн в газопылевых дисках.

В разделе 3.1 описана используемая аксиально-симметричная модель протопланетного диска. Гидродинамический метод подробно описан в разделе 3.1.1, а методу расчета переноса излучения посвящен раздел 3.1.2. Граничные и начальные условия обсуждаются в разделе 3.1.3. Раздел 3.2 посвящен приближенным моделям газопылевого диска, а в разделе 3.3 представлены результаты моделирования. Заключение к Главе 3 представлено в разделе 3.4.

Основные результаты опубликованы в работе [A4].

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

## Публикации по теме диссертации

### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] Pavlyuchenkov Ya. N., Tutukov A. V., **Maksimova L. A.**, & Vorobyov E. I. (2020) Evolution of a Viscous Protoplanetary Disk with Convectively Unstable Regions // *Astronomy Reports* — 2020. — V. 64. — Pp. 1-14.
- [A2] **Maksimova L. A.**, Pavlyuchenkov Ya. N., & Tutukov A. V. (2020) Evolution of a Viscous Protoplanetary Disk with Convectively Unstable Regions. II. Accretion Regimes and Long-Term Dynamics // *Astronomy Reports* — 2020. — V. 64. — Pp. 815-826.
- [A3] Pavlyuchenkov Ya. N., **Maksimova L. A.**, & Akimkin V. V. (2022) Simulation of Thermal Surface Waves in a Protoplanetary Disk in 1+1D Approximation // *Astronomy Reports* — 2022. — V. 66. — Pp. 321-329.
- [A4] Pavlyuchenkov Ya. N., **Maksimova L. A.**, & Akimkin V. V. (2022) Simulation of Thermal Surface Waves in a Protoplanetary Disk in 2D Approximation // *Astronomy Reports* — 2022. — V. 66. — Pp. 800-810.

### Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] **Максимова Л. А.**, Павлюченков Я. Н., Тутуков А. В. Моделирование вязкой эволюции протопланетного диска с учетом образования конвективно-неустойчивых областей // Физика Космоса: труды 48-ой Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 28 янв. - 1 февр. 2019г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2019. — Т. 1. — С. 184.

- [B2] *Максимова Л. А., Павлюченков Я. Н.* Эпизодическая аккреция в протопланетных дисках как результат конвективной неустойчивости // Физика Космоса: труды 49-ой Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 27 - 31 янв. 2020г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2020. — Т. 1. — С. 265.
- [B3] *Максимова Л. А., Павлюченков Я. Н., Воробьев Э. И.* Анализ конвективно-неустойчивых областей, возникающих при моделировании эволюции протопланетного диска // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019 г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2019. — С. 27–33.
- [B4] *Lomara Maksimova, Yaroslav Pavlyuchenkov.* Long-Term Evolution of Convectively Unstable Disk // Proceedings of the International Astronomical Union, Symposium S362: The Predictive Power of Computational Astrophysics as a Discovery Tool (June 2020). — Cambridge University Press — 2023 — Vol. 16 — pp. 306–308
- [B5] *Максимова Л. А., Павлюченков Я. Н., Акимкин В. В.* Моделирование поверхностных тепловых волн в двумерном приближении // Физика космоса: труды 50-ой Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 янв. – 3 фев. 2023г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2023. — Т. 1. — С. 634.

## Цитируемая литература

1. *O'dell & Wen (1994)* Postrefurbishment Mission Hubble Space Telescope Images of the Core of the Orion Nebula: Proplyds,



- Herbig-Haro Objects, and Measurements of a Circumstellar Disk // *Astrophys. J* — 1994. — V. 436. — Pp. 194.
2. *Hashimoto et al. (2011)* Direct Imaging of Fine Structures in Giant Planet-forming Regions of the Protoplanetary Disk Around AB Aurigae // *Astrophys. J. Let* — 2011. — V. 729. — Pp. L17.
  3. *Avenhaus et al. (2018)* Disks around T Tauri Stars with SPHERE (DARTTS-S). I. SPHERE/IRDIS Polarimetric Imaging of Eight Prominent T Tauri Disks // *Astrophys. J* — 2018. — V. 863. — Pp. 44.
  4. *ALMA Partnership et al. (2015)* The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region // *Astrophys. J. Let* — 2015. — V. 808. — Pp. L3.
  5. *Andrews et al. (2018)* The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). I. Motivation, Sample, Calibration, and Overview // *Astrophys. J. Let* — 2018. — V. 869. — Pp. L41.
  6. *Parker, Ward-Thompson, & Kirk (2022)* Taxonomy of protoplanetary discs observed with ALMA // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2022. — V. 511. — Pp. 2453-2490.
  7. *Simon, Armitage, Youdin, & Li (2017)* Planetesimal Formation in Protoplanetary Disks // *Accretion: Building New Worlds Conference* — 2017. — V. 2043. — Pp. 2022.
  8. *Durisen et al. (2007)* Gravitational Instabilities in Gaseous Protoplanetary Disks and Implications for Giant Planet Formation // *Protostars and Planets V* — 2007. — V. . — Pp. 607.
  9. *Balbus & Hawley (1991)* A Powerful Local Shear Instability in Weakly Magnetized Disks. I. Linear Analysis // *Astrophys. J* — 1991. — V. 376. — Pp. 214.

10. *Zagaria, Rosotti, Clarke, & Tabone (2022)* Modelling the secular evolution of protoplanetary disc dust sizes - a comparison between the viscous and magnetic wind case // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2022. — V. 514. — Pp. 1088-1106.
11. *Klahr & Bodenheimer (2003)* Turbulence in Accretion Disks: Vorticity Generation and Angular Momentum Transport via the Global Baroclinic Instability // *Astrophys. J* — 2003. — V. 582. — Pp. 869-892.
12. *Vorobyov et al. (2018)* Early evolution of viscous and self-gravitating circumstellar disks with a dust component // *Astron. and Astrophys* — 2018. — V. 614. — Pp. A98.
13. *Vorobyov & Basu (2007)* Self-regulated gravitational accretion in protostellar discs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2007. — V. 381. — Pp. 1009-1017.
14. *Vorobyov & Pavlyuchenkov (2017)* Improving the thin-disk models of circumstellar disk evolution. The 2+1-dimensional model // *Astron. and Astrophys* — 2017. — V. 606. — Pp. A5.
15. *Cameron (1978)* Physics of the Primitive Solar Accretion Disk // *Moon and Planets* — 1978. — V. 18. — Pp. 5-40.
16. *Lin & Papaloizou (1980)* On the structure and evolution of the primordial solar nebula // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 1980. — V. 191. — Pp. 37-48.
17. *Klahr (2007)* Thermal convection in accretion disks // *Convection in Astrophysics* — 2007. — V. 239. — Pp. 405-416.
18. *Cabot, Canuto, Hubickyj, & Pollack (1987)* The role of turbulent convection in the primitive solar nebula II. Results // *Icarus* — 1987. — V. 69. — Pp. 423-457.

19. *Cabot, Canuto, Hubickyj, & Pollack (1987)* The role of turbulent convection in the primitive solar nebula I. Theory // *Icarus* — 1987. — V. 69. — Pp. 387-422.
20. *Klahr, Henning, & Kley (1999)* On the Azimuthal Structure of Thermal Convection in Circumstellar Disks // *Astrophys. J* — 1999. — V. 514. — Pp. 325-343.
21. *Held & Latter (2018)* Hydrodynamic convection in accretion discs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2018. — V. 480. — Pp. 4797-4816.
22. *Shakura & Postnov (2015)* A viscous instability in axially symmetric laminar shear flows // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2015. — V. 448. — Pp. 3707-3717.
23. *Shakura & Postnov (2015)* A viscous-convective instability in laminar Keplerian thindiscs - II. Anelastic approximation // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2015. — V. 451. — Pp. 3995-4004.
24. *Armitage (2011)* Dynamics of Protoplanetary Disks // *An. Rev. Astron. Astrophys* — 2011. — V. 49. — Pp. 195-236.
25. *Pringle (1981)* Accretion discs in astrophysics // *An. Rev. Astron. Astrophys* — 1981. — V. 19. — Pp. 137-162.
26. *Williams & Cieza (2011)* Protoplanetary Disks and Their Evolution // *An. Rev. Astron. Astrophys* — 2011. — V. 49. — Pp. 67-117.
27. *Hartmann, Calvet, Gullbring, & D'Alessio (1998)* Accretion and the Evolution of T Tauri Disks // *Astrophys. J* — 1998. — V. 495. — Pp. 385-400.
28. *Shakura & Sunyaev (1973)* Black holes in binary systems. Observational appearance. // *Astron. and Astrophys* — 1973. — V. 24. — Pp. 337-355.
29. *Chiang & Goldreich (1997)* Spectral Energy Distributions of T Tauri

- Stars with Passive Circumstellar Disks // *Astrophys. J* — 1997. — V. 490. — Pp. 368-376.
30. *Cossins, Lodato, & Clarke (2009)* Characterizing the gravitational instability in cooling accretion discs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2009. — V. 393. — Pp. 1157-1173.
  31. *Landau & Lifshitz (1959)* Fluid mechanics // *Course of theoretical physics* — 1959. — V. . — Pp. .
  32. *Dullemond, Natta, & Testi (2006)* Accretion in Protoplanetary Disks: The Imprint of Core Properties // *Astrophys. J. Let* — 2006. — V. 645. — Pp. L69-L72.
  33. *Chacón-Tanarro et al. (2019)* Dust opacity variations in the pre-stellar core L1544 // *Astron. and Astrophys* — 2019. — V. 623. — Pp. A118.
  34. *Klapp et al. (2014)* Rotationally Induced Fragmentation in the Prestellar Core L1544 // *Astrophys. J* — 2014. — V. 780. — Pp. 188.
  35. *Pavlyuchenkov, Akimkin, Topchieva, & Vorobyov (2023)* Effect of Dust Evaporation and Thermal Instability on Temperature Distribution in a Protoplanetary Disk // *Astronomy Reports* — 2023. — V. 67. — Pp. 470-482.
  36. *Vorobyov et al. (2018)* Knotty protostellar jets as a signature of episodic protostellar accretion? // *Astron. and Astrophys* — 2018. — V. 613. — Pp. A18.
  37. *Scholz, Froebrich, & Wood (2013)* A systematic survey for eruptive young stellar objects using mid-infrared photometry // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2013. — V. 430. — Pp. 2910-2922.
  38. *Audard et al. (2014)* Episodic Accretion in Young Stars // *Protostars and Planets VI* — 2014. — V. . — Pp. 387.
  39. *Zhu, Hartmann, Gammie, & McKinney (2009)* Two-dimensional

- Simulations of FU Orionis Disk Outbursts // *Astrophys. J* — 2009. — V. 701. — Pp. 620-634.
40. Vorobyov & Basu (2006) The Burst Mode of Protostellar Accretion // *Astrophys. J* — 2006. — V. 650. — Pp. 956-969.
41. Milliner, Matthews, Long, & Hartmann (2019) Disc wind models for FU Ori objects // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2019. — V. 483. — Pp. 1663-1673.
42. Липунова & Шакура (2003) Модель вторичного пика на кривых блеска рентгеновских Новых // *Известия Российской академии наук. Серия физическая* — 2003. — Т. 67. — С. 322-327.
43. Hirose et al. (2014) Convection Causes Enhanced Magnetic Turbulence in Accretion Disks in Outburst // *Astrophys. J* — 2014. — V. 787. — Pp. 1.
44. Coleman et al. (2016) Dwarf nova outbursts with magnetorotational turbulence // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2016. — V. 462. — Pp. 3710-3726.
45. Hawley & Balbus (1991) A Powerful Local Shear Instability in Weakly Magnetized Disks. II. Nonlinear Evolution // *Astrophys. J* — 1991. — V. 376. — Pp. 223.
46. Vorobyov et al. (2019) Gravitoviscous protoplanetary disks with a dust component. I. The importance of the inner sub-au region // *Astron. and Astrophys* — 2019. — V. 627. — Pp. A154.
47. Natta, Testi, & Randich (2006) Accretion in the  $\rho$ -Ophiuchi pre-main sequence stars // *Astron. and Astrophys* — 2006. — V. 452. — Pp. 245-252.
48. Ercolano et al. (2014) The  $\dot{M}$ - $M_*$  relation of pre-main-sequence stars: a consequence of X-ray driven disc evolution // *Monthly Notices*

- Roy. Astron. Soc* — 2014. — V. 439. — Pp. 256-263.
49. *Shakura (1972)* Disk Model of Gas Accretion on a Relativistic Star in a Close Binary System. // *Astron. J* — 1972. — V. 49. — Pp. 921.
  50. *Hueso & Guillot (2005)* Evolution of protoplanetary disks: constraints from DM Tauri and GM Aurigae // *Astron. and Astrophys* — 2005. — V. 442. — Pp. 703-725.
  51. *Shu (1977)* Self-similar collapse of isothermal spheres and star formation. // *Astrophys. J* — 1977. — V. 214. — Pp. 488-497.
  52. *Pavlyuchenkov, Zhilkin, Vorobyov, & Fateeva (2015)* The thermal structure of a protostellar envelope // *Astronomy Reports* — 2015. — V. 59. — Pp. 133-144.
  53. *Belloche (2013)* Observation of rotation in star forming regions: clouds, cores, disks, and jets // *EAS Publications Series* — 2013. — V. 62. — Pp. 25-66.
  54. *Tutukov & Pavlyuchenkov (2004)* Models of Astrophysical Decretion-Accretion Diffusional Disks // *Astronomy Reports* — 2004. — V. 48. — Pp. 800-812.
  55. *Safronov (1960)* On the gravitational instability in flattened systems with axial symmetry and non-uniform rotation // *Annales d'Astrophysique* — 1960. — V. 23. — Pp. 979.
  56. *Toomre (1964)* On the gravitational stability of a disk of stars. // *Astrophys. J* — 1964. — V. 139. — Pp. 1217-1238.
  57. *Andrews (2020)* Observations of Protoplanetary Disk Structures // *An. Rev. Astron. Astrophys* — 2020. — V. 58. — Pp. 483-528.
  58. *Huang et al. (2018)* The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). II. Characteristics of Annular Substructures // *Astrophys. J. Let* — 2018. — V. 869. — Pp. L42.

59. *Baruteau et al. (2014)* Planet-Disk Interactions and Early Evolution of Planetary Systems // *Protostars and Planets VI* — 2014. — V. . — Pp. 667.
60. *Dong, Zhu, & Whitney (2015)* Observational Signatures of Planets in Protoplanetary Disks I. Gaps Opened by Single and Multiple Young Planets in Disks // *Astrophys. J* — 2015. — V. 809. — Pp. 93.
61. *Dipierro, Laibe, Price, & Lodato (2016)* Two mechanisms for dust gap opening in protoplanetary discs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2016. — V. 459. — Pp. L1-L5.
62. *Bae, Zhu, & Hartmann (2017)* On the Formation of Multiple Concentric Rings and Gaps in Protoplanetary Disks // *Astrophys. J* — 2017. — V. 850. — Pp. 201.
63. *Zhang et al. (2018)* The Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). VII. The Planet-Disk Interactions Interpretation // *Astrophys. J. Let* — 2018. — V. 869. — Pp. L47.
64. *D'Alessio et al. (1999)* On the Thermal Stability of Irradiation-dominated Pre-Main-Sequence Disks // *Astrophys. J* — 1999. — V. 511. — Pp. 896-903.
65. *Dullemond (2000)* Are passive protostellar disks stable to self-shadowing? // *Astron. and Astrophys* — 2000. — V. 361. — Pp. L17-L20.
66. *Watanabe & Lin (2008)* Thermal Waves in Irradiated Protoplanetary Disks // *Astrophys. J* — 2008. — V. 672. — Pp. 1183-1195.
67. *Siebenmorgen & Heymann (2012)* Shadows, gaps, and ring-like structures in protoplanetary disks // *Astron. and Astrophys* — 2012. — V. 539. — Pp. A20.
68. *Ueda, Flock, & Birnstiel (2021)* Thermal Wave Instability as an Origin

- of Gap and Ring Structures in Protoplanetary Disks // *Astrophys. J. Let* — 2021. — V. 914. — Pp. L38.
69. *Wu & Lithwick (2021)* The Irradiation Instability of Protoplanetary Disks // *Astrophys. J* — 2021. — V. 923. — Pp. 123.
70. *Калиткин (1978)* Численные методы // *Наука* — 1978. — С. 1-512
71. *Youdin & Goodman (2005)* Streaming Instabilities in Protoplanetary Disks // *Astrophys. J* — 2005. — V. 620. — Pp. 459-469.
72. *Velikhov (1959)* Stability of an Ideally Conducting Liquid Flowing between Cylinders Rotating in a Magnetic Field // *Sov. Phys. JETP* — 1959. — V. 36. — Pp. 1398-1404.
73. *Nelson, Gressel, & Umurhan (2013)* Linear and non-linear evolution of the vertical shear instability in accretion discs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2013. — V. 435. — Pp. 2610-2632.
74. *Klahr & Hubbard (2014)* Convective Overstability in Radially Stratified Accretion Disks under Thermal Relaxation // *Astrophys. J* — 2014. — V. 788. — Pp. 21.
75. *Lesur & Latter (2016)* On the survival of zombie vortices in protoplanetary discs // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2016. — V. 462. — Pp. 4549-4554.
76. *Zhuravlev (2022)* Explosive instability of dust settling in a protoplanetary disc // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2022. — V. 512. — Pp. 2636-2653.
77. *Okuzumi, Ueda, & Turner (2022)* A global two-layer radiative transfer model for axisymmetric, shadowed protoplanetary disks // *Publ. of the Astr. Soc. of Japan* — 2022. — V. 74. — Pp. 828-850.
78. *Куликовский, Позорелов, & Семёнов (2012)* Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений //



- Физматлит* — 2012. — С. 1-656.
79. *Абакумов (2014)* Метод построения разностных схем годуновского типа в криволинейных координатах и его применение для сферических координат // *Прикладная математика и информатика* — 2014. — Т. 45. — С. 63-83.
80. *Semenov et al. (2003)* Rosseland and Planck mean opacities for protoplanetary discs // *Astron. and Astrophys* — 2003. — V. 410. — Pp. 611-621.
81. *Melon Fuksman & Klahr (2022)* No Self-shadowing Instability in 2D Radiation Hydrodynamical Models of Irradiated Protoplanetary Disks // *Astrophys. J* — 2022. — V. 936. — Pp. 16.
82. *Levermore & Pomraning (1981)* A flux-limited diffusion theory // *Astrophys. J* — 1981. — V. 248. — Pp. 321-334.
83. *Stone, Mihalas, & Norman (1992)* ZEUS-2D: A Radiation Magnetohydrodynamics Code for Astrophysical Flows in Two Space Dimensions. III. The Radiation Hydrodynamic Algorithms and Tests // *Astrophys. J. Suppl* — 1992. — V. 80. — Pp. 819.
84. *Saad & Schultz (1986)* GMRES: A Generalized Minimal Residual Algorithm for Solving Nonsymmetric Linear Systems // *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* — 1986. — V. 7. — Pp. 856-869.
85. *Самарский & Николаев (1978)* Методы решения сеточных уравнений // *Наука* — 1978. — С. 1-592.

**Благодарности** Диссертантка выражает благодарность Я. Н. Павлюченкову за научное руководство, а также благодарит своих коллег и соавторов, в особенности Т. С. Молярову, Д. З. Вибе, и В. В. Акимкина,

за помощь в работе и плодотворное сотрудничество.