

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Московский Государственный
Университет имени М. В. Ломоносова»
Государственный астрономический институт
имени П. К. Штернберга

на правах рукописи

Раздобурдин Дмитрий Николаевич

**Транзиентная динамика возмущений в
астрофизических дисках**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
«кандидат физико-математических наук»
по специальности 01.03.02
«Астрофизика и звёздная астрономия»

Москва

2017 г.

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звёздной астрономии физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители:

- *Шакура Николай Иванович*, доктор физико-математических наук, профессор, МГУ имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, отдел релятивистской астрофизики, заведующий отделом.
- *Журавлёв Вячеслав Вячеславович*, кандидат физико-математических наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, отдел релятивистской астрофизики, научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

- *Бисноватый-Коган Геннадий Семёнович*, доктор физико-математических наук, профессор, Институт космических исследований РАН, отдел наблюдательной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии, главный научный сотрудник
- *Зыбин Кирилл Петрович*, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Физический институт имени П.Н. Лебедева, отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма, главный научный сотрудник
- *Прохоров Михаил Евгеньевич*, доктор физико-математических наук, доцент, МГУ имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, лаборатория космических проектов, заведующий лабораторией.

Защита состоится 22 июня 2017 года в 14:00 на заседании Диссертационного совета по астрономии МГУ им. М.В. Ломоносова, шифр МГУ.01.02

Адрес: 199991, Москва, Университетский проспект, д. 13, ГАИШ, конференц-зал.

E-mail: d.razdoburdin@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Ломоносовский проспект, дом 27) и на сайте

<http://istina.msu.ru/dissertations/53582951>

Автореферат разослан 16 мая 2017 г.

Учёный секретарь

Диссертационного совета МГУ.01.02,

д.ф.-м.н.

С. О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. На сегодняшний день нахождение аккреционных дисков в турбулентном состоянии не вызывает сомнений, поскольку ламинарный поток не обеспечивал бы наблюдаемых темпов отвода удельного момента импульса на периферию диска.

Аккреционные диски относятся к т. наз. квазикеплеровским потокам, т. е. потокам с растущим на периферию удельным моментом импульса, но падающей угловой скоростью вращения. Наиболее разработанным к сегодняшнему дню механизмом турбулизации квазикеплеровских потоков является турбулизация под действием магниторотационной неустойчивости (MRI). Для её возникновения достаточно падения угловой скорости на периферию потока и внешнего вертикального магнитного поля. Эта неустойчивость впервые была обнаружена в течении Тэйлора–Куэтта и описана в работах Велихова Е. П. [1] и Чандрасекара С. [2] (иногда эту неустойчивость также называют неустойчивостью Велихова–Чандрасекара). В контексте аккреционных дисков эта неустойчивость была переоткрыта в серии статей Балбуса С. А. и Хаули Дж. Ф. [3]. Помимо исследования собственно линейной неустойчивости, в этих исследованиях численным моделированием в локальном приближении было показано, что MRI приводит к турбулизации потока с кеплеровским градиентом угловой скорости и внешним вертикальным магнитным полем. Однако предсказанное моделью MRI-турбулентности значение параметра Шакуры–Сюняева α (см. работу [4]) либо меньше оценок, полученных из интерпретации наблюдений, более чем на порядок, либо требует специальной конфигурации внешнего магнитного поля. Кроме того, MRI крайне эффективно подавляется электрическим сопротивлением плазмы, что за-

трудняет работу этого механизма в областях дисков с низкой ионизацией, таких, как, например, «мёртвые зоны» протопланетных дисков.

Возможным альтернативным вариантом турбулизации аккреционных дисков является докритическая турбулизация немагнитного квазикеплеровского потока. Докритический характер турбулентности определяется отсутствием в потоке экспоненциально растущих линейных возмущений (в силу линейной устойчивости квазикеплеровского потока турбулентность в нём может носить только докритический характер). Однако для возникновения и поддержки турбулентности необходимо наличие растущих линейных возмущений (см. [5]). В квазикеплеровском потоке подобные растущие линейные возмущения существуют, однако их рост носит транзитный характер, т. е. любое возмущение затухает по прошествии достаточно большого отрезка времени. Сочетание линейной устойчивости и одновременно наличие линейных транзитно растущих возмущений роднит квазикеплеровский поток с прочими сдвиговыми потоками (т. е. потоками с поперечным градиентом скорости). Подобные потоки хорошо изучены в рамках лабораторной гидродинамики. Все исследованные в лаборатории сдвиговые потоки демонстрируют переход к турбулентности за счёт т. наз. «обходного» механизма. В рамках этого механизма транзитно растущие линейные возмущения вызывают нелинейный отклик потока, который приводит к образованию новых возмущений, способных к транзитному росту (см., например, работу [6]).

Таким образом, транзитный рост возмущений играет определяющую роль в возникновении и поддержании турбулентности в сдвиговых течениях. В квазикеплеровских потоках величина транзитного роста значительно меньше, чем в сдвиговых потоках с обнаруженной турбулентностью, при сопоставимых числах Рейнольдса. Вероятно, именно в этом

кроется причина феноменальной нелинейной устойчивости кеплеровского потока: на сегодняшний день нелинейная устойчивость квазикеплеровского потока проверена вплоть до чисел Рейнольдса порядка миллиона. При этом говорить о невозможности докритической турбулизации квазикеплеровских потоков нельзя, поскольку в реальных дисках число Рейнольдса может достигать десятков миллиардов.

Таким образом, детальное исследование транзиентного роста линейных возмущений является необходимым шагом для ответа на вопрос о возможности перехода кеплеровского потока в турбулентное состояние. Адекватным методом исследования транзиентно растущих возмущений является вычисление оптимального роста, т. е. максимально возможного фактора усиления линейных возмущений. Предыдущие исследования (см. [7, 8, 9, 10, 11]) касались в первую очередь мелкомасштабных возмущений, т. е. возмущений с азимутальной длиной волны, намного меньшей, чем толщина диска. Однако недавние исследования показали, что в возникновении самоподдерживающегося турбулентного каскада основную роль могут играть крупномасштабные возмущения, т. е. возмущения с азимутальной длиной волны порядка или больше толщины диска (см. [12]). При этом рассмотрение возмущений с большой по сравнению с толщиной диска длиной волны требует учёта реальной пространственной структуры течения, поскольку характерный масштаб изменения фоновых величин становится сравнимым с длиной волны возмущения.

Цель работы состоит в исследовании оптимального роста линейных возмущений в глобальной постановке задачи. При этом исследовались различные конфигурации фонового течения: квазикеплеровский геометрически тонкий тор, тонкий кеплеровский диск, тонкий диск в квазирелятивистском гравитационном потенциале.

Механизм, отвечающий за оптимальный рост, в подобных потоках является двумерным по своей природе, поскольку определяется динамикой возмущений в плоскости диска. Таким образом, можно ограничиться рассмотрением возмущений с нулевой вертикальной компонентой скорости, что в случае баротропного потока позволяет свести задачу к двумерной модели, что и было сделано в данной работе. Особое внимание уделено выявлению зависимости оптимального роста от азимутального масштаба возмущений.

При этом для вычисления оптимального роста в тонком диске использовался математический аппарат, ранее не применявшийся в астрофизических работах. Его подробное описание и обоснование приведены в тексте диссертации.

Научная новизна работы. Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми. Так, впервые был исследован оптимальный рост линейных возмущений произвольных масштабов в глобальной постановке задачи. Было показано, что возмущения с азимутальной длиной волны, сравнимой с толщиной диска, усиливаются потоком более эффективно, чем исследованные ранее мелкомасштабные возмущения. При этом были учтены диссипативные эффекты в диске, а также его радиальная структура.

Научная и практическая ценность работы. Новые результаты, полученные в данной работе, могут оказаться полезными в дальнейших исследованиях динамики аккреционных дисков, в первую очередь, возможности турбулизации немагнитного кеплеровского потока, а значит, и в решении проблемы переноса момента импульса в теории аккреции.

Личный вклад автора. Пять работ из шести (номера 1-5) публикаций, перечисленных в списке публикаций по теме диссертации, выполне-

ны в соавторстве. В совместных публикациях автор участвовал на равноправной основе на всех этапах работы. Автором разработаны программные коды для поиска оптимальной линейной комбинации собственных функций, для расчёта эволюции линейных возмущений как в невязком случае, так и с учётом кинематической и объёмной вязкости, получены системы сопряжённых уравнений для вязкой и невязкой задач, доказано необходимое и достаточное условие существования транзитно растущих линейных возмущений для двумерного вращательного потока идеальной жидкости, проведены вычисления кривых оптимального роста.

Структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырёх глав и Заключения; содержит 28 рисунков и библиографию из 183 наименований. Общий объём диссертации составляет 154 страницы.

Список публикаций по теме диссертации. Основные результаты диссертации нашли отражение в следующих публикациях:

1. Zhuravlev, V. V., Razdoburdin, D. N. «A study of the transient dynamics of perturbations in Keplerian discs using a variational approach», **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, vol. 442, p. 870–890 (2014)
2. Razdoburdin, D. N., Zhuravlev, V. V. «Transient growth of perturbations on scales beyond the accretion disc thickness», **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, vol. 467, p. 849–872 (2017)
3. Раздобурдин, Д.Н., Журавлев, В.В. «Транзиентная динамика возмущений в астрофизических дисках» **Успехи физических наук**, т. 185, с. 1129–1161 (2015)
4. Раздобурдин Д.Н., Журавлёв В.В. «Оптимальный рост малых возмущений в тонких газовых дисках», **Письма в Астрономический**

журнал, т. 38, с. 1–11 (2012)

5. Шакура Н.И., Постнов К.А., Липунова Г.В., Маланчев К.Л., Журавлев В.В., Раздобурдин Д.Н., Кочеткова А.Ю., Ялмарсдоттер Л., Аболмасов П.К., Чашкина А.А. «Аккреционные процессы в астрофизике», **Физматлит**, Москва (2015)
6. Razdoburdin D. N. «Transient dynamics of large scale vortices in Keplerian disk», **Astronomical and Astrophysical Transactions**, vol. 29, p. 353–362 (2016)

Апробация результатов. Результаты, изложенные в настоящей диссертации, обсуждались на кафедре астрофизики и звёздной астрономии физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, докладывались и были опубликованы в трудах и тезисах следующих конференций:

1. Международная конференция «European Week of Astronomy and Space Science (JENAM)», Санкт-Петербург (2011).
2. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА)», Москва (2011).
3. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА)», Москва (2012).
4. Международная конференция «Planet Formation and Evolution», Киль, Германия (2014).
5. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА)», Москва (2014).
6. Международная конференция «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей», Москва (2015).

7. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА)», Москва (2015).
8. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА)», Москва (2016).

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Исследована линейная динамика волновых пакетов, состоящих из глобальных звуковых мод в геометрически тонком квазикеплеровском газовом торе. Показано, что максимально возможный фактор роста их амплитуды имеет квазипериодическую форму и достигает значительной величины, которая обратно пропорциональна отношению протяженности диска к его толщине.
2. С использованием вариационного метода оптимизации проанализирована линейная динамика глобальных транзиентных адиабатических возмущений в геометрически тонком кеплеровском диске с внутренней границей. Показано, что и на азимутальном масштабе, значительно превышающем геометрическую толщину диска, максимально возможным фактором роста обладают сдвиговые вихри в форме лидирующих спиралей. Энергия этих крупномасштабных вихрей усиливается в десятки раз за период времени, соответствующий нескольким оборотам вещества на внутренней границе диска.
3. Впервые получено необходимое и достаточное условие существования транзиентно растущих линейных возмущений для двумерного вращательного потока идеальной жидкости.

4. Получена кривая оптимального роста крупномасштабных сдвиговых вихрей с учетом диссипативных эффектов, а также релятивистских эффектов отклонения орбитальной и эпициклической частот от их ньютоновских значений. Показано, что в релятивистских областях газовых дисков рост крупномасштабных вихрей усиливается обратно пропорционально четвертой степени эпициклической частоты и может значительно превосходить рост аналогичных вихрей с азимутальным масштабом, намного меньшим толщины диска. Дана интерпретация кривой оптимального роста глобальных сдвиговых вихрей на языке локальной модели транзиентной динамики возмущений во вращательном сдвиговом потоке.

Содержание работы

Во Введении кратко изложено представление об известных механизмах турбулизации аккреционных дисков: турбулизации под действие магниторотационной неустойчивости, бароклинических неустойчивостей и т. наз. «зомби»-неустойчивости. Обсуждается вопрос о недостаточности этих механизмов для объяснения всех наблюдательных проявлений аккрецирующих потоков. Возможным решением данной проблемы является докритическая турбулизация немагнитного кеплеровского потока. Подобный механизм отвечает за переход к турбулентности в родственных кеплеровскому сдвиговых потоках: течения Куэтта, Пуазейля и Тэйлора–Куэтта. Сделан обзор наиболее значимых работ, результаты которых близки к предмету диссертации. Также обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и её научная и практическая значимость, представлены выносимые на защиту положения и их научная

новизна. При этом отмечен личный вклад автора, изложена в хронологическом порядке апробация результатов и помещён список публикаций по теме диссертации.

Глава 1 посвящена изложению математического аппарата, применяемого в данной диссертационной работе. Поскольку феномен транзиентного роста линейных возмущений непосредственно связан с ненормальностью динамического оператора, в первом разделе главы 1 приведено краткое описание типов линейных операторов, начиная от наиболее частных случаев и заканчивая самым общим – случаем ненормальных операторов. На простом геометрическом примере показано, что в случае ненормальных операторов даже в спектрально устойчивом потоке могут существовать растущие возмущения. Максимально возможный рост возмущений к заданному моменту времени называется оптимальным ростом. Описано два метода вычисления оптимального роста: матричный и вариационный. Первый достаточно часто применялся другими авторами, тогда как второй был впервые применён в астрофизической литературе в рамках работ данного диссертационного цикла. Основное преимущество вариационного метода состоит в отсутствии необходимости отыскивать собственные функции оператора, определяющего динамику линейных возмущений. Эта операция сопряжена со значительными трудностями, поэтому свободный от неё вариационный метод позволяет исследовать потоки со сложной пространственной зависимостью фоновых величин. Кроме того, вариационный метод может применяться для пространственно неограниченных потоков, нестационарных потоков. Также он более эффективен с точки зрения использования вычислительных ресурсов. В настоящей диссертации матричный метод применяется в главе 2, а вариационный – в главах 3 и 4.

В главе 2 была исследована линейная динамика волновых пакетов, состоящих из глобальных звуковых мод в геометрически тонком квазикеплеровском газовом торе. Вычисление полного набора мод в подобном потоке осложнено наличием резонансов: коротационного и Линдбладовских. Однако в данной главе рассмотрение ограничено лишь модами с областью резонансов, лежащей вне потока. Таким образом, все рассматриваемые моды являются нейтральными, т. е. их частоты не содержат мнимой части. Радиальная структура мод была получена аналитически в рамках ВКБ-приближения. При этом границы тора являются точками поворота для ВКБ-решения, поэтому для получения полных профилей мод была сделана сшивка ВКБ-решения и решения, полученного в окрестности граничных точек. Для вычисления оптимального роста использовался матричный метод. Было показано, что вызванный этим транзиентный рост акустической энергии может достигать значительных величин. Причём максимально возможный фактор роста амплитуды рассматриваемых мод имеет квазипериодическую форму, а величина роста обратно пропорциональна отношению протяженности диска к его толщине. Этот результат указывает на то, что рассмотренные комбинации акустических мод могут иметь отношение к наблюдаемым квазипериодическим осцилляциям в дисках.

В главе 3 результаты, полученные во второй главе, были обобщены на случай произвольных адиабатических возмущений в полубесконечном потоке. Для вычисления оптимального роста был использован вариационный метод. Основное внимание было уделено исследованию оптимального роста т. наз. крупномасштабных возмущений, т. е. возмущений с азимутальной длиной волны, сравнимой с толщиной диска. Исследование динамики крупномасштабных возмущений требует учёта радиальной струк-

туры диска, поскольку масштаб изменения фоновых величин становится сравним с длиной волны возмущения. В качестве фонового потока использовался стандартный диск Шакуры-Сюняева в пределе малой вязкости. Поправки к профилям величин за счёт конвекции (см., например, [13]) во внимание не принимались. Было показано, что среди крупномасштабных возмущений оптимальный рост демонстрируют сдвиговые вихри в форме лидирующих спиралей. С течением времени лидирующая спираль раскручивается потоком вплоть до превращения в отстающую спираль. При этом момент наибольшей раскрутки соответствует максимально возможному росту возмущений. Энергия подобных вихрей растёт в десятки раз за несколько оборотов вещества на внутреннем краю диска. Применение вариационного метода требует использования т. наз. сопряжённой системы уравнений. Её получение в явной форме, помимо вычисления собственно оптимального роста, позволило также строго доказать, что для существования транзиентного роста возмущений в двумерном вращательном потоке идеальной жидкости необходимо и достаточно отличия профиля вращения от твердотельного.

Отдельно был исследован вопрос о роли выбора нормы в вычислении оптимального роста. Кроме общепринятой акустической энергии в данной главе в качестве нормы рассматривалась и другая величина. Эта величина является канонической энергией осесимметричных возмущений, и её использование в качестве нормы позволяет исключить из рассмотрения не представляющие в данном случае интереса эпициклические движения жидкости. Также оптимальный рост был исследован в пределе несжимаемой жидкости. В этом пределе существует простая аналитическая формула, описывающая величину оптимального роста (см. [14], [15]), что позволило провести проверку численного решения.

В главе 4 были приняты во внимание диссипативные эффекты: кинематическая и объёмная вязкости, а также релятивистские эффекты отклонения орбитальной и эпициклической частот от их ньютоновских значений. В отсутствие диссипации оптимальный рост может достигать неограниченно больших величин. Для получения большего фактора усиления достаточно лишь рассмотреть более туго закрученную лидирующую спираль. Присутствие молекулярной вязкости делает невозможным неограниченно тугую закрутку, что накладывает естественное ограничение на величину оптимального роста линейных возмущений. При этом падение угловой скорости на периферию диска, характерное для астрофизических потоков, приводит к различию динамических шкал на различном удалении от внутренней границы диска. Этот факт позволил дать интерпретацию полученным кривым оптимального роста в терминах локальной задачи, решённой в [16]. Учёт релятивистских эффектов был произведён с помощью псевдо-ньютоновского гравитационного потенциала Пачинского-Виита [17]. Было показано, что в релятивистских областях газовых дисков рост крупномасштабных вихрей усиливается обратно пропорционально четвертой степени эпициклической частоты. Поэтому её стремление к нулю на внутреннем крае предельно релятивистского диска приводит к значительному увеличению оптимального роста крупномасштабных возмущений. При этом в релятивистском диске на величину оптимального роста оказывает серьёзное влияние также и профиль поверхностной плотности. Также было показано, что ТР крупномасштабных вихрей не подвержен действию сил, связанных с объёмной вязкостью вещества.

В заключении кратко описано и прокомментированы основные результаты, полученные в рамках данного диссертационного цикла.

Список литературы

- [1] *Velikhov E. P.* Stability of an ideally conducting liquid flowing between cylinders rotating in a magnetic field // *Sov. Phys. JETP*. — 1959. — Vol. 9. — P. 995.
- [2] *Chandrasekhar S.* The Stability of Non-Dissipative Couette Flow in Hydromagnetics // *Proceedings of the National Academy of Science*. — 1960. — Vol. 46. — Pp. 253–257.
- [3] *Balbus S. A., Hawley J. F.* A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis. II - Nonlinear evolution // *ApJ*. — 1991. — 07. — Vol. 376. — Pp. 214–233.
- [4] *Shakura N. I., Sunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance. // *A&A*. — 1973. — Vol. 24. — Pp. 337–355.
- [5] *Henningson D. S., Reddy S. C.* On the role of linear mechanisms in transition to turbulence // *Phys. Fluids*. — 1994. — 03. — Vol. 6. — Pp. 1396–1398.
- [6] *Waleffe F.* On a self-sustaining process in shear flows // *Physics of Fluids*. — 1997. — Vol. 9. — Pp. 883–900.
- [7] *Ломинадзе Д. Г., Чагелашвили Г. Д., Чанашвили Р. Г* // *Письма в Астрон. журнал*. — 1988. — Т. 14. — С. 856.
- [8] *Фридман А. М.* // *Письма в Астрон. журнал*. — 1989. — Т. 15. — С. 487.

- [9] *Ioannou P. J., Kakouris A.* Stochastic Dynamics of Keplerian Accretion Disks // *ApJ*. — 2001. — 04. — Vol. 550. — Pp. 931–943.
- [10] *Yecko P. A.* Accretion disk instability revisited. Transient dynamics of rotating shear flow // *A&A*. — 2004. — 10. — Vol. 425. — Pp. 385–393.
- [11] *Mukhopadhyay B., Afshordi N., Narayan R.* Bypass to Turbulence in Hydrodynamic Accretion Disks: An Eigenvalue Approach // *ApJ*. — 2005. — 08. — Vol. 629. — Pp. 383–396.
- [12] *Lithwick Y.* Formation, Survival, and Destruction of Vortices in Accretion Disks // *ApJ*. — 2009. — Vol. 693. — Pp. 85–96.
- [13] *Bisnovatyi-Kogan G. S., Blinnikov S. I.* Disk accretion onto a black hole at subcritical luminosity // *A&A*. — 1977. — Vol. 59. — Pp. 111–125.
- [14] *Lominadze D. G., Chagelishvili G. D., Chanishvili R. G.* The Evolution of Nonaxisymmetric Shear Perturbations in Accretion Disks // *Soviet Astronomy Letters*. — 1988. — 09. — Vol. 14, no. 5. — P. 364.
- [15] *Zhuravlev V. V., Razdoburdin D. N.* A study of the transient dynamics of perturbations in Keplerian discs using a variational approach // *MNRAS*. — 2014. — 07. — Vol. 442. — Pp. 870–890.
- [16] *Razdoburdin D. N., Zhuravlev V. V.* Transient growth of perturbations on scales beyond the accretion disc thickness // *MNRAS*. — 2017. — Vol. 467. — Pp. 849–872.
- [17] *Paczynsky B., Wiita P. J.* Thick accretion disks and supercritical luminosities // *A&A*. — 1980. — Vol. 88. — Pp. 23–31.