

На правах рукописи

Элбакян Вардан Геворгович

**ВЛИЯНИЕ АККРЕЦИИ НА РАННЮЮ ЭВОЛЮЦИЮ ЗВЕЗД
(СУБ-)СОЛНЕЧНОЙ МАССЫ**

Специальность: 01.03.02 – “Астрофизика и звездная астрономия”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель:

ВОРОБЬЕВ Эдуард Игоревич

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИ физики Южного федерального университета

Официальные оппоненты:

ТАМБОВЦЕВА Лариса Васильевна

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем звездообразования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН»

ХАЙБРАХМАНОВ Сергей Александрович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики физического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук

Защита диссертации состоится « 9 » июня 2017 года в 12 час 45 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук» (ГАО РАН) по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН (www.gao.spb.ru).

Автореферат разослан

«__» _____ 2017 года

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 002.120.01
к.ф.-м.н.

Булига Станислава Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Звезды (суб-)солнечной массы формируются в результате гравитационного коллапса плотных молекулярных облаков. На ранней стадии эволюции протозвезда окружена протозвездным газопылевым диском, который в свою очередь находится внутри коллапсирующей газопылевой оболочки, оставшейся от вращающегося родительского облака. Изучение свойств протозвезд на внедренной в родительское облако фазе их эволюции имеет важное значение для понимания того, как формируются маломассивные звезды.

Звезды являются одной из основных компонент галактик и служат в качестве основных индикаторов их структуры и эволюции. Звезды также являются основным источником энергии в галактиках и источником химических элементов тяжелее гелия во Вселенной. Следовательно, в астрофизике имеет ключевое значение понимание того, как формируются и эволюционируют звезды и какие внешние явления или внутренние механизмы определяют их конечные свойства.

Общепринятое на сегодняшний день мнение, что звезды образуются путем гравитационного сжатия вещества, восходит к временам Ренессанса. Тем не менее, только за последние полвека доказательства данной теории стали убедительными, а физическое понимание формирования звезд стало возможным всего лишь за последние несколько десятков лет. Уже сейчас современные наземные и космические телескопы позволяют "заглянуть" в самое сердце зарождающейся протозвезды и протозвездного диска. Наблюдения молодых звезд на разных длинах волн, особенно в радио и инфракрасном диапазоне, приносят новые и неожиданные результаты относительно нашего понимания физических процессов, участвующих в формировании звезд: подтверждено наличие "проблемы светимости" [10], когда аккреционные светимости, обычно наблюдаемые у внедренных протозвезд, 10-100 раз ниже, чем прогнозировалось в моделях сферического коллапса, широкого

разброса темпов аккреции для молодых протозвезд [11], а также обнаружены объекты (так называемые фуоры) со светимостями, не вписывающимися в простые теоретические модели образования звезд (суб-)солнечной массы [18]. Таким образом, поступающее огромное количество новых наблюдательных данных требует разработки надежных методов их интерпретации и изучение формирования звезд в настоящее время является активно развивающейся областью исследований. Доказательством этому служит огромное количество теоретических и наблюдательных научных работ, публикующихся в ведущих мировых изданиях. Особое место в области изучения формирования звезд занимают звезды солнечной и субсолнечной массы, исследование ранней эволюции которых на сегодняшний день является весьма актуальной темой.

С улучшением разрешающей способности наблюдательного оборудования стало возможным исследование всё большего количества звездных систем на самых ранних этапах развития и за счет этого за последнее десятилетие были обнаружены объекты, которые ранее было невозможно пронаблюдать. К ним в частности относятся так называемые объекты с очень низкими светимостями (very low luminosity objects) – веллос [7], со светимостями $L_{\text{obj}} \leq 0,1 L_{\odot}$. Изучение природы данных объектов является одной из актуальных задач астрофизики, в частности физики звезд.

Текущий наблюдательный анализ протозвезд во внедренной фазе наводит на мысль, что аккреция на формирующиеся звезды может носить переменный характер с ярко выраженными вспышками [8, 11, 12]. Предполагается, что звезда может набрать существенную долю своей массы в течение нескольких коротких эпизодов высокой аккреции, составляющих всего несколько процентов от общей длительности внедренной фазы протозвездной эволюции [10, 12]. Идея нестационарных темпов аккреции не нова, так как в течение десятилетий объекты типа FU Orionis (фуоры) указывали на существование коротких эпизодов быстрой аккреции на ранних этапах эволюции звезд [16]. Однако в последнее время

появляется все больше свидетельств в пользу того, что переменная аккреция с эпизодическими вспышками играет доминирующую роль в процессе формирования маломассивных звезд [11, 19, 24]. Таким образом, исследование переменного характера аккреции вещества на протозвезду на ранних этапах формирования дает ключ к пониманию общей картины формирования звезд и является важной и актуальной задачей в современной астрофизике..

На сегодняшний день практически нет методов прямого определения возрастов молодых звезд до главной последовательности и основным методом является сравнение наблюдаемых характеристик звезд с такими модельными данными, как болометрическая светимость и эффективная температура. Однако в моделях, широко используемых при сравнении с наблюдениями, часто не учтена аккреция вещества на протозвезду в начальных этапах ее формирования. Данный недостаток может привести к некорректной интерпретации возрастов молодых звезд [4, 5]. Следовательно, необходимы исследования влияния протозвездной аккреции на конечные свойства молодых звезд (суб-)солнечной массы.

Цели и задачи

Основной целью диссертационной работы является детальное исследование влияния аккреции вещества на раннюю эволюцию звезд. Для реализации этой цели была выполнена следующая работа :

- Исследование с помощью численного моделирования природы объектов с очень малой светимостью (веллос). Определение эволюционной фазы веллос, их характерных масс и распространённости данных объектов в молодых областях звездообразования.
- Изучение влияния аккреции на структуру и эволюцию молодых маломассивных звезд и коричневых карликов. Объяснение наблюдаемого

разброса светимостей на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, для объектов с одинаковыми возрастами в области звездообразования.

- Объяснение наблюдаемого быстрого истощения лития в поверхностном слое некоторых протозвезд.
- Детальное исследование характера темпа аккреции и светимости протозвезды в модели гравитационно неустойчивого диска. Проведение сравнения с наблюдательными данными для объяснения наблюдаемого переменного характера светимости протозвезд.

Научная новизна

- Впервые определена природа веллос с помощью численного моделирования ранней эволюции звезды, учитывающего аккрецию вещества из околозвездного диска.
- Показано, что веллос являются маломассивными объектами с максимальной массой, не превышающей $0.3 M_{\odot}$. Найдено, что природа веллос зависит от теплового сценария аккреции вещества на центральный объект.
- Найдено, что сценарий горячей аккреции вещества на протозвезду не позволяет объяснить существование таких протозвездных объектов, как веллос, что противоречит наблюдениям данных объектов в молодых очагах звездообразования.
- С использованием самосогласованных моделей эволюции аккрецирующих протозвезд, впервые показано, что имеются существенные отличия в свойствах молодых звезд, рассчитанных с учетом и без учета аккреции на ранних стадиях эволюции. При этом степень несовпадения зависит от теплового сценария аккреции и максимальна для холодного сценария и минимальна для гибридного или горячего сценария аккреции.

- С использованием самосогласованных моделей эволюции аккрецирующих протозвезд, впервые показано, что количество поверхностного лития у протозвезд, рассчитанных с учетом аккреции, характеризуется широким разбросом относительно моделей, в которых аккреция не учитывается.
- Показано, что аккреционная светимость протозвезды носит высокоременный характер в гравитационно неустойчивых дисках. При этом, ее величина в среднем выше, чем фотосферная светимость на начальных стадиях эволюции (класс 0), и становится в среднем сравнимой с фотосферной на более поздних стадиях эволюции (класс I).
- Показано, что переменная природа протозвездной аккреции, характерная для гравитационно неустойчивых протозвездных дисков, делает возможным существование таких протозвездных объектов, как веллос.

Научная и практическая значимость работы

Основные результаты, представленные в данной диссертационной работе и определяющие её научную значимость, опубликованы в авторитетных российских и международных астрономических изданиях и служат развитию фундаментальных представлений о процессах формирования звезд (суб-)солнечной массы. Данная диссертационная работа является еще одним шагом вперед на пути к пониманию того, какие процессы ответственны за формирование звезды на начальных этапах эволюции.

Численное моделирование является одной из самых передовых, стремительно развивающихся областей научных исследований. Значимость данной работы заключается в том, что разрабатываемые численные алгоритмы могут иметь широкое практическое применение не только в астрофизике, но и в других областях науки. Более того, результаты моделирования могут быть использованы для обоснования заявок для наблюдений на крупнейших телескопах (ALMA, PdBI, и

т.д.). На основании исследований природы веллос, проведенных в рамках данной диссертационной работы, уже одобрена заявка на проведение высокоточных наблюдений на интерферометре ALMA для определения массы веллос.

Методология и методы исследования

В данной диссертационной работе основным методом исследования является численное моделирование, в рамках которого производится самосогласованный расчет коллапса вращающегося протозвездного облака и эволюции звезды и околозвездного диска, формирующихся в центральных областях облака. Численное моделирование начинается с дозвездной фазы и завершается в конце внедренной фазы, т.е. когда 90% от начальной массы облака аккрецировало на протозвездный диск и протозвезду. Формирование и эволюция протозвездного диска исследована с помощью численного гидродинамического моделирования [20, 21, 22, 23], в то время как формирование и эволюция центральной звезды рассчитывается с использованием кода звездной эволюции “Lyon” [6]. Рассматриваются три тепловых сценария аккреции вещества с диска на звезду: “гибридная” аккреция, которая предполагает, что часть аккреционной энергии, поглощенная протозвездой, зависит от темпа протозвездной аккреции; “холодная” аккреция, когда вся аккреционная энергия переизлучается не доходя до протозвезды и “горячая” аккреция, в которой постоянная доля аккреционной энергии поглощается протозвездой независимо от значений темпа аккреции.

Положения и результаты, выносимые на защиту

В диссертационной работе получены следующие основные результаты, выносимые на защиту:

- Природа объектов с очень низкой светимостью (веллос) зависит от теплового сценария аккреции вещества на центральный объект. В сценарии холодной

аккреции, большинство веллос принадлежат к фазе класса I звездной эволюции, в то время как в сценарии гибридной аккреции, большинство веллос являются первыми гидростатическими ядрами.

- Объекты с очень низкой светимостью являются маломассивными объектами с массами меньше $0.12 - 0.3 M_{\odot}$, в зависимости от теплового сценария аккреции.
- Сценарий горячей аккреции, характеризующийся постоянным поглощением доли аккреционной энергии $\alpha \geq 0.2$ протозвездой, не может объяснить существование веллос в протозвездной фазе.
- В среднем, на начальных этапах формирования протозвезды ее аккреционная светимость выше чем фотосферная, однако из-за высокопеременного характера аккреционной светимости в гравитационно неустойчивых дисках, последняя может падать ниже фотосферной, что делает возможным существование таких объектов как веллос.
- Эволюционные модели молодых звезд до главной последовательности с учетом аккреции вещества дают широкий разброс содержания лития относительно моделей, в которых аккреция не учитывается.

Личный вклад автора

Научно-исследовательские работы, вошедшие в диссертацию, выполнены в соавторстве с коллегами из России (Воробьев Э.И., Глебова Г.М.), Австрии (Manuel Güedel), Великобритании (Isabelle Baraffe), США (Michael Dunham), Франции (Gilles Chabrier). При этом автором, выполнен расчет численных моделей, приведенных в работе, проведен анализ и обобщение полученных результатов, сформулированы основные выводы. Диссертант является первым автором одной из опубликованных в рецензируемых изданиях статей. В остальных двух статьях,

написанных в соавторстве, вклад диссертанта значительный. Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором.

Степень достоверности результатов

Надежность и достоверность полученных в работе результатов и выводов основана на корректном использовании современных методов теоретической и вычислительной астрофизики, точных физических законов, на соответствии полученных модельных данных с известными наблюдательными результатами, непротиворечивости полученных результатов существующим теоретическим представлениям о формировании и эволюции звезд, а также признанием полученных результатов при обсуждении их на конференциях и семинарах, положительными рецензиями на статьи, опубликованных в ведущих рецензируемых отечественных и международных астрономических журналах – Астрономический журнал, *Astronomy & Astrophysics*.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на научно-исследовательских семинарах Института астрономии РАН, кафедры физики космоса Южного федерального университета, Института астрономии Венского университета, Отдела астрофизики Эксетерского университета, Отдела физики и астрономии Киотского университета, а также были представлены на международных и российских конференциях:

- Международная астрономическая конференция “Физика звезд: от коллапса до коллапса”, 3-7 октября 2016, Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика, Россия
- 22-ая всероссийская научная конференция студентов физиков “ВНКСФ-22”, 21-

28 апреля 2016, Ростов-на-Дону, Россия

- Конференция “Галактики”, 24-28 ноября 2014, Ессентуки, Россия
- 65-ая студенческая научная конференция физического факультета ЮФУ, 16-23 апреля 2013, Ростов-на-Дону, Россия
- Девятая ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН, 11-23 апреля 2013, Ростов-на-Дону, Россия

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертационной работы составляет 123 страницы, включая 34 рисунка и 10 таблиц. Список литературы состоит из 108 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, представлена научная новизна и практическая значимость основных результатов и выводов, приведены научные положения, выносимые на защиту. Также приводится краткий обзор содержания диссертации и список публикаций, на основании которых представляется данная диссертация.

В **первой главе** детально описаны численная гидродинамическая модель [22, 23], которая используется для исследования формирования, эволюции околозвездного диска, и модель звездной эволюции “Lyon” [4, 5, 6], по которой рассчитывается эволюция центральной звезды. Приводятся также начальные параметры, используемые в моделировании.

Во **второй главе** выполнено самосогласованное моделирование протозвезды и протозвездного диска на ранних стадиях эволюции. Детально исследован характер темпа аккреции и светимости протозвезды в модели гравитационно неустойчивого диска. С использованием численного гидродинамического моделирования прослеживается эволюция протозвездного диска от начала его формирования до возраста приблизительно 0.4 млн. лет. Также описаны свойства гравитационно неустойчивого протозвездного диска, образующегося в результате гравитационного коллапса облака с начальными профилями поверхностной плотности и угловой скорости, описываемые уравнениями (1.1) и (1.2).

$$\Sigma = \frac{r_0 \Sigma_0}{\sqrt{r^2 + r_0^2}}, \quad (1.1)$$

$$\Omega = 2\Omega_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^2} - 1 \right), \quad (1.2)$$

где Ω_0 и Σ_0 – угловая скорость вращения и поверхностная плотность газа в центре облака, соответственно, и $r_0 = \sqrt{A}c_s^2/(\pi G\Sigma_0)$ – радиус центрального плато, где c_s – начальная скорость звука в облаке.

На рисунке 1 представлено распределение поверхностной плотности вещества для нескольких моментов времени после формирования центральной протозвезды, расположенной в центре координат. Время¹, прошедшее с момента формирования протозвезды, указано вверху справа на каждой панели. Серой шкалой в верхней части рисунка представлена поверхностная плотность вещества в г/см^2 в логарифмических единицах.

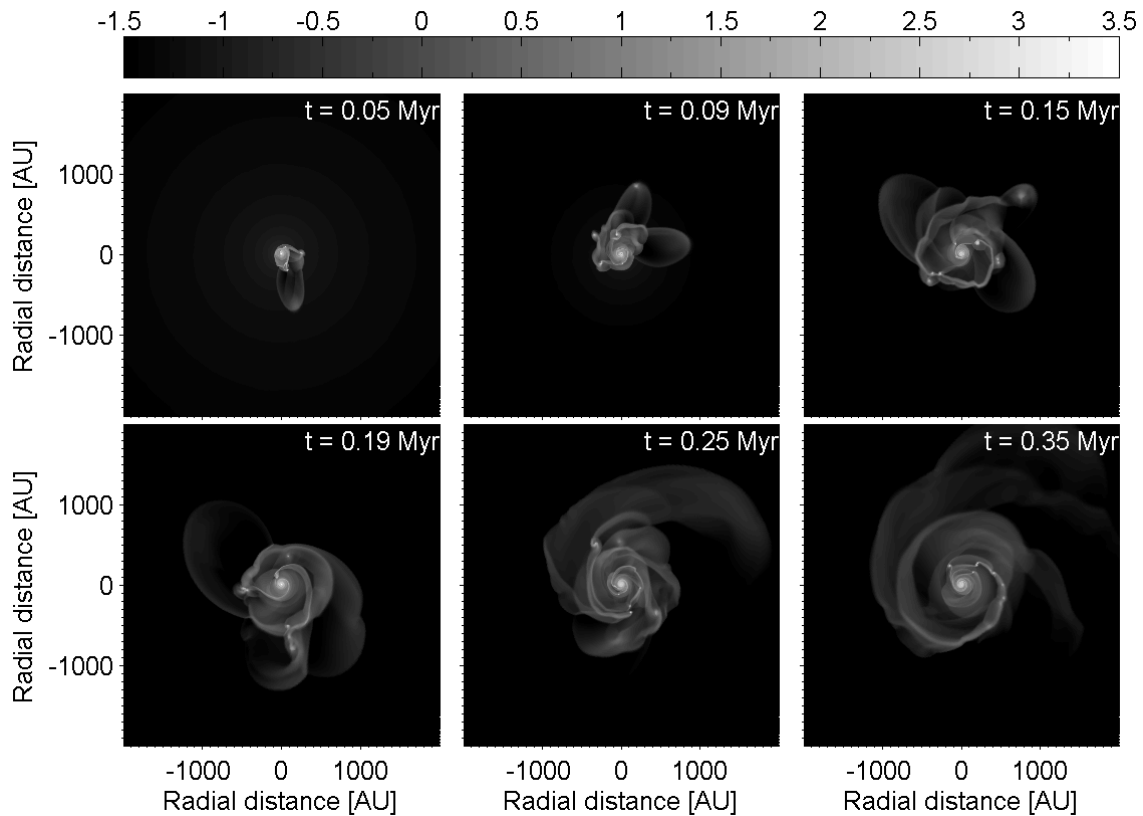


Рисунок 1 - Распределение поверхностной плотности вещества на различных временах после образования протозвезды. Логарифмической шкалой вверху рисунка представлена поверхностная плотность вещества в г см^{-2}

¹ Все приведенные времена отчитываются с момента образования протозвезды.

Видно, что на начальных этапах эволюции ($t \lesssim 0.35$ млн. лет) диск характеризуется сильной гравитационной неустойчивостью и фрагментацией. Со временем большинство фрагментов теряют угловой момент вращения, мигрируют ближе к звезде по спиралевидной орбите и затем поглощаются центральной протозвездой, приводя к резкому возрастанию темпа аккреции (аккреционная вспышка) на протозвезду и, следовательно, возрастанию светимости протозвезды.

Переменная светимость является характерной особенностью молодых протозвезд и может быть вызвана тремя основными причинами: 1) вращением протозвезды, приводящем к чередованию горячих и холодных областей на ее поверхности, 2) поглощением излучения звезды внутренней гранью неосесимметричного околозвездного диска [13] и 3) переменным характером протозвездной аккреции. В данной главе рассматривается последний механизм и проведен анализ вариаций полной светимости протозвезды, вызванных переменной аккрецией в модели гравитационно неустойчивого диска.

Показано, что темп аккреции вещества на расстоянии в несколько астрономических единиц от протозвезды носит существенно переменный характер, что также отражается и на характере протозвездной светимости. Амплитуда вариации темпа аккреции и светимости растет вместе с ростом периода выборки, что является следствием природы гравитационно неустойчивых протозвездных дисков. Сравнение модельных вариаций светимости с найденными из наблюдений ближайших очагов звездообразования показывает, что модельные величины существенно меньше наблюдаемых для выборки, охватывающей период меньше 10 лет, что указывает на присутствие дополнительных источников переменности на малых динамических расстояниях от протозвезды.

В **третьей главе** путем численного моделирования, детально исследована совокупность физических процессов, ответственных за возникновение объектов с

очень низкой светимостью – веллос (Very Low Luminosity Objects, VeLLOs) и дано теоретическое объяснение природы данных объектов. Также определено, какими основными параметрами (масса, эффективная температура) могут обладать веллос. Веллос определены как объекты с внутренней светимостью (светимость только протозвезды и протозвездного диска) $L_{\text{obj}} \leq 0,1 L_{\odot}$ [7]. Выполнено первое систематическое исследование характера веллос с помощью численного моделирования эволюции звезды совместно с околозвездным диском, начиная с гравитационного коллапса дозвездных облаков. Исследован гравитационный коллапс большой выборки модельных протозвездных облаков в диапазоне масс от 0.1 до $2.0 M_{\odot}$. Численное моделирование начинается с дозвездной фазы и завершается в конце внедренной фазы, т.е. когда 90% от начальной массы облака аккрецировало на протозвездный диск или протозвезду. Формирование и эволюция протозвездного диска исследована с помощью численного гидродинамического моделирования, в то время как формирование и эволюция центральной звезды рассчитывается с использованием кода звездной эволюции. Рассматриваются три тепловых сценария аккреции вещества с диска на звезду: “гибридная” аккреция, которая предполагает, что часть аккреционной энергии поглощенной протозвездой зависит от темпа аккреции вещества на последнюю; “горячая” аккреция, в которой постоянная доля аккреционной энергии поглощается протозвездой независимо от значений темпа аккреции и “холодная” аккреция, когда вся аккреционная энергия переизлучается.

Найдено, что характер веллос в решающей степени зависит от теплового сценария протозвездной аккреции. Показано, что в гибридном сценарии аккреции большинство веллос (90,6%) представляют из себя первые гидростатические ядра и лишь небольшая доля (9,4%) являются истинными протозвездами, тогда как в сценарии холодной аккреции, наоборот, большинство веллос принадлежат к фазе класса I звездной эволюции. Причина заключается в том, что фотосферная

светимость, которая устанавливает нижний предел полной внутренней светимости молодой звезды, ниже в сценарии холодной аккреции, в результате чего имеется больше веллос в протозвездной стадии. Найдено, что веллос довольно редкие объекты, занимающие 7-11% от общей продолжительности внедренной фазы и их массы не превышают $0.12 M_{\odot}$ для сценария гибридной аккреции и $0.3 M_{\odot}$ для сценария холодной аккреции. Сравнив с наблюдательными данными из работ [8, 9], где доля веллос в протозвездной фазе составляет $\sim 6.25\%$, найдено, что сценарий холодной аккреции обеспечивает гораздо лучшее согласие с наблюдениями, чем сценарий гибридной аккреции (5.7% от общего времени для холодной аккреции против 0.7% от общего времени для гибридной аккреции). Оба аккреционных сценария предсказывают больше веллос в фазе класса I, чем в фазе класса 0, в отличие от наблюдений. Наконец, когда переменная аккреция с эпизодическими вспышками искусственно отфильтрована из полученных темпов аккреции, доля веллос в протозвездной фазе значительно снижается, что указывает на причинно-следственную связь между веллос и эпизодической аккрецией. Также показано, что сценарий горячей аккреции не воспроизводит веллос в протозвездной эволюционной фазе.

В четвертой главе представлены результаты самосогласованного численного моделирования, полностью связывающего в реальном времени численные гидродинамические модели коллапсирующих дозвездных облаков [22] и моделей звездной эволюции [3, 6]. С использованием гибридного и холодного аккреционного сценария, проанализировано влияние аккреции вещества из околос звездного диска на эволюцию молодых маломассивных звезд и коричневых карликов, а также истощение лития в них.

Недавние исследования влияния аккреции на структуру и эволюцию молодых маломассивных звезд и коричневых карликов показали, что аккреция на ранних этапах формирования звезд/коричневых карликов может повлиять на свойства

объектов (светимость, радиус и эффективная температура) даже после нескольких миллионов лет, когда процесс аккреции уже прекратился [2, 4, 5, 15]. Это предположение может дать объяснение разбросу светимостей, наблюдаемого у молодых скоплений, не требуя, чтобы у объектов в скоплении был разброс возрастов [4, 5]. Все больше наблюдательных данных говорят о том, что маломассивные звезды набирают большую часть своей массы за счет эпизодических аккреционных вспышек различной интенсивности [17]. На самых ранних этапах коллапса дозвездного облака аккреционные вспышки могут иметь существенное влияние на тепловую и химическую эволюцию протозвездного диска и оболочки, так как они излучают большое количество энергии. Аккреционные вспышки также могут оказывать сильное влияние на структуру центрального объекта в зависимости от темпа аккреции и количества поглощенной протозвездой аккреционной энергии.

Данная глава диссертационной работы затрагивает вопрос о том, является ли вполне корректной интерпретация наблюдательных данных путем сравнения наблюдений с теоретическими моделями звезд до главной последовательности, в которых не учитывается аккреция на протозвезду на начальных этапах ее формирования.

Значительный разброс светимостей звезд, наблюдаемый на диаграммах Герцшпрунга - Рассела в молодых областях звездообразования, является хорошо известным фактом, который был подтвержден с совершенствованием методов наблюдений (см [6] и ссылки в ней). Важно определить, возникает ли такой разброс светимостей за счет физических процессов, участвующих в процессе формирования звезды, неопределенностях в наблюдениях или значительного разброса возрастов звезд [14].

В данной главе с использованием более совершенных методов подтвержден результат, полученный ранее в работах [4, 5] о том, что эпизодическая аккреция

дает объяснение наблюдаемому разбросу светимостей на диаграммах Герцшпрунга - Рассела для молодых скоплений. В последующем анализе более подробно исследуется влияние эпизодической аккреции на эволюцию молодых маломассивных звезд ($\leq 1 M_{\odot}$), обычно используемых для определения возраста областей звездообразования и молодых скоплений. Предполагаемый разброс возрастов используется в качестве аргумента в пользу медленного процесса формирования звезд, что противоречит современным представлениям [1, 14]. Для объяснения данного противоречия проведен систематический анализ влияния протозвездной аккреции на эволюцию маломассивных звезд и коричневых карликов до главной последовательности. Целью исследования является изучение чувствительности эволюционных треков данных объектов на диаграмме Герцшпрунга - Рассела к протозвездной аккреции на ранних этапах их формирования.

Модели также подтверждают, что аккреция на ранних этапах эволюции может производить объекты с аномальным истощением лития. Также найдено, что аккреционные вспышки на ранних стадиях эволюции могут производить модели аналогичных масс с разным количеством лития на поверхности, а в частности с избытком лития по сравнению с аналогичными не аккрецирующими моделями. Этот результат обусловлен влиянием аккреционных вспышек на центральную температуру звезды, ростом излучательного ядра звезды и аккрецией лития из аккреционного диска. Только согласованные модели могут выявить такое тонкое сочетание эффектов. Данный результат мог бы объяснить недавние, наблюдения избытка лития в быстро вращающихся объектах в молодом скоплении NGC 2264.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе выполнения настоящей диссертационной работы полученные основные результаты можно сформулировать в виде следующих выводов:

1. Темп аккреции имеет существенно переменный характер на ранних стадиях эволюции диска.
2. Аккреционная светимость в среднем доминирует на ранней стадии (эволюционный класс 0), в то время как на более поздних стадиях (класс I и ранний класс II) вклад от обоих компонентов полной светимости приблизительно одинаков.
3. Временные вариации полной светимости ΔL_{tot} протозвезды в модели гравитационно неустойчивого диска имеют широкий разброс, но в среднем растут с увеличением периода выборки $\Delta t = 1-500$ лет. Полученные модельные значения для малых периодов выборки указывает на наличие дополнительных к гравитационной неустойчивости источников периодичности на малых (< 2 а.е.) расстояниях от протозвезды, не учтенных в гидродинамических вычислениях.
4. В сценарии гибридной аккреции большинство веллос являются первыми гидростатическими ядрами и лишь небольшая часть является истинными протозвездами.
5. В случае сценария холодной аккреции большинство веллос являются протозвездами класса I.
6. В сценарии горячей аккреции все веллос представляют собой первые гидростатические ядра. Существование веллос в протозвездной фазе затруднительно из-за высокой фотосферной светимости в сценарии горячей аккреции.
7. В моделях гибридной аккреции, максимальная масса веллос составляет $0.12 M_{\odot}$, в то время как в случае сценария холодной аккреции она больше примерно в 2 раза.

8. Самосогласованные эволюционные модели аккрецирующих объектов подтверждают предсказанный разброс светимостей на диаграмме Герцшпрунга - Рассела для населения маломассивных молодых звезд и коричневых карликов с одинаковыми возрастами, а также возможность ускорить истощение лития.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. **Элбакян В. Г.**, *Вариации темпа аккреции и светимости в гравитационно неустойчивых протозвездных дисках* / **В. Г. Элбакян**, Э. И. Воробьев, Г. М. Глебова // *Астрономический Журнал* – 2016. – том 93. – № 10. – с. 1–15, DOI: 10.7868/S0004629916100017
2. Baraffe I., *Self-consistent evolution of accreting low-mass stars and brown dwarfs* / I. Baraffe, **V. G. Elbakyan**, E. I. Vorobyov, G. Chabrier // *Astronomy & Astrophysics* – 2017. – Vol. 597. – p. A19, DOI: 10.1051/0004-6361/201629303
3. Vorobyov E. I., *On the nature of very low luminosity objects (VeLLOs)* / E. I. Vorobyov, **V. G. Elbakyan**, M. M. Dunham, M. Güedel // *Astronomy & Astrophysics* – 2017. – Vol. 600. – p. A36, DOI: 10.1051/0004-6361/201628922

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ballesteros-Paredes J., Remarks on Rapid vs. Slow Star Formation / Ballesteros-Paredes, J., Hartmann, L. // *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*. - 2007. - Vol. 43. - pp. 123-136.
2. Baraffe I., Effect of episodic accretion on the structure and the lithium depletion of low-mass stars and planet-hosting stars / Baraffe I., Chabrier G. // *Astron. & Astrophys.* -2010. - Vol. 521. - P. A44.
3. Baraffe I., Evolutionary models for solar metallicity low-mass stars: mass-magnitude relationships and color-magnitude diagrams / Baraffe I., Chabrier G., Allard F., Hauschildt P.H. // *Astron. & Astrophys.* - 1998. - Vol. 337. - pp. 403-412.
4. Baraffe I., Episodic Accretion at Early Stages of Evolution of Low-Mass Stars and Brown Dwarfs: A Solution for the Observed Luminosity Spread in H-R Diagrams? / Baraffe I., Chabrier G., Gallardo J. // *Astrophys. J. Lett.* -2009. - Vol. 702. - pp. L27-L31.
5. Baraffe I., Observed Luminosity Spread in Young Clusters and FU Ori Stars: A Unified Picture / Baraffe I., Vorobyov E., Chabrier G. // *Astrophys. J.* - 2012. - Vol. 756. - P. 118.
6. Chabrier G., Structure and evolution of low-mass stars / Chabrier G., Baraffe I. // *Astron. & Astrophys.* - 1997. - Vol. 327. - pp. 1039-1053.
7. di Francesco J., An Observational Perspective of Low-Mass Dense Cores I: Internal Physical and Chemical Properties / di Francesco J., Evans I.N.J., Caselli P., Myers P.C., Shirley Y., Aikawa Y., Tafalla M. // *Protostars and Planets V*. - 2007. - pp. 17-32.
8. Dunham M.M., Identifying the Low-Luminosity Population of Embedded Protostars in the c2d Observations of Clouds and Cores / Dunham M.M., Crapsi

- A., Evans I.N.J., Bourke T.L., Huard T.L., Myers P.C., Kauffmann J. // *Astrophys. J. Supp.* - 2008. - Vol. 179. - pp. 249-282.
9. Dunham M.M., The Evolution of Protostars: Insights from Ten Years of Infrared Surveys with Spitzer and Herschel / Dunham M.M., Stutz A.M., Allen L.E., Evans I.N.J., Fischer W.J., Megeath S.T., Myers P.C., Offner S.S.R., Poteet C.A., Tobin J.J., Vorobyov E.I. // *Protostars and Planets VI*. - 2014. - pp. 195-218.
 10. Dunham M.M., Resolving the Luminosity Problem in Low-mass Star Formation / Dunham M.M., Vorobyov E.I. // *Astrophys. J.* - 2012. - Vol. 747. - P. 52.
 11. Enoch M.L., Properties of the Youngest Protostars in Perseus, Serpens, and Ophiuchus / Enoch M.L., Evans I.N.J., Sargent A.I., Glenn J. // *Astrophys. J.* - 2009. - Vol. 692. - pp. 973-997.
 12. Evans I.N.J., The Spitzer c2d Legacy Results: Star-Formation Rates and Efficiencies; Evolution and Lifetimes / Evans I.N.J., Dunham M.M., Jørgensen, J. K., Enoch M.L., Mer, van Dishoeck E.F., Alcal, Myers P.C., Stapelfeldt K.R., Huard T.L., et al. // *Astrophys. J. Supp.* - 2009. - Vol. 181. - pp. 321-350
 13. Grinin V.P., Photometric activity of the UX Ori star V1184 Tau in the optical and near-infrared spectral ranges / Grinin V.P., Arkharov A.A., Barsunova O.Y., Sergeev S.G., Tambovtseva L.V. // *Astronomy Letters*. - 2009. - Vol. 35. - pp. 114-120.
 14. Hartmann L., Rapid Formation of Molecular Clouds and Stars in the Solar Neighborhood / Hartmann L., Ballesteros-Paredes J., Bergin E.A. // *Astrophys. J.* - 2001. - Vol. 562. - pp. 852-868.
 15. Hosokawa T., On the Reliability of Stellar Ages and Age Spreads Inferred from Pre-main-sequence Evolutionary Models / Hosokawa T., Offner S.S.R., Krumholz M.R. // *Astrophys. J.* - 2011. - Vol. 738. - P. 140.

16. Kenyon S.J., Pre-Main-Sequence Evolution in the Taurus-Auriga Molecular Cloud / Kenyon S.J., Hartmann L. // *Astrophys. J. Supp.* - 1995. - Vol. 101. - P. 117.
17. Liu, Haoyu Baobab, Circumstellar disks of the most vigorously accreting young stars / Liu, Haoyu Baobab; Takami, Michihiro; Kudo, Tomoyuki; Hashimoto, Jun; Dong, Ruobing; Vorobyov, Eduard I.; Pyo, Tae-Soo; Fukagawa, Misato; Tamura, Motohide; Henning, Thomas; Dunham, Michael M.; Karr, Jennifer L.; Kusakabe, Nobuhiko; Tsuribe, Toru // *Science Advances*. - 2016. - P. e1500875.
18. Shu F.H. Self-similar collapse of isothermal spheres and star formation / Shu F.H. // *Astrophys. J.* - 1977. - Vol. 214. - pp. 488-497.
19. Vorobyov E.I. Variable Accretion in the Embedded Phase of Star Formation / Vorobyov E.I. // *Astrophys. J.* - 2009. - Vol. 704. - pp. 715-723.
20. Vorobyov E.I., The Origin of Episodic Accretion Bursts in the Early Stages of Star Formation / Vorobyov E.I., Basu S. // *Astrophys. J. Lett.* - 2005. - Vol. 633. - pp. L137-L140.
21. Vorobyov E.I., The Burst Mode of Protostellar Accretion / Vorobyov E.I., Basu S. // *Astrophys. J.* 2006. - Vol. 650. - pp. 956-969.
22. Vorobyov E.I., The Burst Mode of Accretion and Disk Fragmentation in the Early Embedded Stages of Star Formation / Vorobyov E.I., Basu S. // *Astrophys. J.* - 2010. - Vol. 719. - pp. 1896-1911.
23. Vorobyov E.I., Variable Protostellar Accretion with Episodic Bursts / Vorobyov E.I., Basu S. // *Astrophys. J.* - 2015. - Vol. 805. - P. 115.
24. Zhu Z., Long-term Evolution of Protostellar and Protoplanetary Disks. I. Outbursts / Zhu Z., Hartmann L., Gammie C.F., Book L.G., Simon J.B., Engelhard E. // *Astrophys. J.* - 2010. - Vol. 713. - pp. 1134-1142.

