

На правах рукописи

Молярова Тамара Сергеевна

**Химическая структура протопланетных  
дисков со стационарной и вспышечной  
аккрецией**

01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

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

**Научный руководитель:**

к.ф.-м.н. Акимкин Виталий Викторович, старший научный сотрудник ФГБУН Института астрономии РАН, г. Москва

**Официальные оппоненты:**

д.ф.-м.н., с.н.с. Зинченко Игорь Иванович, заведующий отделом радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

д.ф.-м.н., доцент Ламзин Сергей Анатольевич, ведущий научный сотрудник ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится 21 сентября 2021 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д002.280.01 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/scientific\\_activities/diss\\_council/diss/](http://www.inasan.ru/scientific_activities/diss_council/diss/).

Автореферат разослан «            »            2021 года.

Учёный секретарь диссертационного совета



Д 002.280.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы** Протопланетный диск — это уплотнённый вращающийся объект из газа и пыли, который образуется вместе с протозвездой в процессе коллапса межзвёздного молекулярного облака. Считается, что именно в протопланетных дисках образуются планеты. В частности, из подобного диска, называемого протосолнечной туманностью, образовалась планеты нашей Солнечной системы. Интерес к исследованию протопланетных дисков в последние годы возрастает благодаря появлению новых наблюдательных данных. Во-первых, огромное разнообразие обнаруженных экзопланет порождает новые вопросы об их формировании. Во-вторых, новые инфракрасные и субмиллиметровые инструменты, такие как Herschel, SMA, ALMA, NOEMA и др., позволили получить детальные изображения самих протопланетных дисков, в том числе в линиях излучения молекул, с хорошим пространственным и спектральным разрешением [1, 2, 3].

Протопланетные диски наследуют вещество родительского молекулярного облака: газ, пыль и ледяные мантии, покрывающие пылинки. Однако это вещество продолжает в диске активную эволюцию, и химический состав протопланетных дисков существенно отличается от состава молекулярного облака.

Химический состав протопланетного диска интересен по многим причинам. Он содержит информацию о происходящих в диске процессах. Некоторые химические компоненты являются активными участниками этих процессов, определяя скорости нагрева и охлаждения, а также эффективность взаимодействия вещества диска с магнитным полем.

Кроме того, химическая эволюция диска может отразиться на составе образующихся планет. Например, содержание молекул в атмосферах газовых гигантов может зависеть от механизма формирования этих планет и количества углерода и кислорода в веществе, из которого они образовались [4, 5], а содержание в диске воды может влиять на формирование и эволюцию планет земной группы [6].

Наблюдение и анализ излучения молекул позволяют диагностировать физические характеристики диска, необходимые для понимания его строения и эволюции: массу диска, его кинематическую структуру, степень ионизации вещества и др. Молекулярный состав диска зависит от массы и светимости центральной звезды, размера и массы самого диска, параметров ансамбля пыли, состава исходного вещества, наличия эпизодических вспышек аккреции. Поэтому для интерпретации наблюдательных данных необходимо уметь рассчитывать содержание химических соединений и их распределение по диску, т.е. строить химическую модель диска, учитывая все существенные параметры диска и центральной звезды.

Для решения данной задачи прибегают к астрохимическому моделированию. Оно является важным инструментом исследования межзвёздной и околозвёздной среды [7, 8, 9]. Характерные для протопланетных дисков высокие плотности, низкие температуры и поле излучения, характеризующееся высокой плотностью достаточно энергичных фотонов, а также активная эволюция пыли способствуют разнообразию химического состава [10]. Для описания физической структуры протопланетных дисков и расчёта эволюции их химического состава создаются специализированные физико-химические модели, такие как ProDiMo [11], DALI [12], ANDES [13].

Астрохимические модели протопланетных дисков [11, 12, 13] подробно описывают химические процессы, но при этом предполагают упрощённую структуру диска, в основном квазистационарную и осесимметричную. Включение химии в динамические модели, учитывающие самогравитацию и динамику газа и пыли, требует больших вычислительных мощностей. Существуют такие модели, позволяющие подробно рассмотреть эволюцию диска на временах порядка тысяч лет [14]. Для рассмотрения более длинных временных шкал (сотни тысяч лет) используют, модели с ограниченным набором химических процессов, например [15].

Одной из важных особенностей молодых звёзд с протопланетными дисками являются отмечающиеся у некоторых из них эпизодические вспышки аккреции [16]. Сопутствующее увеличение аккреционной светимости может существенно повлиять на химический состав диска и на его физические параметры [17]. Теоретическое моделирование процессов аккреции в дисках приводит к выводу, что подобные вспышки должны происходить у большинства молодых звёздных объектов [18]. Однако в большинстве случаев изменение светимости не находит отражения в наблюдениях из-за продолжительных периодов спокойной аккреции между вспышками. Тем не менее, состав дисков, испытывающих или испытывавших в прошлом такие вспышки, может заметно отличаться от состава спокойных дисков, что открывает перспективу выявления таких дисков по химическим индикаторам.

Моделирование зависимости состава газа и льда в протопланетных дисках от различных параметров, в том числе при разных режимах аккреции, является эффективным инструментом исследования в современной астрофизике. Оно необходимо для интерпретации наблюдательных

данных и построения (совершенствования) теории эволюции протопланетных дисков, в том числе в контексте образования планет. Данная диссертационная работа посвящена изучению свойств протопланетных дисков методом моделирования химического состава протопланетных дисков в рамках нескольких подходов, охватывающих с разных сторон химические и динамические процессы в дисках.

## **Цели диссертационной работы**

1. Поиск молекулярных индикаторов массы протопланетных дисков на основе астрохимического моделирования ансамбля квазистационарных моделей с различными параметрами диска и центральной звезды;
2. Поиск индикаторов вспышки светимости типа FU Ориона — химических соединений, содержание которых в диске значительно возрастает во время вспышки, а также остаётся повышенным в течение продолжительного времени после её окончания;
3. Анализ распределения по протопланетному диску основных летучих соединений в газовой и ледяной фазах в рамках двумерного гидродинамического моделирования с учётом самогравитации и эволюции пыли.

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

1. Показано, что молекула CO является наиболее адекватным молекулярным индикатором массы протопланетных дисков. Показано,

что средняя концентрация CO в дисках составляет  $1.6 \times 10^{-5}$  по отношению к  $H_2$ , что на порядок ниже, чем в молекулярных облаках. Показано, что при определении масс дисков по CO пренебрежение химическим разрушением CO может приводить к в среднем трёхкратной недооценке массы дисков.

2. Показано, что во время вспышки флуора содержание многих соединений, в том числе сложных органических молекул, повышается на несколько порядков, благодаря чему они могут быть задетектированы. Предсказанные вспышечные содержания молекул  $CH_3CHO$  и  $HCOOCH_3$  хорошо согласуются с полученными впоследствии на ALMA независимыми наблюдательными данными для флуора V 883 Ориона.
3. Определены молекулы, высокое содержание которых в дисках может свидетельствовать о прошлой вспышечной активности молодого звёздного объекта. Установлено, что содержание  $H_2CO$ ,  $NH_2OH$ ,  $CH_3CHO$ ,  $CH_3OCH_3$ ,  $HCOOCH_3$ ,  $C_3H_3$  и  $C_2H_2$  остаётся повышенным от десятков до тысяч лет после окончания вспышки.
4. Разработана модель адсорбции и десорбции летучих соединений для многокомпонентной модели пыли. Модель добавлена в двумерный гидродинамический код FEOSAD, что обеспечило возможность рассматривать совместную динамику газа, пыли и льдов в протопланетных дисках. С помощью данной модели показано, что при высокой турбулентности ледяные мантии вызывают заметное изменение свойств пыли в окрестности линии льдов воды.
5. Показано, что льды попадают на крупную пыль, главным образом,

в результате коагуляции обледеневших мелких пылинок. Вдоль линий льдов накапливаются газофазные и ледяные летучие соединения, при этом повышение их содержания относительно среднего уровня может достигать двух порядков величины.

**Научная новизна** В данной диссертационной работе впервые проведён систематический поиск индикаторов массы протопланетных дисков на основе астрохимического моделирования ансамбля протопланетных дисков. Обосновано применение в качестве индикатора массы дисков молекулы CO, даны оценки содержания в дисках газофазного CO, описаны причины и особенности вариаций содержания CO в дисках.

Впервые проведён систематический анализ влияния вспышки флуора на содержание в протопланетном диске различных, в том числе сложных органических, молекул в рамках детальной астрохимической модели диска. Даются рекомендации по наблюдению молекул в дисках, испытывающих и испытывавших в прошлом вспышки светимости.

В рамках численной модели впервые описана динамика летучих соединений в самогравитирующем протопланетном диске с эволюцией пыли. Проанализировано влияние ледяных мантий на эволюцию пыли в дисках с высокой и низкой турбулентностью.

**Научная и практическая значимость** Результаты анализа применимости различных молекул в качестве индикаторов массы протопланетных дисков могут использоваться другими исследователями для определения массы дисков из наблюдений. Выводы о содержании CO в дисках могут применяться для учёта химического разрушения CO при опреде-

лении массы газа по наблюдению CO.

Предложенные списки молекул, чувствительных к вспышкам светимости, могут использоваться для идентификации признаков прошлой вспышечной активности у объектов, в настоящее время не проявляющих значительных вариаций светимости.

Обновлённая версия гидродинамического кода для моделирования протопланетных дисков FEOSAD, включающая динамику летучих соединений, может использоваться для дальнейшего теоретического исследования содержания льдов в протопланетных дисках и их влияния на эволюцию пыли. Выводы о накоплении летучих соединений на линиях льдов, расчёты состава ледяных мантий и их влияния на эволюцию пыли могут использоваться для дальнейшего развития теоретических моделей роста пыли и образования планет.

**Методология и методы исследования** Задачи диссертации решались при помощи численного моделирования кодами ANDES [13] и FEOSAD [19]. Расчёты проводились на вычислительном кластере ИНАСАН и на Венском научном кластере (VSC). Результаты анализировались с помощью авторского программного обеспечения.

**Достоверность представленных результатов** Достоверность представленных в диссертационной работе результатов исследования химического состава протопланетных дисков со стационарной и вспышечной аккрецией подтверждается сравнением с теоретическими и наблюдательными данными других авторов и обсуждением полученных результатов на конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

**Апробация работы** Результаты диссертации были представлены на российских и зарубежных конференциях и семинарах в качестве устных и стендовых докладов:

1. 46-я студенческая научная конференция «Физика Космоса» (Корюковская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 30 января – 03 февраля 2017);
2. XIV Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 12–14 апреля 2017);
3. Current and Future Perspectives of Chemical Modelling in Astrophysics (УНН, Hamburg, July 15th–17th, 2017);
4. Planet Formation and Evolution, (AIU Jena, Jena, September 25–27, 2017);
5. Конкурс молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 03 ноября 2017);
6. Конференция «Звездообразование и планетообразование. Наблюдения, теория, численный эксперимент.» (АКЦ ФИАН, Москва, 13–15 ноября 2017);
7. 47-я студенческая научная конференция “Физика Космоса” (Корюковская астрономическая обсерватория УрФУ, Екатеринбург, 29 января – 02 февраля 2018);
8. VII Пулковская молодёжная астрономическая конференция (ГАО РАН, Санкт-Петербург, 28–31 мая 2018);

9. XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, IAU Symposium 345: Origins: From the Protosun to the First Steps of Life (University of Vienna, Vienna, Austria, August 20–23, 2018);
10. Seminar at Konkoly Observatory (Budapest, Hungary, October 25, 2018);
11. Конкурс молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 15 ноября 2018);
12. Конференция «Звездообразование и планетообразование» (АКЦ ФИАН, Москва, 12–13 ноября 2019);
13. Семинар лаборатории астрохимии и внеземной физики УрФУ (УрФУ, Екатеринбург, 8 мая 2020, онлайн);
14. Международная школа и рабочее совещание «Исследования экзопланет — 2020» для молодых учёных и студентов (ИНАСАН, Москва, 9–12 октября 2020, онлайн);
15. Конкурс молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 5 ноября 2020);
16. Конференция «Звездообразование и планетообразование» (АКЦ ФИАН, Москва, 10–11 ноября 2020, онлайн);
17. Online conference ‘Five years after HL Tau: a new era in planet formation’ (Chile, December 7–11, 2020);
18. Online workshop ‘Accretion and luminosity bursts across the stellar mass spectrum’ (Southern Federal University, December 15–16, 2020).

**Личный вклад автора** Соискательница лично участвовала в постановке задач, написании кода, получении и обработке результатов численных экспериментов, совместно с соавторами участвовала в обсуждении результатов и формулировке выводов.

В частности, соискательницей:

1. Выбраны параметры ансамбля моделей протопланетных дисков, разработан способ задания вспышки светимости.
2. Разработан и внедрён в код FEOSAD модуль расчёта адсорбции и десорбции летучих соединений. Добавлена обновлённая модель эволюции пыли.
3. Проведены все расчёты кодами ANDES и FEOSAD.
4. Разработаны методы анализа результатов моделирования и критерии отбора перспективных индикаторов массы дисков и вспышек фуоров.
5. Проанализированы полученные в модели FEOSAD распределения льдов и газофазных соединений, дана теоретическая интерпретация накопления летучих соединений на линиях льдов.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Число страниц в диссертации 168, рисунков 29, таблиц 7. Список литературы содержит 193 наименования. 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, её цели и задачи, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлена информация по апробации результатов, научным публикациям по результатам исследований соискательницы и её вкладу в работу.

**В Главе 1** представлены методика и результаты моделирования ансамбля протопланетных дисков с различными параметрами с целью систематического поиска перспективных молекулярных индикаторов массы диска.

Масса протопланетного диска является одним из его важнейших параметров. Для её определения часто применяется излучение в линиях молекул. В частности, используют молекулу CO, которая имеет высокую концентрацию, легко наблюдаемые вращательные переходы, а также относительно простую химию. Ожидаемое содержание этой молекулы в газе хорошо известно для условий межзвёздной среды, однако для дисков фактор конверсии наблюдаемого CO в массу диска может заметно отличаться.

Данная глава посвящена теоретическому исследованию применимости молекулы CO в качестве индикатора массы протопланетных дисков с точки зрения зависимости её относительного содержания от параметра диска. Также анализируется содержание других химических соединений, потенциально претендующих на роль индикаторов массы. Оценивается разброс значений полного содержания различных молекул в диске в зависимости от структурных параметров диска. Для расчётов

используется астрохимическая модель квазистационарного протопланетного диска ANDES [13].

В данной главе даётся обзор работ, посвящённых применению молекулы CO для определения массы протопланетных дисков; описывается используемая астрохимическая модель протопланетного диска; выделяются молекулы, подходящие на роль индикаторов массы; анализируется распределение углерода по молекулам; обсуждаются химические процессы, определяющие химическую структуру диска, и влияние параметров модели на содержание молекулы; даётся интерпретация полученных результатов. Основные результаты опубликованы в работах [A1] и [B1].

**Глава 2** посвящена исследованию воздействия вспышек светимости типа FU Ориона (фуоров) на химический состав протопланетных дисков.

Вспышки светимости различной амплитуды наблюдаются у многих молодых звёздных объектов. Нестационарность химических процессов, происходящих во время вспышки, может приводить к появлению или исчезновению характерных соединений. Химический состав меняется не мгновенно и может сохранять отпечаток вспышки даже после её окончания. Выделение особенностей химического состава протопланетных дисков, испытавших в прошлом влияние вспышки фуора, необходимо, чтобы идентифицировать такие объекты в наблюдениях.

В данной главе исследуется, как эволюционирует химический состав диска вокруг фуора под действием вспышки светимости. С помощью астрохимической модели ANDES анализируется, как вспышка светимости влияет на химический состав вещества и как быстро он возвращается к исходному (довспышечному) составу после её окончания. Также исследуется пространство параметров и идентифицируются со-

единения, содержание которых наиболее чувствительно к вспышке светимости, в особенности соединения, сохраняющиеся в диске на больших временных масштабах.

В данной главе приводится обзор наблюдательных проявлений флуоров и сопутствующих изменений в свойствах протопланетных дисков; описываются особенности применяемой модели; проводится сравнение с результатами предыдущих работ; выделяются наиболее чувствительные к вспышке соединения, рассматриваются их распределения по диску. Основные результаты опубликованы в работах [A2], [B2], [B3] и [B4].

**Глава 3** посвящена исследованию структуры динамического газопылевого диска с ограниченным набором химических соединений и реакций.

Эволюция протопланетных дисков на ранних стадиях эволюции характеризуется существенным влиянием различных динамических процессов. В дисках развивается гравитационная неустойчивость, образуются спирали и сгустки, активно растёт и дрейфует пыль, вещество аккрецирует на звезду. Эти процессы могут оказывать влияние на химический состав диска, однако в предыдущих главах в целях более детального рассмотрения химической эволюции диска они игнорировались.

В данной главе рассматривается динамическая эволюция в диске содержания наиболее обильных летучих молекул —  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$  — находящихся в газовой и ледяной фазах. Представлена обновлённая двумерная модель самогравитирующего протопланетного диска с эволюцией пыли FEOSAD [19], в которую добавлен модуль эволюции летучих соединений с учётом их влияния на фрагментацию пыли. По результатам моделирования анализируется состав ледяных мантий пылинок и его изменение, а также влияние наличия ледяных мантий на эволюцию

пыли.

В данной главе подробно описана принятая модель перехода летучих соединений между газовой фазой и ледяными мантиями; представлены основные свойства модели диска и особенности включения в неё летучих; проанализированы полученные в моделях распределения газа и пыли, распределения летучих соединений и состав ледяных мантий пылинки. Основные результаты опубликованы в работах [A3], [A4] и [B5].

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

В **Приложениях 1 и 2** представлены дополнительные материалы по Главе 1 и Главе 2, соответственно.

## Публикации по теме диссертации

### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] *Molyarova T., Akimkin V., Semenov D., Henning Th., Vasyunin A., Wiebe D.* Gas mass tracers in protoplanetary disks: CO is still the best // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — V. 849. — No. 2. — A130.
- [A2] *Molyarova T., Akimkin V., Semenov D., Ábrahám P., Henning Th., Kóspál Á., Vorobyov E., Wiebe D.* Chemical Signatures of the FU Ori Outbursts // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — V. 866. — No. 1. — A46.
- [A3] *Wiebe D. S., Molyarova T. S., Akimkin V. V., Vorobyov E. I., Semenov D. A.* Luminosity outburst chemistry in protoplanetary discs:

going beyond standard tracers // MNRAS — 2019. — V. 485. —  
Pp. 1843-1863.

- [A4] **Molyarova T.**, Vorobyov E. I., Akimkin V., Skliarevskii A., Wiebe D.,  
Güdel M. Gravitoviscous protoplanetary disks with a dust component.  
V. The dynamic model for freeze-out and sublimation of volatiles //  
The Astrophysical Journal. — 2021. — V. 910. — No. 2. — A153.

### Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] **Молярова Т. С.**, Акимкин В. В., Шустов Б. М. Химический  
состав льдов в протопланетных дисках // Сборник трудов мемо-  
риальной конференции 2018 г., посвященной памяти академика  
А. А. Боярчука. Под ред. Д. В. Бисикало, Д. З. Вибе. — 2018. —  
С. 328-333.
- [B2] **Молярова Т. С.**, Элбакян В. Г. Химический отклик вспышек ак-  
креции в погружённых фуорах // Научные труды Института аст-  
рономии РАН. Том 4. — 2019. — Т. 4 — С. 45-49.
- [B3] **Молярова Т. С.**, Вибе Д. З. Сопоставление наблюдаемых содер-  
жаний сложной органики в V 883 Ori с результатами астрохими-  
ческого моделирования // Научные труды Института астрономии  
РАН. Том 4. — 2019. — Т. 4 — С. 50-55.
- [B4] **Molyarova T.**, Akimkin V., Semenov D., Abrahám P., Henning Th.,  
Kóspál Á., Vorobyov E., Wiebe D. Chemical modeling of FU Ori protoplanetary  
disks // Origins: From the Protosun to the First Steps of Life. Proceedings  
of the International Astronomical Union. — 2020. — V. 345. — Pp. 367-368.

- [B5] *Молярова Т. С., Акимкин В. В., Воробьёв Э. И.* Распределение летучих соединений в самогравитирующем протозвёздном диске // Научные труды Института астрономии РАН. Том 4. — 2019. — Т. 4 — С. 40-44.

## Цитируемая литература

1. *Dutrey et al. (2014)* Physical and Chemical Structure of Planet-Forming Disks Probed by Millimeter Observations and Modeling // *Protostars and Planets VI* — 2014. — P. 317.
2. *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. — L3.
3. *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. — L41.
4. *Öberg, Murray-Clay, & Bergin (2011)* The Effects of Snowlines on C/O in Planetary Atmospheres // *Astrophys. J. Let* — 2011. — V. 743. — L16.
5. *Cridland, Eistrup, & van Dishoeck (2019)* Connecting planet formation and astrochemistry. Refractory carbon depletion leading to super-stellar C/O in giant planetary atmospheres // *Astron. and Astrophys* — 2019. — V. 627. — A127.
6. *Bitsch & Johansen (2016)* Influence of the water content in protoplanetary discs on planet migration and formation // *Astron. and Astrophys* — 2016. — V. 590. — A101.

7. *Garrod, Widicus Weaver, & Herbst (2008)* Complex Chemistry in Star-forming Regions: An Expanded Gas-Grain Warm-up Chemical Model // *Astrophys. J* — 2008. — V. 682. — Pp. 283-302.
8. *McElroy et al. (2013)* The UMIST database for astrochemistry 2012 // *Astron. and Astrophys* — 2013. — V. 550. — A36.
9. *Wakelam et al. (2015)* The 2014 KIDA Network for Interstellar Chemistry // *Astrophys. J. Suppl* — 2015. — V. 217. — A20.
10. *Henning & Semenov (2013)* Chemistry in Protoplanetary Disks // *Chemical Reviews* — 2013. — V. 113. — Pp. 9016-9042.
11. *Woitke, Kamp, & Thi (2009)* Radiation thermo-chemical models of protoplanetary disks. I. Hydrostatic disk structure and inner rim // *Astron. and Astrophys* — 2009. — V. 501. — Pp. 383-406.
12. *Bruderer, van Dishoeck, Doty, & Herczeg (2012)* The warm gas atmosphere of the HD 100546 disk seen by Herschel. Evidence of a gas-rich, carbon-poor atmosphere? // *Astron. and Astrophys* — 2012. — V. 541. — A91.
13. *Akimkin et al. (2013)* Protoplanetary Disk Structure with Grain Evolution: The ANDES Model // *Astrophys. J* — 2013. — V. 766. — A8.
14. *Ilee et al. (2017)* The chemistry of protoplanetary fragments formed via gravitational instabilities // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2017. — V. 472. — Pp. 189-204.
15. *Vorobyov, Baraffe, Harries, & Chabrier (2013)* The effect of episodic accretion on the phase transition of CO and CO<sub>2</sub> in low-mass star formation // *Astron. and Astrophys* — 2013. — V. 557. — A35.
16. *Audard et al. (2014)* Episodic Accretion in Young Stars // *Protostars and Planets VI* — 2014. — P. 387.

17. Lee (2007) Chemical Evolution in VeLLOs // *Journal of Korean Astronomical Society* — 2007. — V. 40. — Pp. 83-89.
18. Dunham & Vorobyov (2012) Resolving the Luminosity Problem in Low-mass Star Formation // *Astrophys. J* — 2012. — V. 747. — A52.
19. Vorobyov et al. (2018) Early evolution of viscous and self-gravitating circumstellar disks with a dust component // *Astron. and Astrophys* — 2018. — V. 614. — A98.
20. Lee et al. (2019) The ice composition in the disk around V883 Ori revealed by its stellar outburst // *Nature Astronomy* — 2019. — V. 3. — Pp. 314-319.

**Благодарности** Диссертантка выражает благодарность В. В. Акимкину за научное руководство, а также благодарит своих коллег и соавторов, в особенности Д. З. Вибе, Д. А. Семёнова и Э. И. Воробьёва, за помощь в работе и плодотворное сотрудничество.