

На правах рукописи

Борщева Екатерина Владимировна

**Процессы в адсорбированном веществе
и их влияние на химическую эволюцию
дозвёздных ядер и протопланетных дисков**

1.3.1. Физика космоса, астрономия

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

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

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор РАН Вибе Дмитрий Зигфридович, заведующий отделом физики и эволюции звёзд ФГБУН Института астрономии Российской академии наук, г. Москва

Научный консультант:

к.ф.-м.н. Васюнин Антон Иванович, заведующий научной лабораторией астрохимических исследований ФГАОУ ВО “УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина”, г. Екатеринбург

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., доцент Аязов Валерий Николаевич, директор Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Самара

д.ф.-м.н. Пирогов Лев Евгеньевич, ведущий научный сотрудник ФГБНУ “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук”, г. Нижний Новгород

Ведущая организация:

ФГБУН Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится 23 декабря 2025 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при ФГБУН 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 11 ноября 2025 года.

Учёный секретарь диссертационного совета

24.1.032.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

Общая характеристика работы

Актуальность работы. На поверхности межзвёздных пылинок происходит богатый набор астрохимических процессов, в том числе при низких температурах. Между газовой фазой и ледяными мантиями пылевых частиц идёт постоянный обмен веществом. При низких температурах ядра пылинок могут покрываться многослойными ледяными мантиями, и химические процессы в поверхностных и глубинных слоях мантий, вообще говоря, могут различаться. Химия в ледяных мантиях пылинок — один из ключевых компонентов астрохимических моделей.

Непосредственные наблюдения состава ледяных мантий возможны далеко не всегда, однако процессы десорбции различной природы способны существенно изменять состав газовой фазы, наблюдать которую гораздо проще. В частности, реактивная десорбция — высвобождение доли продуктов поверхностной реакции в газовую фазу — даже при температурах ниже 10 К, характерных для внутренних областей дозвёздных ядер, может поставлять в газ значительные количества метанола и других сложных органических соединений, образующихся на поверхности пылевых частиц. Особенно сильно от интенсивности реакций, протекающих в ледяных мантиях пылинок, зависят химические процессы в околозвёздном газопылевом веществе во время и после вспышек светимости звезды на ранней стадии её эволюции. Поэтому реалистичность предсказаний химического состава как газовой, так и твёрдой фазы в объектах межзвёздной среды может существенно зависеть от того, насколько детально мы рассматриваем процессы на поверхности пыли.

В астрохимическом моделировании для описания процессов в адсорбированном веществе широко используется так называемый двухфазный подход, в котором твёрдая фаза рассматривается как целое, без

учёта возможной многослойности ледяных мантий. Однако это представление может оказаться слишком упрощённым, так как реакции в адсорбированном веществе в рамках диффузионного механизма (Лэнгмюра–Хиншельвуда) эффективно идут только на поверхности мантии, но не в её толще (за исключением реакций с участием H и H₂). Пренебрежение этим фактом может привести к искажению химического состава льда.

Различие между поверхностными и глубинными слоями ледяной мантии вводится в так называемых трёхфазных астрохимических моделях, где отдельно рассматривается поверхностное адсорбированное вещество, непосредственно контактирующее с газовой фазой, и вещество глубинных слоёв мантии. Первые подобные модели были описаны в работе [1], а дальнейшее развитие они получили, например, в работах [2, 3, 4]. В настоящей работе трёхфазная модель, схожая с упомянутыми, реализована для изучения химических процессов в протопланетном диске.

Одной из задач является исследование химической эволюции протопланетных дисков у звёзд, испытывающих вспышки светимости. На ранних эволюционных стадиях у большинства звёзд раз в $2\text{--}5 \times 10^4$ лет или чаще происходят вспышки светимости различной амплитуды, возможно, связанные с возрастанием темпа аккреции [5]. Подобные вспышки, вероятно, являются неотъемлемой частью эволюции планетных систем, однако количество известных объектов, находящихся в стадии вспышки, — звёзд типа FU Ориона, или фуоров — всего около двух десятков. Как для уточнения статистики, так и для выявления механизмов роста светимости этот список важно расширить, включив в него звёзды, у которых вспышка завершилась в недавнем прошлом. Индикатором вспышки светимости, произошедшей несколько сотен лет назад, могут быть изменения химического состава окружающего звезду протопланет-

ного диска. В частности, при помощи двухфазной модели в работах [6] и [7] проводилось моделирование химических изменений в околозвёздном газопылевом веществе в условиях вспышки светимости с целью выявить вероятные индикаторы вспышечной активности. Как показано этими авторами, одно из наиболее очевидных следствий вспышки состоит в том, что компоненты, находившиеся в ледяных мантиях космических пылинок, во время вспышки возгоняются в газовую фазу, и их наблюдения предоставляют возможность проверить предположения о поверхностных химических процессах, которые происходили во время довспышечной стадии эволюции диска. Важность состава и эволюции ледяных мантий пылинок в этой задаче подчёркивает необходимость более тщательного моделирования поверхностных процессов.

Другая задача, в которой критическим может оказаться совершенствование моделей химических процессов в ледяных мантиях пылинок, — исследование эволюции сложных органических молекул (СОМ) в холодных дозвёздных облаках. В астрохимии сложные органические молекулы обычно определяются как углеродсодержащие соединения с числом атомов не менее шести (см., например, [8]). Они детектируются на всех стадиях звездообразования. Их обнаружение в холодной тёмной среде на самых ранних стадиях формирования маломассивных звёзд оказалось неожиданным. Новый взгляд на поверхностную химию как на ключевой источник СОМ при низких температурах (около 10 К) основан на экспериментальных данных [9], [10] и [11]. В этих работах было показано, что СОМ, содержащие несколько атомов углерода, — такие как гликольальдегид $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$, этиленгликоль $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ и даже простейшая аминокислота глицин $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ — эффективно образуются в лабораторных экспериментах с физическими условиями, подобными условиям в холодных тёмных облаках. Однако посредством диффузион-

ного механизма Лэнгмюра–Хиншельвуда при температурах 10 К и ниже могут происходить только реакции гидрирования [12]. Реакции между радикалами, которые требуются для образования СОМ, эффективно идут на пыли при температурах 30–40 К [13] и неэффективны при 10 К, поскольку при этой температуре радикалы практически неподвижны. Аналогично, неподвижны будут и атомы тяжелее водорода.

Одно из возможных объяснений экспериментальным результатам [9] и [11] состоит в том, что химические реакции между радикалами, ведущие к образованию СОМ, идут даже при 10 К, если радикалы в мантии оказываются вблизи друг друга как продукты процессов, эффективных при 10 К. Подобные процессы включают в себя адсорбцию из газовой фазы, эффективные диффузионные поверхностные реакции, фотореакции и реакции, индуцированные космическими лучами. Химические реакции на пыли между близко расположенными неподвижными частицами могут происходить недиффузионно. В диссертационной работе недиффузионные механизмы реакций в ледяных мантиях пылинок реализованы в астрохимическом коде и применены для моделирования химического состава дозвёздного ядра L1544.

Ключевым прекурсором для многих СОМ является формальдегид H_2CO — промежуточное звено в цепочке гидрирования монооксида углерода CO , которая приводит к образованию метанола на поверхности межзвёздных пылинок. Различные астрохимические модели успешно воспроизводят содержания СОМ в холодных плотных ядрах, однако неизменно завышают содержание формальдегида на порядок величины, что приводит к инвертированному отношению обилий $\text{H}_2\text{CO} : \text{CH}_3\text{OH}$ в астрохимическом моделировании по сравнению с наблюдаемыми значениями. В настоящей работе содержания, рассчитанные недиффузионным астрохимическим кодом, сравниваются с однородным набором карт

обилий формальдегида, полученных для семи холодных плотных ядер в волокне L1495 с помощью 30-метрового радиотелескопа IRAM. Выявлены ограничения для астрохимических моделей, следование которым позволит точнее воспроизводить наблюдаемое содержание формальдегида и его корреляцию с метанолом. В частности, уточняется коэффициент ветвления реакции $\text{CH}_3 + \text{O}$ при низких температурах.

Цели диссертационной работы

1. Исследовать влияние многослойной структуры ледяных мантий межзвёздных пылинок на химические процессы, происходящие в них до, во время и после вспышек светимости в протопланетных дисках.
2. Изучить влияние недиффузионных химических процессов в многослойных ледяных мантиях пылинок на формирование сложных органических молекул в газе и во льду в условиях, типичных для самых ранних стадий образования маломассивных звёзд.
3. Выявить ограничения для астрохимических моделей, следование которым позволило бы точнее воспроизводить наблюдаемое содержание формальдегида и его корреляцию с метанолом.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Исследован вклад реакций в адсорбированном веществе на формирование молекулярного состава дисков фуоров. Показано, что трёхфазная астрохимическая модель, в отличие от двухфазной, позволяет добиться близких к наблюдаемым содержаний основных углеродсодержащих компонентов ледяных мантий (CO , CO_2 , CH_3OH)

на стадии молекулярного облака. Показано, что во внешних областях протопланетного диска трёхфазная модель предлагает большее количество потенциальных индикаторов произошедшей вспышки светимости, чем двухфазная.

2. Впервые показано, что модель, включающая в себя недиффузионные химические процессы в ледяных мантиях пылинок, позволяет успешно воспроизвести газофазные содержания сложных органических соединений (CH_3OH , CH_3CHO , CH_3OCH_3 , HCOOCH_3 , NH_2CHO), а также положение пика содержания метанола в дозвёздном ядре L1544. Показано, что для объяснения наблюдаемых содержаний сложных органических молекул, синтезируемых в поверхностных реакциях, достаточно предположения о реактивной десорбции с эффективностью $\sim 0.1\%$.
3. Показано, что теоретические содержания твердофазных сложных органических соединений в дозвёздном ядре L1544 составляют 0.1–3% по отношению ко льду H_2O . Наилучшее согласие с наблюдательными данными достигается при значении отношения барьера диффузии частиц на поверхности пыли к их энергии десорбции, равном 0.5 для атомов и 0.3 для молекул.
4. Показано, что разработанная в диссертации недиффузионная версия кода MONACO воспроизводит форму радиального распределения содержания формальдегида в холодных плотных ядрах волокна L1495. Получить количественное согласие между теоретическим и наблюдаемым содержанием формальдегида можно при условии существования низкотемпературного канала у основной реакции синтеза формальдегида $\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{CO}$ с коэффициентом ветвления для продуктов реакции $\text{HCO} + \text{H}_2 : \text{H}_2\text{CO} + \text{H} = 8 : 1$.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые проведено сравнение потенциальных индикаторов вспышек светимости в протопланетном диске для двух- и трёхфазной астрохимических моделей. Впервые с помощью астрохимической модели, включающей в себя недиффузионные процессы на пыли, успешно воспроизведены наблюдаемые обилия сложных органических соединений (CH_3OH , CH_3CHO , CH_3OCH_3 , HCOOCH_3 , NH_2CHO), а также их радиальные распределения и положение метанольного пика в дозвёздном ядре L1544. Показано, что сложные органические молекулы могут образовываться на поверхности пылевых частиц и доставляться в газ путём реактивной десорбции, эффективность которой должна составлять $\sim 0.1\%$. Показано, что в ядре L1544 содержания сложных органических соединений в твёрдой фазе составляют 0.1–3% по отношению к водяному льду. Впервые рассчитана сетка моделей с варьированием отношения энергии диффузии поверхностных частиц к их энергии десорбции и выявлено значение данного параметра, при котором достигается наилучшее согласие с наблюдениями. Впервые проведено сравнение содержаний, рассчитанных недиффузионным астрохимическим кодом, с однородным набором карт обилий формальдегида, полученных для холодных плотных ядер, и выявлены ограничения для астрохимических моделей, следование которым позволило бы точнее воспроизводить наблюдаемое содержание формальдегида и его корреляцию с метанолом.

Научная и практическая значимость. Предложенные списки индикаторов вспышек светимости в протопланетных дисках могут использоваться для выявления молодых звёзд типа FU Ориона, испытывавших усиление темпов аккреции вещества диска на них в недавнем прошлом.

Обнаружение (или отсутствие обнаружения) тех индикаторов, которые были выявлены в трёхфазной модели, но не в двухфазной, позволит подтвердить (или опровергнуть) значимость многослойной структуры пылевых мантий для моделирования химических процессов в молекулярных облаках и протопланетных дисках.

Астрохимическую модель с включёнными в неё недиффузионными процессами в ледяных мантиях пылинок и сеткой реакций, обновлённой согласно новым теоретическим и экспериментальным данным, можно применять с целью дальнейшего теоретического исследования химической композиции объектов межзвёздной среды. Результаты моделирования состава льда в дозвёздном ядре L1544 могут использоваться как референсные для планирования наблюдений.

Моделирование содержаний газофазного формальдегида в холодных плотных ядрах выявило недостаток теоретических и экспериментальных знаний о процессах, приводящих к образованию и разрушению формальдегида, и об их скоростях. Полученные в модели ограничения путей химической реакции $\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{CO}$ по астрономическим наблюдениям при отсутствии необходимых лабораторных и расчётных данных о её скорости могут помочь в планировании теоретических и экспериментальных исследований реакций с участием формальдегида в газовой фазе.

Методология и методы исследования. Задачи диссертации решались при помощи численного моделирования астрохимическими кодами PRESTA [14] и MONACO [4]. Расчёты проводились на сервере Научной лаборатории астрохимических исследований Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина. Результаты анализировались с помощью авторского программного обеспечения.

Достоверность представленных результатов подтверждается сравнением с теоретическими и наблюдательными данными других авторов, а также обсуждением полученных результатов на научных конференциях и семинарах. Результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на конференциях и семинарах в качестве устных докладов:

1. Конференция молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 24 октября 2019 года).
2. Конференция молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 05 ноября 2020 года).
3. Семинар по межзвёздной среде, посвящённый 100-летию В. Г. Горбачёго (онлайн, 27 мая 2020 года).
4. Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых учёных “Астрономия и исследование космического пространства” (онлайн, 1–5 февраля 2021 года).
5. Всероссийская конференция “Звездообразование и планетообразование” (АКЦ ФИАН, Москва + онлайн, 23–24 ноября 2021 года).
6. Семинар Научной лаборатории астрохимических исследований УрФУ (УрФУ, Екатеринбург, 17 февраля 2022 года).
7. Конференция молодых учёных ИНАСАН (ИНАСАН, Москва, 09 ноября 2023 года).
8. The 3rd International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments (Samara, July 2–6, 2024).

9. Всероссийская конференция “Звездообразование и планетообразование” (АКЦ ФИАН, Москва, 11–13 ноября 2024 года).

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в постановке задач, написании кода, проводил расчёты и обрабатывал результаты численных экспериментов, совместно с соавторами участвовал в обсуждении результатов и формулировке выводов.

В частности, автором:

1. Внедрена в код PRESTA модель трёхфазной химии.
2. Внедрено в код MONACO описание недиффузионных процессов в адсорбированном веществе.
3. Реализован в коде MONACO модуль для расчёта распыления (sputtering) космическими лучами вещества ледяных мантий.
4. Переработан модуль расчёта реактивной десорбции в коде MONACO.
5. Выполнены все расчёты кодами PRESTA и MONACO.
6. Разработаны методы анализа и визуализации результатов моделирования.
7. Детально исследован широкий диапазон параметров в моделировании химического состава дозвёздного ядра кодом MONACO, среди них определены оптимальные.
8. Дано описание ключевых химических процессов, влияющих на содержания изучаемых соединений.
9. Написан основной текст работ [A1] и [A4], а также раздел “Chemical modelling” работы [A3].

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Число страниц в диссертации 183, рисунков 24, таблиц 16. Список литературы содержит 235 наименований. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, из них 4 — в журналах, рекомендованных 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, а также их научная и практическая значимость. Приводится информация об апробации результатов, научных публикациях по итогам исследований и вкладе автора в работу.

В **Главе 1** рассмотрено влияние многослойной структуры ледяных мантий пылинок на химические процессы, происходящие в них до, во время и после вспышек светимости в протопланетных дисках. Моделирование проводилось астрохимическим кодом PRESTA [14], разработанным в Институте астрономии РАН. Показано, что на стадии, предшествующей формированию диска, рассмотрение различий между поверхностью и толщиной мантии не столь значимо, однако после образования диска учёт особенностей химических процессов в различных слоях мантии становится более существенным. В частности, в трёхфазной модели (газ, поверхность мантии, толщина мантии) по сравнению с двухфазной моделью увеличивается количество потенциальных индикаторов вспышки, сохраняющих “нетипичные” содержания на протяжении сотен лет после окончания вспышки. Единственным соединением, которое чувствительно к вспышке в двухфазной модели и нечувствительно к ней в трёхфаз-

ной, оказывается адсорбированный формамид NH_2CHO .

В данной главе сравниваются содержания химических соединений, полученные для двух- и трёхфазной моделей как на стадии молекулярного облака, так и на стадии протопланетного диска. Дается интерпретация результатам — в частности, обсуждается поведение значимых индикаторов вспышки светимости в настоящей и предыдущих аналогичных работах, а также оговаривается роль отношения барьера диффузии (E_{diff}) к барьеру десорбции (E_{des}) для частиц на поверхности пыли.

В **Главе 2** представлены результаты астрохимического моделирования содержаний СОМ в твёрдой и газовой фазах дозвёздного ядра L1544. В трёхфазный астрохимический код MONACO [4], основанный на уравнениях химической кинетики, были добавлены недиффузионные процессы, новые пути образования ацетальдегида и метана в твёрдой фазе, а также внедрено изменение энергий десорбции Н и H_2 в соответствии с долей поверхности пылинки, покрытой молекулами H_2 . Результаты моделирования находятся в согласии с наблюдательными данными. Показано, что реакции на поверхности пыли между такими радикалами, как CH_3 , CH_3O и HCO , эффективно протекают в недиффузионном режиме и играют ключевую роль в формировании льдов СОМ. В газовую фазу СОМ доставляются посредством реактивной десорбции, которая усиливается благодаря поверхностным реакциям присоединения и абстракции водорода. По результатам моделирования содержания СОМ во льду находятся в диапазоне 1%–3% (метилформиат HCOOCH_3) либо нескольких десятых процента (ацетальдегид CH_3CHO , диметиловый эфир CH_3OCH_3) по отношению к водяному льду. Обнаружено, что на газофазные содержания СОМ существенно влияет выбор параметризации для эффективности реактивной десорбции. Также предложены ограничения для отношения энергии диффузии поверхностных частиц (E_{diff})

к их энергии десорбции (E_{des}).

В данной главе даются обилия СОМ в основной модели, использующей интерпретацию реактивной десорбции по Гэрроду, и обсуждаются химические процессы, приводящие к таким содержаниям компонентов. Затем представлено сравнение с моделью, в которую внедрена реактивная десорбция по Миниссале, и результаты для сетки моделей по $E_{\text{diff}}/E_{\text{des}}$. Обсуждаются отношения содержаний газофазных СОМ и метанола, роль туннелирования сквозь барьеры диффузии для атомарного и молекулярного водорода, сравнение с предыдущей реализацией кода MONACO, коэффициент прилипания для адсорбции соединений на пыль, а также внедрение распыления космическими лучами как одного из типов десорбции.

В **Главе 3** расчёты, выполненные недиффузионной версией кода MONACO, которая представлена в Главе 2, сравниваются с наблюдаемыми содержаниями формальдегида H_2CO в холодных плотных ядрах. Модель воспроизводит форму профиля H_2CO , однако завышает его содержание в пределах порядка величины. Тестирование показало, что наиболее эффективный способ приблизить модельные содержания к наблюдаемым — добавление дополнительного канала у ключевой газофазной реакции $\text{CH}_3 + \text{O}$, одним из продуктов которой является формальдегид.

Приводятся результаты расчётов, в частности, сравнение основной модели с моделью, имеющей дополнительный канал у реакции $\text{CH}_3 + \text{O}$, а также сравнение результатов моделирования с наблюдательными данными.

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

В Приложениях 1, 2 и 3 содержатся дополнительные материалы по соответствующим главам.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] **Борщева Е. В.**, Вибе Д. З. Вспышки светимости в протопланетных дисках: трёхфазная астрохимическая модель // *Астрономический журнал* — 2022. — Т. 99. — № 5. — Стр. 389-416.
- [A2] *Jiménez-Serra I., Megías A., Salaris J., Cuppen H., Taillard A., Jin M., Wakelam V., Vasyunin A. I., Caselli P., Pendleton Y. J., Dartois E., Noble J. A., Viti S., Borshcheva K., Garrod R. T., Lamberts T., Fraser H., Melnick G., McClure M., Rocha W., Drozdovskaya M. N., Lis D. C.* Modelling methanol and hydride formation in the JWST Ice Age era // *Astron. and Astrophys* — 2025. — V. 695. — Pp. A247.
- [A3] *Punanova A. F., Borshcheva K., Fedoseev G. S., Caselli P., Wiebe D. S., Vasyunin A. I.* Correlation between formaldehyde and methanol in prestellar cores // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2025. — V. 537. — Pp. 3686-3700.
- [A4] **Borshcheva K.**, Fedoseev G., Punanova A. F., Caselli P., *Jiménez-Serra I., Vasyunin A. I.* Formation of Complex Organic Molecules in Prestellar Cores: The Role of Nondiffusive Grain Chemistry // *Astrophys. J* — 2025. — V. 990. — Pp. 163.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] **Борщева Е. В.**, Вибе Д. З. Астрохимические базы данных как источник неопределённости при моделировании // *Научные труды*

Института астрономии РАН. — 2019. — Т. 4 — С. 61-66.

- [B2] **Борщева Е. В.** Трёхфазный астрохимический код: моделирование состава молекулярного облака // Сборник научных трудов Всероссийской с международным участием научной конференции студентов и молодых учёных, посвящённой памяти П. Е. Захаровой. — 2021. — С. 93-96.

Цитируемая литература

1. *Hasegawa & Herbst (1993)* Three-Phase Chemical Models of Dense Interstellar Clouds – Gas Dust Particle Mantles and Dust Particle Surfaces // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 1993. — V. 263. — Pp. 589.
2. *Garrod & Pauly (2011)* On the Formation of CO₂ and Other Interstellar Ices // *Astrophys. J* — 2011. — V. 735. — Pp. 15.
3. *Garrod (2013)* A Three-phase Chemical Model of Hot Cores: The Formation of Glycine // *Astrophys. J* — 2013. — V. 765. — Pp. 60.
4. *Vasyunin, Caselli, Dulieu, & Jiménez-Serra (2017)* Formation of Complex Molecules in Prestellar Cores: A Multilayer Approach // *Astrophys. J* — 2017. — V. 842. — Pp. 33.
5. *Audard et al. (2014)* Episodic Accretion in Young Stars // *Protostars and Planets VI* — 2014. — Pp. 387-410.
6. *Wiebe et al. (2019)* Luminosity outburst chemistry in protoplanetary discs: going beyond standard tracers // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2019. — V. 485. — Pp. 1843-1863.
7. *Molyarova et al. (2018)* Chemical Signatures of the FU Ori Outbursts // *Astrophys. J* — 2018. — V. 866. — Pp. 46.

8. *Herbst & van Dishoeck (2009)* Complex Organic Interstellar Molecules // *An. Rev. Astron. Astrophys* — 2009. — V. 47. — Pp. 427-480.
9. *Fedoseev et al. (2015)* Experimental evidence for glycolaldehyde and ethylene glycol formation by surface hydrogenation of CO molecules under dense molecular cloud conditions // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc* — 2015. — V. 448. — Pp. 1288-1297.
10. *Butscher, Duvernay, Danger, & Chiavassa (2016)* Radical-induced chemistry from VUV photolysis of interstellar ice analogues containing formaldehyde // *Astron. and Astrophys* — 2016. — V. 593. — Pp. A60.
11. *Ioppolo et al. (2021)* A non-energetic mechanism for glycine formation in the interstellar medium // *Nature Astronomy* — 2021. — V. 5. — Pp. 197-205.
12. *Hasegawa, Herbst, & Leung (1992)* Models of Gas-Grain Chemistry in Dense Interstellar Clouds with Complex Organic Molecules // *Astrophys. J. Suppl* — 1992. — V. 82. — Pp. 167.
13. *Garrod & Herbst (2006)* Formation of methyl formate and other organic species in the warm-up phase of hot molecular cores // *Astron. and Astrophys* — 2006. — V. 457. — Pp. 927-936.
14. *Semenov & Wiebe (2011)* Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // *Astrophys. J. Suppl* — 2011. — V. 196. — Pp. 25.

Благодарности. Соискатель выражает благодарность за плодотворное сотрудничество своему научному руководителю Дмитрию Вибе, научному консультанту Антону Васюнину, а также своим коллегам и соавторам, в частности, Анне Пунановой, Глебу Федосееву и Виталию Акимкину.