

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.032.01, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело N _____

Решение диссертационного совета от 23 декабря 2025 г. № 48 о присуждении
Борщевой Екатерине Владимировне, Российская Федерация,
учёной степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Процессы в адсорбированном веществе и их влияние на химическую эволюцию дозвёздных ядер и протопланетных дисков» по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия принята к защите 22 октября 2025г. (протокол заседания № 45) диссертационным советом 24.1.032.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 119017 Москва, ул. Пятницкая, д.48, состав совета утверждён приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1731/нк от 13 декабря 2022г., частичные изменения состава внесены приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 846/нк от 20.04.2023.

Соискатель Борщева Екатерина Владимировна, 01.04.1988 года рождения, в 2015 г. окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, и получила степень магистра по направлению

подготовки «Прикладная математика и информатика»; с 01.10.2019 по 30.09.2024 обучалась в аспирантуре ФГБУН Института астрономии РАН (ИНАСАН), г. Москва, по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия. В настоящее время работает в ИНАСАН младшим научным сотрудником.

Диссертация выполнена в отделе физики и эволюции звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор РАН Вибе Дмитрий Зигфридович, заведующий отделом физики и эволюции звёзд ИНАСАН. **Научный консультант** – кандидат физико-математических наук Васюнин Антон Иванович, директор Научно-исследовательского института физики и прикладной математики Уральского федерального университета. Два руководителя обосновываются тем, что Вибе Д.З. руководил общей разработкой модели, а Васюнин А.И. консультировал по вопросам связи результатов моделирования с наблюдениями и экспериментом.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается темой исследования и компетентностью в вопросах, рассматриваемых в диссертации. Компетентность подтверждается публикациями по схожей тематике оппонентов и сотрудников ведущей организации.

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., доцент **Аязов Валерий Николаевич**, директор Самарского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук;

д.ф.-м.н. **Пирогов Лев Евгеньевич**, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), г. Санкт-Петербург, – **в своём положительном отзыве**, составленном старшим научным сотрудником сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе к.ф.-м.н. **Балашевым Сергеем Александровичем**, обсуждённом на объединённом астрофизическом семинаре ФТИ им. А.Ф. Иоффе и утверждённом заместителем директора по научной работе ФТИ им. А.Ф. Иоффе д.ф.-м.н. **Брунковым Павлом Николаевичем**, указала, что диссертационная работа «Процессы в адсорбированном веществе и их влияние на химическую эволюцию дозвёздных ядер и протопланетных дисков» посвящена восполнению пробелов в теоретическом понимании химической эволюции молекулярного газа при содействии межзвёздной пыли, а также наблюдательных проявлений влияния химии в ледяных мантиях пылинок на распространённости сложных молекул. Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Борщева Екатерина Владимировна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Соискатель имеет 6 печатных научных работ. По теме диссертации опубликованы 6 работ в рецензируемых научных изданиях, из них 4 – в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в российские и международные реферативные базы данных и системы цитирования (РИНЦ, WoS, Scopus). Все 4 работы опубликованы в журналах, отнесённых к категории K1 и имеющих уровень в Белом списке, равный 1. Основные результаты диссертации, выносимые на защиту, в этих работах изложены

полностью. Случаев заимствования материала без ссылки на автора не выявлено.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Борщева Е.В., Вибе Д.З. Вспышки светимости в протопланетных дисках: трехфазная астрохимическая модель // **Астрономический журнал**. – 2022. – т. 99, № 5. – с. 389-416.

2. Jim'enez-Serra I., Meg'ias 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 // **Astronomy and Astrophysics**. – 2025. – v. 695. – id.A247, 26 pp.

3. 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 of the Royal Astronomical Society**. – 2025. – v. 537, Issue 4. – pp. 3686-3700

4. Borshcheva K., Fedoseev G., Punanova A.F., Caselli P., Jim'enez-Serra I., Vasyunin A.I. Formation of Complex Organic Molecules in Prestellar Cores: The Role of Nondiffusive Grain Chemistry // **Astrophysical Journal**. – 2025. – v. 990, Issue 2. – id.163, 25 pp.

Дополнительных отзывов о диссертации и автореферате не поступало.

Диссертация посвящена созданию трёхфазной модели химических реакций в межзвёздной среде и внедрению недиффузионных химических процессов в трёхфазный астрохимический код. Разработанная трёхфазная модель, в отличие от широко используемой двухфазной модели межзвёздной химии, позволила добиться близких к наблюдаемым содержаний основных углеродсодержащих компонентов ледяных мантий (CO, CO₂, CH₃OH) на стадии молекулярного облака. Проанализировано влияние недиффузионных химических процессов в многослойных ледяных мантиях пылинок на

формирование сложных органических молекул на ранних стадиях образования маломассивных звёзд.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– 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 в ледяных мантиях пылинок, 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 проведено сравнение содержаний, рассчитанных астрохимическим кодом с включением недиффузионных процессов, 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.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что разработанную 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 изучения химического состава различных астрономических объектов.

Практическое значение заключается в том, что предложенные списки индикаторов вспышек светимости в протопланетных дисках могут использоваться для выявления молодых звёзд типа FU Ориона, в недавнем прошлом испытывших усиление темпов аккреции на них вещества диска. Результаты моделирования состава льда в дозвёздном ядре L1544 могут использоваться как референсные для планирования наблюдений.

Достоверность результатов моделирования, представленных в работе, подтверждается сравнением с теоретическими и наблюдательными данными других авторов, а также обсуждением полученных результатов на научных конференциях и семинарах.

Личный вклад соискателя. Соискатель 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, соискателем внедрена в код PRESTA модель трёхфазной химии, внедрено в код MONACO описание недиффузионных процессов в адсорбированном веществе, реализован в коде MONACO модуль для расчёта распыления космическими лучами вещества ледяных мантий, переработан модуль расчёта реактивной десорбции в коде MONACO, выполнены все расчёты кодами PRESTA и MONACO, разработаны методы анализа и визуализации результатов моделирования, детально исследован широкий диапазон параметров в моделировании химического состава дозвёздного ядра кодом MONACO, а также дано описание ключевых химических процессов, влияющих на содержания изучаемых соединений.

В ходе защиты диссертации были **высказаны критические замечания, на которые соискатель дал ответы:**

Замечание: В главе 3 утверждается, что основным источником формальдегида в газовой фазе является реакция $\text{CH}_3 + \text{O}$ с несколькими каналами продуктов: $\text{H} + \text{H}_2\text{CO}$ (1), $\text{HCO} + \text{H}_2$ (2), $\text{CON} + \text{H}_2$ (3) и $\text{CH} + \text{H}_2\text{O}$ (4), где каналы (1) и (2) доминируют. В молекулярном облаке реакция

протекает в условиях единичного столкновения, поскольку время реакции намного меньше времени газокинетических столкновений. Реакция $\text{CH}_3 + \text{O}$ в условиях единичных столкновений экспериментально исследовалась в работе: Balucani et al. (2011). В этой работе экспериментально обнаружено, что основной продукт реакции – формальдегид, что не согласуется с предположением, принятым в диссертации.

Ответ: В упомянутой работе Balucani et al. (2011) пиковая скорость пучка атомарного кислорода составляет ≈ 2.7 км/с, что намного выше тепловых скоростей компонентов межзвёздной среды при 10К, составляющих порядка 0.1 км/с. Поэтому результаты, полученные в работе Balucani et al. (2011), могут не вполне соответствовать процессам, имеющим место в холодных плотных ядрах.

Замечание: В описании характеристик реактивной десорбции (РД) есть неясности. Так, на стр. 66 сказано, что значение вероятности РД взято равным 0.01. В то же время эффективности РД, приведённые в Табл. 2.7 для модели GRD для различных химических реакций, составляют от 0.02% до 0.1%. В результатах сказано, что эффективность РД должна составлять порядка 0.1%. Следует объяснить, как связаны между собой вероятность и эффективности РД и приведённые значения.

Ответ: На стр. 66 указано, что значение параметра a в выражении (2) из Garrod et al. (2007), где вычисляется эффективность реактивной десорбции f , взято равным 0.01. Данное выражение имеет вид $f = (aP)/(1 + aP)$, где P , в свою очередь, отвечает за вероятность того, что энергия $E > E_{\text{des}}$ присутствует в связи «молекула-поверхность» как в дополнительной вибрационной моде. Эффективность РД для каждой из упомянутых в замечании реакций рассчитывается по данной формуле. Суммарная эффективность доставки компонентов в газ посредством РД составляет 0.06 для HCOOCH_3 , 0.11 для CH_3OCH_3 , 0.17 для CH_3OH и 0.31 CH_3CHO , что по порядку составляет 0.1%. Исключением является NH_2CHO , для которого эффективность РД оказывается равной 0.03%. В таблице 2.7, как отмечено в тексте диссертации,

эффективность РД для каждой из реакций умножена на долю поверхности, не покрытой водяным льдом (она составляет 65% в модели GRD) для сравнения с моделью из Vasyunin et al. (2017).

Замечание: На рисунке 2.3 приведены «карты согласия» обилия 6 молекул. При этом, хотя в тексте работы сказано, что карты были свёрнуты с диаграммой направленности телескопа, из текста не ясно, какому пространственному размеру диаграмма направленности соответствует. Поэтому из рисунка не понятно, отражает ли дискретизация по оси абсцисс на рисунке 2.3 реальное разрешение наблюдательных данных? Если разрешение данных более грубое, то следовало бы выбрать шаг по оси абсцисс, соответствующий наблюдаемому разрешению. То же самое, на Рис. 2.4 и 2.8 – для наблюдаемых точек стоило бы добавить пространственное разрешение наблюдений как неопределённость оценки R , а также в разделе 2.4.1. Дополнительно, не описано как получались модельные лучевые концентрации для сравнения – какая модель предполагалась? Например, если облако сферическое, то в направлении на пылевой пик учитывался ли возможный вклад от оболочки, в которой содержание метанола, по-видимому, выше, чем в ядре?

Ответ: Расстояние до ядра L1544 оценивается в 135-140 пк, что для гауссова профиля с шириной 26" даёт линейный масштаб $26 \times 135 = 3510$ а.е. Таким образом, диаграмма направленности соответствует пространственному размеру ≈ 3500 а.е. Расстояния указаны по оси ординат (по оси абсцисс дано модельное время); вероятно, делать шаг оси через 3500 а.е. было бы не очень удобно, однако стоило указать на рисунках пространственное разрешение наблюдательных данных. Для получения модельных лучевых концентраций использовалась сферическая модель ядра радиусом $\approx 65\,000$ а.е. с радиальным профилем, полученным в Keto & Caselli (2010). Вклад от богатой метанолом оболочки (≈ 4000 а.е. от пылевого пика) в направлении пылевого пика был учтён.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 17 докторов наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 18, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.



Egn

Чупина Наталия
Викторовна

9