



УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки
Института астрономии
Российской академии наук
проф. РАН, д.ф.-м.н. Сачков М. Е.
«16» октября 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, в которой выполнена диссертация

Выписка из протокола Астрофизического семинара Института астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) от 09 октября 2025 г. Присутствовали 19 научных сотрудников, в том числе:

д.ф.-м.н. Д. В. Бисикало, к.ф.-м.н. Н. В. Чупина, д.ф.-м.н. Б. М. Шустов, д.ф.-м.н. Л. И. Машонкина, д.ф.-м.н. Н. Н. Чугай, д.ф.-м.н. В. И. Шематович, к.ф.-м.н. Р. В. Золотарев, к.ф.-м.н. А. П. Топчиева, к.ф.-м.н. М. С. Мурга, д.ф.-м.н. М. С. Кирсанова, д.ф.-м.н. Д. З. Вибе, д.ф.-м.н. М. В. Барков, к.ф.-м.н. В. В. Акимкин, д.ф.-м.н. Т. А. Рябчикова, к.ф.-м.н. П. А. Лёвкина, к.ф.-м.н. А. В. Соболев, Д. А. Мосунова, А. А. Фарафонтова, Г. Н. Цуриков.

Слушали: доклад Е. В. Борщевой о диссертации «Процессы в адсорбированном веществе и их влияние на химическую эволюцию дозвёздных ядер и протопланетных дисков», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. — физика космоса, астрономия.

Борщева Екатерина Владимировна, род. 01.04.1988, в 2015 г. окончила НИУ «Высшая школа экономики» и получила степень магистра по направлению «Прикладная математика и информатика». В период 2019–2024 гг. проходила обучение в аспирантуре ИНАСАН. Работает в ИНАСАН в Отделе физики и эволюции звёзд младшим научным сотрудником с октября 2019 г. по настоящее время. Научным руководителем является д.ф.-м.н. Вибе Дмитрий Зигфридович, заведующий Отделом физики и эволюции звёзд ИНАСАН.

По итогам обсуждения диссертации «Процессы в адсорбированном веществе и их влияние на химическую эволюцию дозвёздных ядер и протопланетных дисков» принято следующее заключение:

Актуальность. 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 посредством адсорбции и различных видов десорбции. 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 современных астрохимических моделей. 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.

Различие между поверхностными и глубинными слоями ледяной мантии вводится в так называемых трёхфазных астрохимических моделях, где отдельно рассматривается адсорбированное вещество, непосредственно контактирующее с газовой фазой, и вещество глубинных слоёв мантии. В диссертационной работе такая трёхфазная модель реализована для исследования химических процессов в околозвёздном газопылевом (протопланетном) диске.

Химические реакции на пыли между близко расположенными неподвижными при 10 К тяжёлыми радикалами могут происходить за рамками диффузионного механизма Лэнгмюра-Хиншельвуда, то есть недиффузионно. В диссертационной работе недиффузионные механизмы реакций в ледяных мантиях пылинок реализованы в астрохимическом коде и применены для моделирования химического состава дозвёздного ядра L1544.

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, испытавших усиление темпов аккреции вещества диска на них в недавнем прошлом. 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.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность представленных в работе результатов моделирования 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.

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, активно участвовал в написании статей по результатам исследований.

Все положения, выносимые на защиту, должным образом аргументированы и изложены в 6 работах, 4 из которых опубликованы в журналах из списка журналов, рекомендованных ВАК.

По представленному докладу на семинаре ИНАСАН были заданы следующие вопросы:

Шустов: Что можно сказать о согласовании ваших результатов с наблюдениями?

Чугай: Какими параметрами характеризуется полупрозрачное облако? О прозрачности в каком диапазоне идёт речь?

Бисикало: Коэффициент ветвления реакции $\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{CO}$ менялся произвольным образом?

Бисикало: Каков допустимый диапазон значений отношения энергии диффузии к энергии десорбции?

Шематович: Почему у вас в модели получается больше метанола, чем формальдегида?

Чугай: С какими погрешностями известны коэффициенты скоростей реакций в астрохимических моделях?

Докладчик ответил на все поставленные вопросы.

Участники Астрофизического семинара ИНАСАН считают, что представленная диссертация является завершённой научно-исследовательской работой, уровень которой полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация Борщевой Екатерины Владимировны «Процессы в адсорбированном веществе и их влияние на химическую эволюцию дозвёздных ядер и протопланетных дисков» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. — физика космоса, астрономия.

Заключение принято на заседании Астрофизического семинара Института астрономии РАН 09 октября 2025 г. Присутствовало на заседании 19 чел. Результаты голосования: «за» — 19 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел., протокол №6 от 09 октября 2025 г.

Секретарь Астрофизического семинара ИНАСАН к.ф.-м.н. В. В. Акимкин

Ученый секретарь ИНАСАН к.ф.-м.н. М. С. Мурга

