



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГАОУ ВО
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, д.э.н., доцент
Кортов С. В.
" 07 " октября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Диссертация «Исследование фракционирования дейтерия в химических соединениях в областях образования звезд малых масс» выполнена на кафедре астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды и научной лаборатории астрохимических исследований Института естественных наук и математики.

В период подготовки диссертации соискатель **Петрашкевич Игорь Вячеславович** был прикреплен для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук к ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия с 01.11.2024г. (приказ № 943/05 от 01.11.2024г.) по настоящее время, а также работал с 2019 года в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в Институте естественных наук и математики в должности лаборанта-исследователя. С 2025 года и по настоящее время И.В. Петрашкевич работает в должности младшего научного сотрудника (основное

место работы) и в должности лаборанта-исследователя (внутреннее совместительство) научной лаборатории астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды.

В 2023 г. соискатель с окончил специалитет ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по направлению подготовки 03.05.01 Астрономия.

Научный руководитель – Dr. rer. nat., кандидат физико-математических наук Васюнин Антон Иванович, заведующий научной лабораторией астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Выписка из протокола № 4

объединенного заседания кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды и Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой от 04.09.2026 г.

ПРИСУТСТВОВАЛИ: **Бражко Варвара Валерьевна**, инженер Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Васюнин Антон Иванович**, Dr. rer. nat., кандидат физико-математических наук, заведующий научной лабораторией астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Горда Станислав Юрьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Дьяченко Алексей Вячеславович**, ассистент кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Калинина Наталия Дмитриевна**, инженер 2 категории, Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Картеева Варвара Михайловна**, лаборант-исследователь

научной лаборатории астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Кожевникова Алла Валерьевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Кузнецов Эдуард Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Кулеш Максим Вячеславович**, ассистент кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Ладейщиков Дмитрий Антонович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Медведев Михаил Геннадьевич**, лаборант-исследователь научной лаборатории астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Михневич Варвара Олеговна**, младший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Накибов Руслан Субхиддинович**, лаборант-исследователь научной лаборатории астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Парфёнов Сергей Юрьевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Пермякова Татьяна Александровна**, младший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Попова Мария Эриковна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой; **Салий Светлана Викторовна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Сатонкин Николай Артемович**, лаборант-исследователь научной лаборатории астрохимических исследований кафедры астрономии,

геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Селезнев Антон Федорович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Смирнова Ксения Ильдаровна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды; **Старицин Евгений Игоревич**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой.

Председатель заседания: **Селезнев Антон Федорович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды.

Слушали:

доклад Петрашкевича И.В. о диссертации «Исследование фракционирования дейтерия в химических соединениях в областях образования звезд малых масс», представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия.

Вопросы:

1. К.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой Ладейщиков Д.А.:

1. Проводилась ли вами верификация полученных результатов путём сопоставления с независимыми литературными источниками? Согласуются ли ваши данные с известными теоретическими моделями и экспериментальными результатами?
2. Каким образом вы объясняете расхождения (если они есть) между вашими результатами и данными других исследователей?

2. Лаборант-исследователь научной лаборатории астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды Сатонкин Н.А.:

1. Какие выводы о физических условиях, механизмах формирования и происхождении азотсодержащих соединений позволяют сделать данные об аномально высоком отношении D/H в этих молекулах?

3. Д.ф.-м.н., профессор кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды Селезнев А.Ф.:

1. Чем обусловлено разделение наблюдательной выборки на две статистически значимые группы, и какие физические или химические параметры лежат в основе этого разделения?

4. К.ф.-м.н., старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой Парфенов С.Ю.:

1. Необходимо дополнить автореферат библиографическими ссылками на публикации соискателя по теме диссертации.

5. Д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории им. К.А. Бархатовой Горда С.Ю.:

1. Обозначает ли знак «+» в верхнем индексе химической формулы положительно заряженный ион (катион)?

С положительной оценкой диссертационной работы выступили доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды, Селезнев Антон Федорович, Dr. rer. nat., к.ф.-м.н., зав. научной лабораторией астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды ИЕНиМ УрФУ, Васюнин Антон Иванович (научный руководитель).

По результатам рассмотрения диссертации «Исследование фракционирования дейтерия в химических соединениях в областях образования звезд малых масс» принято следующее **заключение:**

Диссертационная работа Петрашкевича Игоря Вячеславовича является самостоятельным научным трудом, по объему и качеству проведенных исследований соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Личный вклад автора заключался в поиске и анализе литературных данных по теме диссертационной работы, постановке и проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов, а также в подготовке к публикации результатов проведенных исследований.

Степень достоверности результатов и апробация работы обеспечивается тем, что результаты анализа наблюдений и моделей согласуются между собой и с результатами других авторов. Основные результаты и выводы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, и описаны в рецензируемых научных статьях.

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Исследование процессов звездообразования является одной из фундаментальных тем в астрофизике и астрохимии. Исследования начальных стадий звездообразования помогают понять, как формировались планетарные системы и наша Солнечная система. Современные исследования показывают, что формирование химических соединений, содержащихся в планетарных системах, начинается на ранних стадиях звездообразования – в молекулярных облаках и холодных плотных ядрах. Это позволяет использовать наблюдения химического состава объектов для анализа физических условий в них, начиная с самых ранних стадий звездообразования. Молекулярные облака — это холодные газопылевые структуры с температурой ~ 20 К и плотностью 100 —

1000 см⁻³. Молекулярные облака Персея и Змееносца, благодаря своей относительной близости (130—300 пк), представляют собой удобные объекты для исследования химических процессов в межзвёздной среде, поскольку позволяют с достаточным пространственным разрешением изучать структуру и физические условия в холодных плотных ядрах и протозвёздах. Молекулярные облака состоят из 70 % водорода в атомарной, ионизированной или молекулярной форме, 28 % гелия и оставшиеся 2 % — более тяжёлые элементы. При низкой плотности начинают протекать химические реакции, на этой стадии уже формируются важнейшие молекулы, такие как CO и H₂O. Молекулярные облака содержат более плотные сгустки газа и пыли — холодные плотные ядра. Холодные плотные ядра имеют температуру ниже средней в молекулярных облаках ~10 К и плотность 10³—10⁶ см⁻³. Такая плотность позволяет активно формировать различные соединения в газовой фазе и на пыли [8, 9]. При таких физических параметрах активно протекают процессы фракционирования изотопов в химических соединениях, наиболее заметный из них — фракционирование дейтерия в химических соединениях (далее фракционирование дейтерия), так как дейтерий тяжелее водорода в два раза, что ведет к значительному различию потенциалов взаимодействия в газовой фазе и на поверхности пылевых частиц для протия и дейтерия. Фракционирование дейтерия — это процесс изменения количества дейтерированных изотопологов относительно количества водородсодержащих (с протием) изотопологов в зависимости от физических параметров среды. В диффузной среде Галактики наблюдается сравнительно низкая доля дейтерия относительно водорода ($D/H = 1.5 \times 10^{-5}$). В областях звездообразования наблюдается повышенное содержание дейтерия в соединениях, что служит индикатором формирования и эволюции холодных плотных ядер (доля дейтерия по отношению к водороду в составе молекул и ионов доходит до 0.01—1). Согласно последним

исследованиям, доля дейтерия в соединениях достигает пика перед переходом от стадии холодного ядра к стадии протозвезды класса 0, в котором начинается нагрев, который запускает процесс фракционирования в обратную сторону. Поэтому фракционирование дейтерия становится инструментом изучения эволюции начальных стадий звездообразования. На данный момент большинство исследований направлены на измерение доли дейтерия на разных этапах звездообразования в ближайших областях образования звезд. Физические параметры газа и межзвездной среды напрямую влияют на скорость образования дейтерированных соединений. Ключевую роль в эффективности образования дейтерированных соединений играют два фактора: соотношение орто- и пара-водорода в соединениях и содержание CO в газовой фазе. Соотношение орто- и пара-водорода в соединениях определяет эффективность реакции образования H_2D^+ из-за разницы в энергиях: $\text{H}_3^+ + \text{HD} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{D}^+ + \text{H}_2 + 230 \text{ K}$.

преобладание пара-водорода смещает равновесие этой реакции вправо, увеличивая содержание H_2D^+ . Вторым важным фактором является содержание CO в газе. Поскольку H_3^+ активнее реагирует с CO, чем с HD, наличие CO в газовой фазе конкурирует с реакцией образования H_2D^+ и снижает её эффективность. Вымерзание CO на пылинках, напротив, освобождает H_3^+ для реакции с HD и способствует росту содержания H_2D^+ . Для оценки содержания CO в газе используют степень вымерзания CO — отношение содержания наблюдаемого CO в газе к каноническому суммарному содержанию CO в газе и на пыли. Оба этих фактора зависят от плотности и температуры газа и пыли: влияют на отношение орто- и пара-водорода и на степень вымерзания CO. Степень ионизации газа дополнительно определяет общее количество ионов, доступных для этих реакций. Астрохимические модели предсказывают, что доля дейтерия в соединениях увеличивается с увеличением степени вымерзания

СО и при низком соотношении орто- и пара-водорода. Однако, как доля дейтерия в соединениях зависит от различных физических параметров (например, температуры и степени вымерзания СО) на данный момент активно исследуется с помощью наблюдений. Фракционирование дейтерия происходит на протяжении всего времени эволюции холодного плотного ядра, при этом изменяется содержание разных молекул в газе. Азотсодержащие соединения могут содержать больше дейтерия при более низкой температуры газа и пыли, когда углеродсодержащие соединения активно вымерзают. Оценки пространственного распределения доли дейтерия в соединениях, связанные с другими физическими параметрами холодных плотных ядер, необходимы для более точного описания фракционирования дейтерия и для определения граничных условий астрохимического и астрофизического моделирования.

Для решения этой проблемы в данной работе был проведен анализ новых наблюдений с высоким пространственным разрешением для пространственные наблюдения низких вращательных переходов дейтерированных и водородсодержащих изотопологов в областях образования звезд малых масс L1688 и B5. Особое внимание в работе уделялось получению статистически значимых численных оценок и пространственного распределения доли дейтерия в трех соединениях, которые являются индикаторами разной плотности в газе в холодных плотных ядрах: $RD(N_2D^+/N_2H^+)$, $RD(DCO^+/HCO^+)$ и $RD(NH_2D/NH_3)$. Полученные оценки доли дейтерия сравнивались с физическими параметрами холодного плотного ядра: температура пыли, температура газа, лучевая концентрация молекулярного водорода, дисперсия скорости в дейтерированных соединениях и степень вымерзания СО. Также полученные пространственные распределения доли дейтерия применялись для оценки химического возраста холодных плотных ядер. Полученные в этой работе результаты могут быть применены в различных астрохимических и

астрофизических моделях для исследования эволюции начальных стадий звездообразования.

Наиболее существенные результаты и их новизна

1. Впервые представлены карты лучевых концентраций для соединений N_2D^+ , DCO^+ , HCO^+ и NH_2D в направлении Oph-C-N, Oph-E-MM2, Oph-F, Oph-H-MM1 холодных плотных ядер в L1688 и N_2H^+ , N_2D^+ , DCO^+ , HCO^+ для волокна B5. На основе этих лучевых концентраций впервые получены карты доли дейтерия $RD(N_2D^+/N_2H^+)$, $RD(DCO^+/HCO^+)$ и $RD(NH_2D/NH_3)$ для этих объектов. Дополнительно, были впервые получены лучевые концентрации N_2D^+ и N_2H^+ и доля дейтерия в направлении Oph-H-MM2 и Oph-I-MM2.

2. Исследованы распределения доли дейтерия в плотных ядрах в соединениях и их корреляции с температурой, лучевой концентрацией молекулярного водорода и степенью вымерзания CO в областях звездообразования L1688 и B5. Впервые были получены соотношения доли дейтерия между углеродсодержащими и азотсодержащими соединениями в L1688 и B5 (2—10 раз). Оценки этих соотношений подтверждают предположения об увеличении доли дейтерия с ростом плотности газа.

3. Впервые представлены радиальные профили доли дейтерия, степени вымерзания CO и степени ионизации в направлении от горячего протозвездного ядра до пика излучения пыли холодного плотного ядра, погруженные в одном волокне B5.

5. а основе архивных данных обзора COMPLETE — наблюдений линии $^{13}CO(1—0)$ было выбрано наиболее подходящее каноническое содержание CO (количество CO в газе и на пыли) в молекулярных облаках Змееносца и Персея. Были получены карты степени вымерзания CO в волокне B5 по наблюдениям $C^{18}O(2—1)$.

6. Впервые был применен метод исследования пространства таких параметров, как оптическая толщина и температура возбуждения для приближения спектров сверхтонких структур переходов $N_2H^+(1\rightarrow 0)$, $N_2D^+(2\rightarrow 1)$, $N_2D^+(1\rightarrow 0)$, $DCO^+(2\rightarrow 1)$, $p\text{-}NH_2D(1_{11}-1_{01})$, $H_{13}CO^+(1\rightarrow 0)$ и $H_{13}CO^+(2\rightarrow 1)$ с низким отношением сигнал-шум для поиска наиболее вероятной температуры возбуждения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы обусловлена результатами анализа данных наблюдений, которые подтверждают основные теоретические предположения об особенностях процесса фракционирования дейтерия на начальных стадиях звездообразования в областях образования звезд малых масс. Практическая значимость диссертации заключается в возможности использовать результаты наблюдений в астрофизических и астрохимических моделях эволюции как граничные условия. Разработанные метод обработки карт наблюдений линий могут быть применены при обработке других наблюдений в субмиллиметровом диапазоне. Пакет `ruspeckit` был дополнен для анализа соединений N_2H^+ и HCO^+ новыми файлами параметров сверхтонкой структуры переходов, которые вошли в релиз. Все результаты наблюдений опубликованы в базе данных CDS.

Соответствие диссертации научной специальности

1. Диссертация полностью соответствует научной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Область исследования диссертационной работы соответствует Паспорту специальности, а именно: п. 1. Наземная и бортовая, в т. ч. спутниковая аппаратура, детекторы и измерительные комплексы для астрофизических и космических исследований, включая исследования Земли из космоса; п. 4. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для научной аппаратуры и обработки данных для всех областей космических исследований, включая методы хранения, передачи и

использования астрономических данных, создание, поддержка и использование архивов, каталогов и баз данных; п. 5. Научные приборы и комплексы, экспериментальные методы и алгоритмы мониторинга и обработки данных космических исследований, включая исследования Земли из космоса.

2. Требованиям, установленным пунктами 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции. Текст диссертации представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора; не содержит результатов научных работ, выполненных в соавторстве без ссылок на соавторов.

Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Petrashkevich I. V.**, Punanova A. F., Caselli P. et al. Deuterium Fractionation in the Oph-H-MM1 Dense Core of the L1688 Low Mass Star-Forming Region // *Astronomy Reports*. — 2020. — Vol. 64, № 8. — Pp. 637–640.

2. **Petrashkevich I. V.**, Punanova A. F., Caselli P., Sipil'a O., Pineda J. E., Friesen R. K., Korotaeva M. G., Vasyunin A. I. Deuterium fractionation in cold dense cores in the low-mass star-forming region L1688 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2024. — Vol. 528, № 2. — Pp. 1327–1353.

3. **Petrashkevich I.**, Punanova A., Caselli P., Sipil'a O., Pineda J. E., Vasyunin A. I. Deuterium Fractionation and CO Depletion in Barnard 5 // *Astrophys. J.* — 2026. — Vol. 997, № 2. — P.

Другие публикации:

4. **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф. Фракционирование дейтерия в дозвездных ядрах в области звездообразования ρ Змееносца // Физика космоса: труды 49-й Международной студенческой научной конференции — 2020 — стр. 101–102.

5. **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф. Доля дейтерия в холодных плотных ядрах в области звездообразования L1688 // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой — 2021 — стр. 64–67.

6. Пунанова А. Ф., **Петрашкевич И. В.** Фракционирование дейтерия в областях маломассивного звездообразования // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой — 2021 — стр. 166–169.

7. **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф. Фракционирование дейтерия в Per-B5 // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых — 2022 — стр. 66–68.

8. **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф., Васюнин А. И. Моделирование доли дейтерия в области образования звезд малых масс L1688 // Физика космоса: труды 50-й Международной студенческой научной конференции — 2023 — стр. 271–273.

9. **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф., Васюнин А. И. Сравнение доли дейтерия из наблюдений и астрохимической модели для холодных плотных ядер // Физика космоса: труды 51-й Всероссийской с международным участием студенческой научной конференции — 2024 — стр. 310–313.

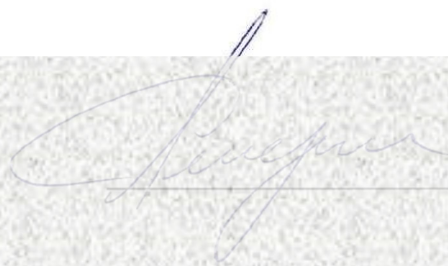
Диссертация «Исследование фракционирования дейтерия в химических соединениях в областях образования звезд малых масс» Петрашкевича Игоря Вячеславовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

В голосовании приняли участие 12 человек. Результаты голосования: за – 12 чел., против – 0 чел., воздержалось – 0 чел.

Председатель заседания:

Селезнев Антон Федорович,

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры астрономии,
геодезии, экологии и мониторинга
окружающей среды ИЕНиМ УрФУ



Секретарь заседания:

Салий Светлана Викторовна,

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры астрономии,
геодезии, экологии и мониторинга
окружающей среды ИЕНиМ УрФУ



ПОДПИСИ
ЗАВЕРШЕНЫ

Ученый секретарь: Федорук
МОРЗОВА Е.А.

Селезнев А.Ф. и Салий С.В.

