

На правах рукописи

Плаkitина Карoлина Владимировна

**Органические молекулы в горячих ядрах
молекулярных облаков**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в ФГБУН Институте астрономии Российской академии наук

Научный руководитель:

д. ф.-м. н. **Кирсанова Мария Сергеевна**, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института астрономии Российской академии наук, г. Москва

Официальные оппоненты:

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»

к. ф.-м. н. **Шахворостова Надежда Николаевна**, старший научный сотрудник ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

Защита диссертации состоится **30 июня 2026 года в 14 час. 00 мин.** на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 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 Российской академии наук и на сайте <http://www.inasan.ru/>

Автореферат разослан 19 мая 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.1.032.01 к. ф.-м. н.

Наталия
Викторовна
Чупина

Актуальность темы диссертации

Исследование механизмов звездообразования является одной из ключевых задач современной астрофизики. С конца XX века исследователи стали уделять особое внимание процессу образования массивных звёзд и их воздействию на окружающую межзвёздную среду (см., например, обзоры [1, 2]). Массивные звёзды — редкие объекты в Галактике. Однако, являясь источником мощного ультрафиолетового (УФ) излучения, они оказывают значительное влияние на межзвёздную среду, изменяя её химический состав и физические характеристики [3]. Несмотря на постоянный интерес к этим объектам, процессы, приводящие к формированию массивных звёзд, изучены не полностью. Существуют несколько теорий формирования массивных звёзд, но ни одна из них не является общепринятой на данный момент. Особый интерес представляет ранняя стадия формирования массивной звезды — стадия горячего ядра, но объекты на этой стадии ещё более редкие, чем массивные звезды. Горячее ядро — компактная (менее 0,1 пк), плотная (10^5 – 10^8 см⁻³), массивная (порядка 100 M_{\odot}) и горячая (более 100 К) оболочка из газа и пыли, которая окружает формирующуюся массивную протозвезду [4, 5]. На сегодняшний день известно около ста горячих ядер в нашей Галактике, семь — в Большом Магеллановом Облаке и два — в Малом [6, 7, 8]. Для изучения процесса формирования массивных звёзд важное место занимает фаза горячего ядра. Эти объекты представляют интерес не только для астрофизики, но и для астрохимии. Горячие ядра привлекли к себе внимание множества исследователей, так как именно в их направлении впервые были обнаружены сложные органические молекулы — молекулы из шести и более атомов [9, 10, 11], что привело к бурному развитию астрохимии и астрохимического моделирования [12, 13, 14, 15, 9, 16, 17].

Как отмечалось ранее, горячие ядра представляют собой редкие объекты в нашей Галактике. Такие источники обнаружены, в частности, в RCW 120 — объекте из каталога Rodgers, Campbell и Whiteoak [18], в котором представлены области излучения H_{α} в юж-

ной части Млечного Пути. RCW 120 представляет собой область H II с ярко выраженной кольцевой морфологией вокруг массивной звезды. На юго-западной границе зоны H II RCW 120 расположена область образования массивных звёзд, источники в которой выделяются среди горячих ядер, поскольку находятся на исключительно ранней стадии формирования [19, 20]. В Главе 1 исследуется химический состав молекулярного газа в окрестности молодых звёздных объектов (МЗО) — горячих ядер в области эмиссионной туманности RCW 120, а также кинематика газа. В Главе 2 представлены результаты астрохимического моделирования, которое позволило выявить причины наблюдаемого повышенного содержания метанола (CH_3OH) — одного из ключевых предшественников сложных органических соединений, — а также установить связь между химическим разнообразием и физическими условиями среды. Такой подход объединяет наблюдательные данные и теоретическое моделирование, что особенно важно для понимания механизмов, лежащих в основе эволюции горячих ядер.

Открытие первых сложных органических молекул в горячих ядрах стало важным этапом в развитии астрохимии, показав, что органическая химия в космосе играет гораздо большую роль, чем предполагалось ранее. В последующие годы стало ясно, что подобные молекулы встречаются и в других средах, однако горячие ядра остаются наиболее богатым источником молекулярного излучения [21].

Различные молекулы могут существовать при разных температурах и плотностях газа. Например, такие соединения как диазенилий (N_2H^+) или аммиак (NH_3), наблюдаются в холодных (с температурами 10–20 K) и плотных областях, где плотность молекулярного водорода превышает 10^4 см^{-3} [22, 23]. В то время как метилацетилен (CH_3CCH) и метилцианид (CH_3CN) обнаруживаются в более горячих средах [24, 25]. При этом CH_3CN , благодаря своему большому дипольному моменту, остаётся чувствительным индикатором более плотного газа даже в относительно горячих областях, что позволяет различать локальные вариации плотности и температуры в преде-

лах одного облака. Важным понятием при анализе молекулярного излучения является критическая плотность — объёмная концентрация, необходимая для столкновительного возбуждения перехода в условиях оптически тонкой среды. Столкновения молекул приводят к перераспределению населённостей их энергетических уровней, что формирует наблюдаемое молекулярное излучение. Его характеристики — прежде всего интенсивности и относительные яркости спектральных линий — определяются плотностью газа и кинетической температурой среды. Таким образом, из анализа спектральных линий, можно получить физические условия в среде. В Главе 2 для определения физических условий в молекулярном газе области RCW 120 используются как упомянутые выше молекулы, так и ряд других соединений. Также в Главе 2 приведены результаты анализа корреляций между лучевыми концентрациями различных молекул. Такой подход позволил выявить связь химического состава с локальными физическими процессами в газе, а также показать сходства и различия в путях образования молекул.

В настоящее время в МЗС наблюдается большое количество молекул и ожидается, что ещё больше будет обнаружено, учитывая неопознанные линии в существующих спектральных обзорах. По состоянию на апрель 2026 года известно 346 молекул — от двухатомных до сложных органических соединений. При этом только с начала 2026 года было открыто три новых молекулы¹. Современный рост объёмов астрономических данных требует внедрения методов автоматизированной обработки. Астрономы работают с огромными наборами спектральных данных в инфракрасном (ИК) и миллиметровом диапазонах от таких объектов как тёмные инфракрасные облака, протозвёзды и области H II. Традиционные «ручные» методы с трудом справляются с обработкой таких больших объёмов данных. В последние годы всё более активно используются алгоритмы машинного обучения для анализа многомерных наборов наблюдательных данных [26, 27]. Методы машинного обучения позволяют

¹<https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>

выявлять скрытые зависимости и закономерности, которые сложно обнаружить традиционными статистическими подходами. Кроме того, машинное обучение помогает выявить нетривиальные комбинации признаков, которые неочевидны при анализе по одному или нескольким параметрам, что особенно важно для сложных многомерных данных. В Главе 3 эти подходы применены к выборке молекулярных облаков на разных стадиях эволюции — в качестве признаков использованы интегральные интенсивности молекулярных линий, инфракрасные потоки и мазерное излучение.

В перспективе, интеграция алгоритмов машинного обучения в рабочие процессы обработки данных крупных телескопов (например, ALMA или JWST) позволит переходить от анализа отдельных участков неба к обработке панорамных обзоров неба в автоматическом режиме, сокращая время от получения данных до научных выводов.

Цели диссертации

Целью работы является исследование молекулярного состава вещества вблизи молодых звёздных объектов, в том числе используя методы машинного обучения. Особое внимание уделяется исследованию области образования массивных протозвёзд, распределению содержаний молекул и физических характеристик в ней. Проведено изучение особенностей образования молекул в условиях постепенного прогрева газо-пылевой среды молодым звёздным объектом. Для ускорения обработки данных и дополнения традиционных подходов к анализу были применены современные методы анализа больших объёмов данных для классификации молекулярных облаков на основе особенностей излучения молекул в них.

Задачи диссертации

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- Провести наблюдения в широком частотном интервале миллиметрового диапазона в направлении молодых звёздных объектов, отождествить линии в полученных спектрах и исследовать пространственное распределение интегральной интенсивности излучения в линиях отождествлённых молекул.
- Определить физические условия вблизи молодых звёздных объектов и провести статистический анализ распределения полученных параметров.
- Определить обилия молекул вблизи молодых звёздных объектов и сравнить с результатами астрохимического моделирования.
- Применить алгоритмы машинного обучения для выявления различных стадий эволюции молекулярных облаков.

Методы исследования

Для решения поставленных в работе задач были проведены наблюдения молекулярного облака с погруженными в него молодыми звёздными объектами в области RCW 120 в широком миллиметровом диапазоне частот. Наблюдения проводились на радиотелескопе APEX в Чили. Для моделирования содержаний молекул использовался астрохимический код Presta [28]. Для анализа наблюдательных данных применялись методы расчёта переноса излучения в условиях локального термодинамического равновесия (ЛТР).

Для ускорения обработки данных и дополнения традиционных подходов к анализу были освоены методы машинного обучения. Они применены к архивным данным каталога молекулярных облаков MALT90 [29, 30, 31], наблюдениям инфракрасной обсерватории *Spitzer*² и базе данных maserDB [32].

²<https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, трёх глав и Заключения. Полный объем работы составляет 129 страниц, включая 35 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 157 наименований.

Во **Введении** обсуждается актуальность диссертационной работы, цели, задачи и методы, использованные для их решения, новизна полученных результатов и их научная и практическая значимость, приведён список публикаций автора и представлен список положений, выносимых на защиту.

Глава 1 посвящена анализу спектральных наблюдений в направлении протозвёзд, расположенных на границе зоны H II области RCW 120 (см. рис. 1 и 2). Основное внимание уделено исследованию признаков истечений в области формирования массивных звёзд (см. рис. 3). Полученные данные свидетельствуют о наличии истечений: вблизи M3O S2 истечения ориентированы вдоль луча зрения, тогда как в районе M3O S1 — перпендикулярно ему. Проведён сравнительный анализ спектров различных молекул: установлено, что излучение метилцианида (CH_3CN) формируется в более тёплой среде по сравнению с областями, где доминируют линии метилацетилена (CH_3CCH) и метанола (CH_3OH). Поскольку температуры в окрестности протозвёзд недостаточно высоки для тепловой десорбции, вероятно, метанол переходит в газовую фазу за счёт разрушения пылинков ударными волнами вблизи истечений. Единственным проявлением ультрафиолетового излучения является повышенное обилие простых углеводородов CCH и *c*-C₃H₂ в области фотодиссоциации.

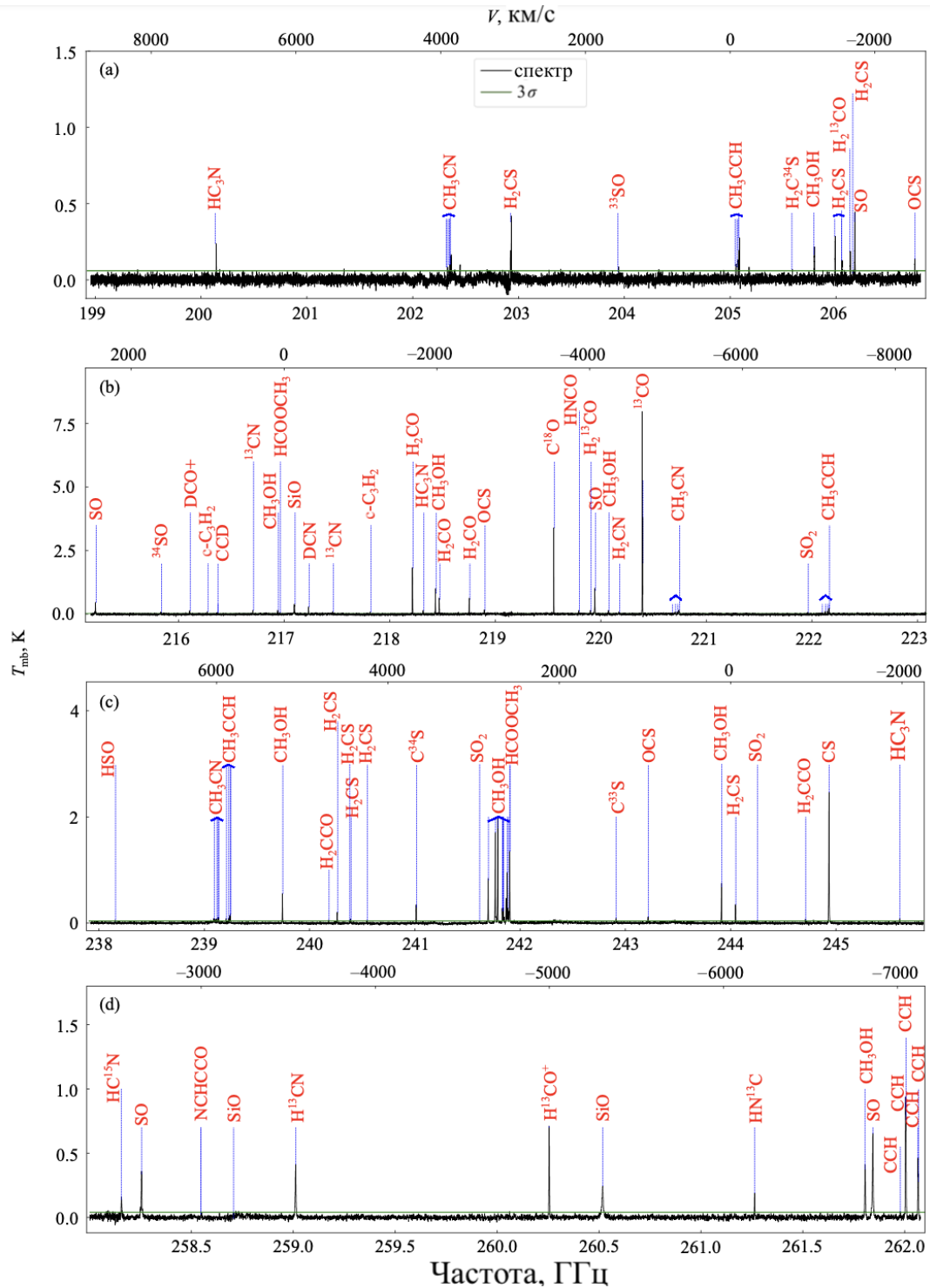


Рис. 1: Широкополосные спектры, полученные на телескопе АРЕХ в направлении М30 S2. Отождествлённые молекулярные линии подписаны. Сплошная зелёная линия — уровень 3σ ; значения σ составляют 19, 21, 12 и 12 мК (от верхней панели к нижней). Из работы [A2].

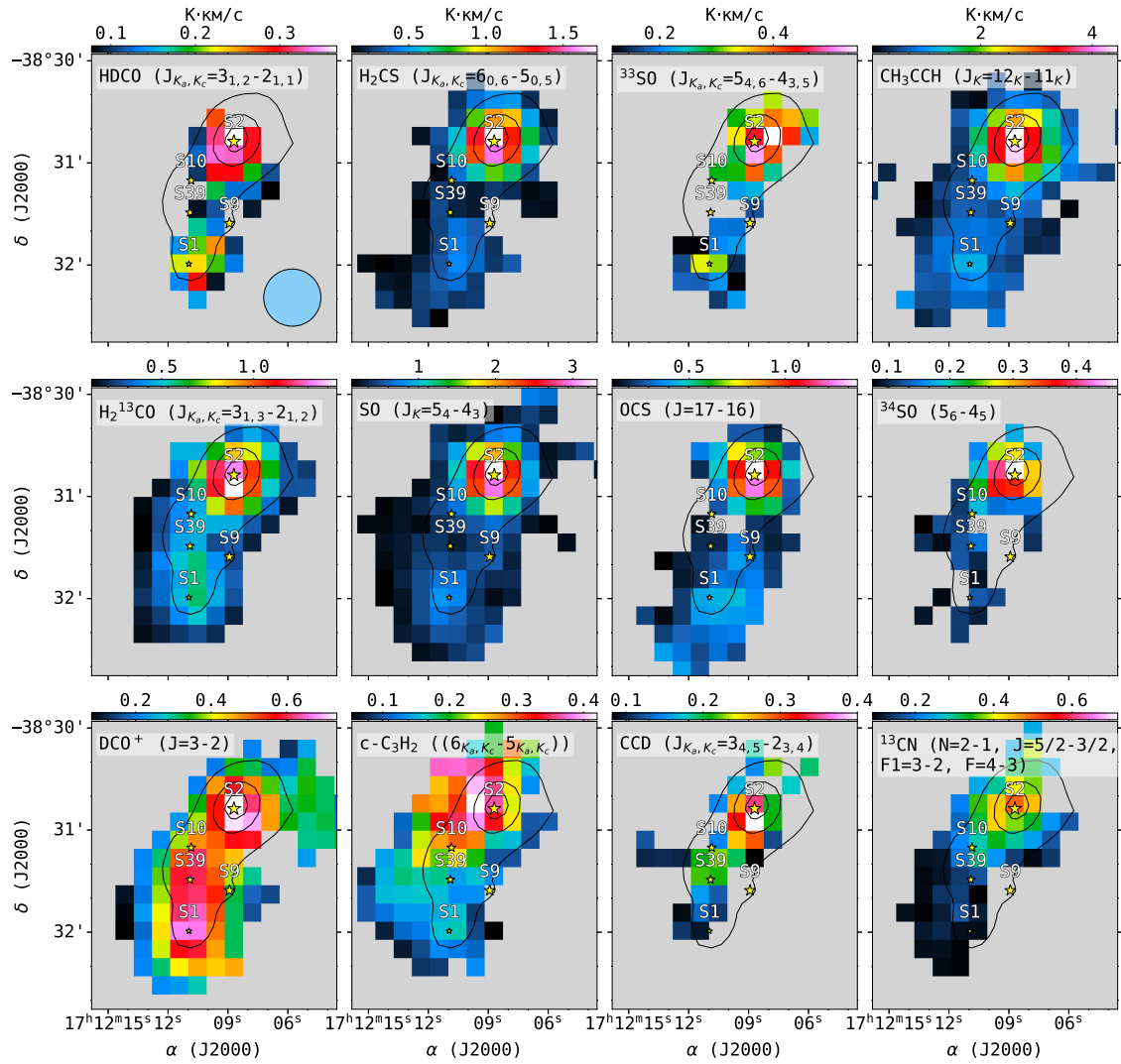


Рис. 2: Карты интегральных интенсивностей некоторых из впервые обнаруженных молекул в RCW 120. Жёлтыми звёздами обозначены МЗО (размер маркера пропорционален массе объекта). Чёрные контуры — излучение пыли на 870 мкм (2.0, 6.0, 10.0 Ян/луч). Голубой кружок в правом нижнем углу первой панели — диаграмма направленности АРЕХ. Из работ [A1] и [A2].

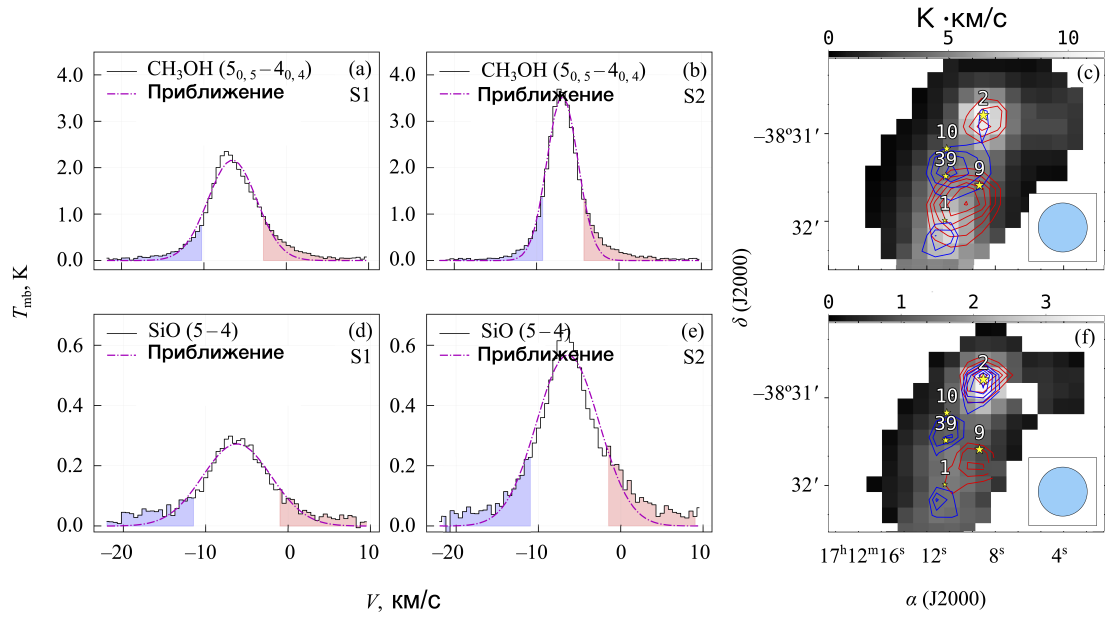


Рис. 3: Карты излучения CH₃OH (5_{0,5}-4_{0,4}, A⁺) — верхняя панель и SiO (5-4) — нижняя панель. Серым показана интегральная интенсивность средней компоненты, синие и красные контуры — крылья линий, смещённые в синюю и красную стороны соответственно. Уровни контуров кратны σ ($\sigma = 0.15$ и 0.14 K·км/с для CH₃OH и SiO). Из работы [A1].

В **Главе 2** определяются физические условия вблизи молодых звёздных объектов и проводится корреляционный анализ лучевых концентраций в наблюдаемой области (см. рис. 4). Также проведено астрохимическое моделирование, позволившее выявить возможные причины формирования наблюдаемой картины. Обсуждаются особенности разрушения мантий пылевых частиц и влияние этого процесса на содержания молекул.

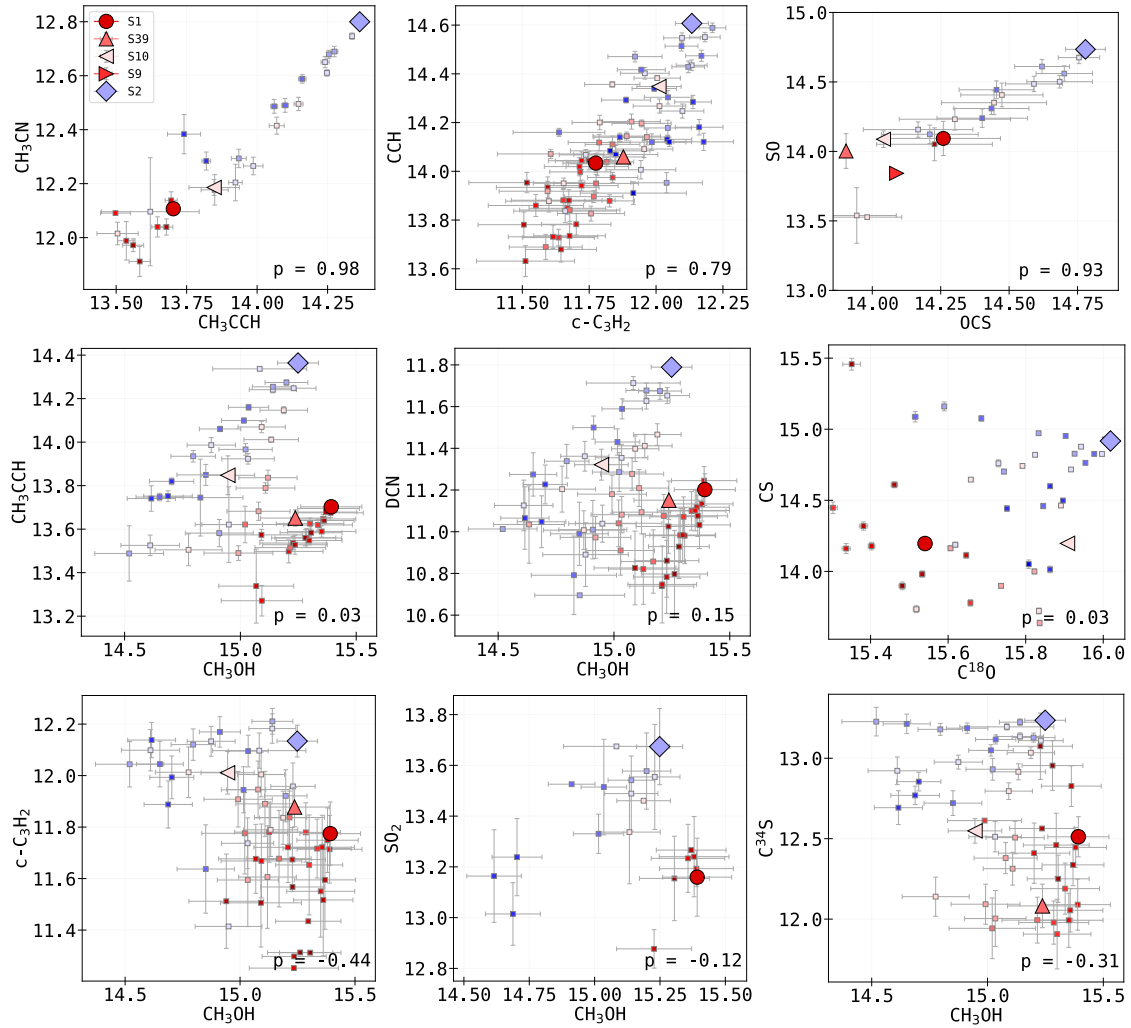


Рис. 4: Сравнение лучевых концентраций молекул. Насыщенность красного/синего оттенка отражает смещение к югу/северу относительно центра карты. Значения, характерные для МЗО отмечены маркерами из легенды. В правом нижнем углу каждой панели — коэффициент корреляции Пирсона p . Из работы [A2].

В **Главе 3** исследуется применение методов машинного обучения для автоматического выявления и классификации молекулярных облаков на различных стадиях их эволюции. В качестве исходных данных используются архивные данные каталога молекулярных облаков MALT90, архивные данные инфракрасной обсерватории *Spitzer* и базы данных maserDB. Для анализа применяются два подхода — обучение с учителем и без учителя. Алгоритмы класте-

ризации, относящиеся к методам обучения без учителя, позволяют выявлять группы объектов непосредственно по их характеристикам, без предварительных знаний об их типах (см. рис. 5). В свою очередь, алгоритмы классификации, обученные на выборках объектов с уже известными типами, дают возможность предсказывать эволюционную стадию молекулярных облаков. Такой подход позволяет оценить эффективность методов машинного обучения как инструмента, дополняющего традиционный анализ, и продемонстрировать их потенциал для изучения процессов звездообразования.

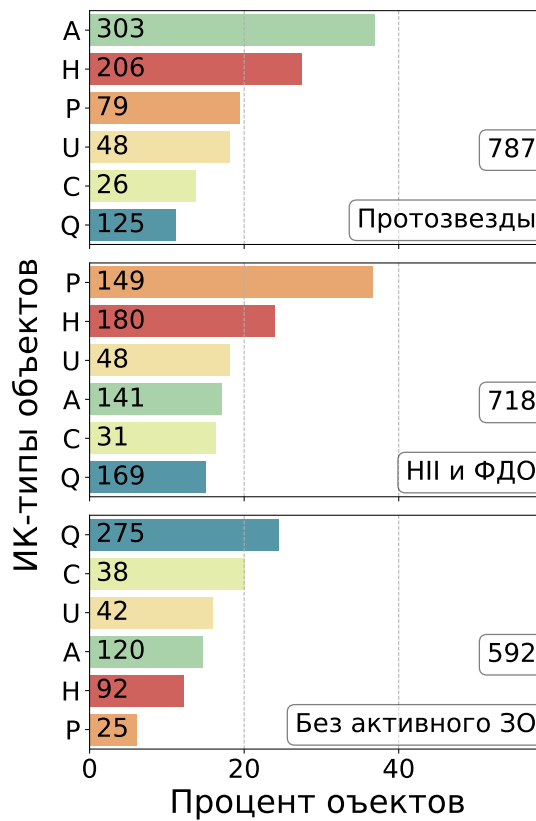


Рис. 5: Распределение типов объектов MALT90 в трёх устойчивых кластерах, выделенных по шести молекулярным линиям (HCO^+ , HNC , N_2H^+ , HCN , C_2H , H^{13}CO^+ — все для перехода $J = 1 - 0$) и ИК-потокам *Spitzer* (3.6–24 мкм). Типы: Q — ИК-тёмные, А — протозвёздные, С/Н — компактные/протяжённые Н II, Р — ФДО, U — без классификации. Числа — количество объектов данного типа в кластере. Из работы [А3].

Положения, выносимые на защиту

1. В результате проведённого астрохимического исследования молекулярного облака RCW 120 построены 57 карт излучения 35 молекул, из которых 24 молекулы обнаружены в этом облаке впервые. В направлении горячего ядра RCW 120 S2 зарегистрировано 95 линий, принадлежащих как простым двухатомным, так и сложным органическим молекулам, содержащим до восьми атомов. Определены физические параметры молекулярного газа в протозвёздах и направления молекулярных истечений.
2. Показано, что содержание молекул в газовой фазе в разных частях молекулярного облака в RCW 120 определяется различными механизмами десорбции с поверхности пылинок. В южной части облака ледяные мантии пылинок, богатые метанолом, разрушаются фотодесорбцией и ударными волнами, что приводит к интенсивному высвобождению молекул в газ. В северной части преобладает тепловая десорбция: нагрев пылинок излучением молодой протозвезды высвобождает молекулы с их поверхности в газовую фазу.
3. Показано, что по интегральным интенсивностям линий излучения молекул HCO^+ , HCN , HNC , N_2H^+ , C_2H и H^{13}CO^+ методами машинного обучения выделяются три устойчивых кластера среди молекулярных облаков: протозвёзды с признаками УФ-излучения, протозвёзды без УФ-излучения и области без активного звездообразования. Разделение на кластеры не зависит от потоков в дальнем ИК-диапазоне, что свидетельствует об астрохимическом сходстве молекулярных облаков разных масс.

Научная новизна

Впервые было проведено картирование молекулярных линий в направлении на молекулярное облако в RCW 120 в миллиметровом диапазоне.

Впервые построены карты распределения интенсивностей более пятидесяти линий молекул в RCW 120, исследованы корреляции лучевых концентраций между ними.

Впервые показано, что фотодесорбция в южной части молекулярного облака в RCW 120 более эффективна, чем в северной.

Впервые показано, что методами машинного обучения только на основе интегральных интенсивностей линий молекул C_2H , N_2H^+ , HCN, HNC, HCO^+ можно эффективно разделить молекулярные облака на эволюционно разные группы.

Впервые методами машинного обучения определена наиболее вероятная эволюционная стадия пятисот двенадцати молекулярных облаков, ранее не имевших классификации, на основе данных в среднем ИК- и миллиметровом диапазонах.

Научная и практическая значимость

Работа вносит вклад в формирование целостной картины образования массивных протозвёзд и эволюции молекулярных облаков, уточняя представления о химическом разнообразии и пространственном распределении молекулярного излучения вблизи горячих ядер на ранней стадии их формирования. Выявленные корреляции между лучевыми концентрациями молекул и их интерпретация в рамках астрохимического моделирования способствуют развитию химико-эволюционных моделей звездообразования.

Результаты работы могут быть использованы для обработки и интерпретации данных радиоастрономических обзоров молекулярных облаков с применением методов машинного обучения. Предложенные методы анализа обеспечивают автоматизированное выделение и классификацию стадий эволюции молекулярных облаков,

что повышает эффективность обработки больших объемов наблюдательных данных и ускоряет идентификацию объектов, представляющих интерес для дальнейших исследований.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- A1 **Плаkitина К.В.**, Кирсанова М.С., Каленский С.В., Салий С.В., Вибе Д.З. Химическое разнообразие и кинематика газа в области образования массивных звезд RCW 120 // *Астрофизический бюллетень*. – 2024. – т. 79, № 2. – с. 240-266.
- A2 **Плаkitина К.В.**, Кирсанова М.С., Вибе Д.З., Кочина О.В. Газофазная и поверхностная химия в области образования массивных звезд RCW 120 // *Астрофизический бюллетень*. – 2025. – т. 80, № 3. – с.362-382.
- A3 **Plakitina, K.V.**, Kirsanova M.S., Ostrovskii A.B., Salii S.V., Gimalieva A.D., Meshcheryakov A.V. Applying machine learning to astrochemical observational data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2026. – Volume 547, Issue 3. – id. 373, 21 pp.

Другие публикации автора по теме диссертации

- B1 Bianchi E., Brünken S., Ceccarelli C., Cordine M., Flint A., Garrod R. T., Gudipati M. S., Gupta D., Heard D. E., Herbst E., Huang K.-Y., Kamp I., Li J., Madhusudhan N., Martin Domenech R., McCoustra M. R. S., Meijer A., Milam S., Millar T. J., **Plakitina K.**, Sims I., van Dishoeck E. F., Viti S., Walker N., Wiesenfeld L., and Wilkins O. H., *Observational astrochemistry in the age of ALMA, NOEMA, JWST and beyond!: general discussion* // *Faraday Discussions* — 2023, Vol. 245, P. 199–220
DOI: 10.1039/D3FD90024J, ISBN: 1359-6640.

Б2 **Плаkitина К. В.**, Кирсанова М. С. *Исследование химического разнообразия и кинематики газа в области образования массивных звезд RCW 120.* // Физика космоса: труды 50-й Международной студенческой научной конференции — 2023 — стр. 428-432.

Личный вклад соискателя

Всего по теме диссертации опубликовано 3 работы в списке изданий, рекомендованных ВАК (А1, А2, А3), и 2 работы (Б1, Б2) в материалах конференций. В работах А1 и А2 соискатель провёл обработку и анализ спектроскопических данных в миллиметровом диапазоне, участвовал в постановке задач, интерпретации и обсуждении полученных результатов. В работе А3 соискатель самостоятельно освоил методы и выполнил ИК-фотометрию по архивным данным телескопа *Spitzer*, освоил работу с библиотеками машинного обучения и самостоятельно провёл весь анализ архивных данных в миллиметровом и ИК-диапазонах. Соискателем написана большая часть текстов совместных статей.

Апробация

Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах и представлены как на российских, так и на зарубежных конференциях и семинарах.

Устные доклады на международных конференциях:

1. Universe AI: Exploring the Universe with Artificial Intelligence, IAU Symposia 397, 2025 г., Афины, Греция.
2. 3rd Conference on Submillimeter and Millimeter Astronomy: Objectives and Instruments, 2025 г., Москва, Россия.
3. 2nd Conference on Submillimeter and Millimeter Astronomy: Objectives and Instruments, 2023 г., Москва, Россия.

4. 14th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, 2023 г., Банья Баста, Сербия.

Стендовые доклады на международных конференциях:

1. Towards new frontiers: the astrochemical journey from young stellar nurseries to exoplanets, 2025, Гархинг-бай-Мюнхен, Германия

Устные доклады на всероссийских конференциях:

1. «Звездообразование и планетообразование» 2022, 2023, 2024, 2025 г. Москва, Россия.
2. ВАК 2024: «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр», 2024 г., САО РАН, посёлок Нижний Архыз, Россия.
3. «Физика Космоса», 2023 г., Екатеринбург, Россия.
4. XX Всероссийская конференция «Современная звёздная астрономия» - 2022», 2022 г., КГО, Карачаево-Черкесская Республика, Россия.

Результаты диссертации также представлялись на семинаре ИНАСАН в 2022, 2023, 2025 и 2026 г.

Благодарности

Соискатель выражает глубокую признательность своему научному руководителю Кирсановой М. С. за поддержку на всех этапах исследования, терпение, доверие, переданный опыт и ценные советы, без которых эта работа была бы невозможна. Диссертант благодарит соавторов за участие в обсуждениях и помощь в обработке и интерпретации данных. Автор также признателен Акимкину В. В. и Павлюченкову Я. Н. за интересные дискуссии и тёплую атмосферу сотрудничества, особенно на начальном этапе работы.

Отдельную благодарность автор выражает Шустову Б. М. и Павлюченкову Я. Н. за внимательное прочтение диссертации и ценные замечания к тексту. Большое спасибо Лёвкиной П. А. за поддержку в непростые времена и за искренний интерес к астрономии, служивший неиссякаемым источником вдохновения. Автор благодарит коллег и друзей из ИНАСАН за полезные дискуссии и атмосферу дружеского взаимодействия.

Автор искренне благодарит своих родных и близких — Ярмач Л. А., Морозову Л. К., Морозова А. М. и Ярмача В. Н. — за веру в диссертанта на всех этапах обучения и работы. Наконец, особая благодарность супругу соискателя, Плакитину И. Д., чьи понимание и поддержка стали опорой и источником вдохновения на протяжении всего периода проведения исследований.

Список литературы

- [1] *Zinnecker H., Yorke H. W.* Toward Understanding Massive Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45, № 1. — P. 481–563.
- [2] *Feigelson E. D.* Multiwavelength Studies of Young OB Associations // *The Birth of Star Clusters* / Ed. by S. Stahler. — Vol. 424 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2018. — P. 119.
- [3] *Yorke H. W., Sonnhalter C.* On the formation of massive stars // *The Astrophysical Journal*. — 2002. — Vol. 569, № 2. — P. 846.
- [4] *Osorio M., Lizano S., D'Alessio P.* Hot Molecular Cores and the Formation of Massive Stars // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 525, № 2. — P. 808–820.
- [5] *Kurtz S., Cesaroni R., Churchwell E. et al.* Hot Molecular Cores and the Earliest Phases of High-Mass Star Formation // *Protostars and Planets IV* / Ed. by V. Mannings, A. P. Boss, S. S. Russell. — 2000. — P. 299–326.

- [6] *Liu H.-L., Liu T., Evans N. J., II et al.* ATOMS: ALMA three-millimeter observations of massive star-forming regions - III. Catalogues of candidate hot molecular cores and hyper/ultra compact H II regions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2021. — Vol. 505, № 2. — P. 2801–2818.
- [7] *Golshan R. H., Sánchez-Monge Á., Schilke P. et al.* High-mass star formation across the Large Magellanic Cloud-I. Chemical properties and hot molecular cores observed with ALMA at 1.2 mm // *Astronomy & Astrophysics.* — 2024. — Vol. 688. — P. A3.
- [8] *Shimonishi T., Tanaka K. E. I., Zhang Y., Furuya K.* The Detection of Hot Molecular Cores in the Small Magellanic Cloud // *Astrophys. J., Lett.* — 2023. — Vol. 946, № 2. — P. L41.
- [9] *Herbst E., Van Dishoeck E. F.* Complex organic interstellar molecules // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* — 2009. — Vol. 47, № 1. — P. 427–480.
- [10] *Ball J. A., Gottlieb C. A., Lilley A., Radford H.* Detection of methyl alcohol in Sagittarius // *Astrophysical Journal*, vol. 162, p. L203. — 1970. — Vol. 162. — P. L203.
- [11] *Van Dishoeck E. F., Blake G. A.* Chemical evolution of star-forming regions // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* — 1998. — Vol. 36, № 1. — P. 317–368.
- [12] *Blake G. A., Sutton E., Masson C., Phillips T.* Molecular abundances in OMC-1-The chemical composition of interstellar molecular clouds and the influence of massive star formation // *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 315, April 15, 1987, p. 621-645. Research supported by the Miller Research Foundation. — 1987. — Vol. 315. — P. 621–645.
- [13] *Tielens A., Hagen W.* Model calculations of the molecular composition of interstellar grain mantles // *Astronomy and Astrophysics*, vol. 114, no. 2, Oct. 1982, p. 245-260. Research supported

by the Nederlandse Organisatie voor Zuiver-Wetenschappelijk Onderzoek. — 1982. — Vol. 114. — P. 245–260.

- [14] *Millar T., Farquhar P., Willacy K.* The UMIST database for astrochemistry 1995 // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series.* — 1997. — Vol. 121, № 1. — P. 139–185.
- [15] *Garrod R. T., Herbst E.* Formation of methyl formate and other organic species in the warm-up phase of hot molecular cores // *Astronomy & Astrophysics.* — 2006. — Vol. 457, № 3. — P. 927–936.
- [16] *Wakelam V., Loison J.-C., Herbst E. et al.* The 2014 KIDA network for interstellar chemistry // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2015. — Vol. 217, № 2. — P. 20.
- [17] *Jørgensen J. K., Belloche A., Garrod R. T.* Astrochemistry during the formation of stars // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* — 2020. — Vol. 58, № 1. — P. 727–778.
- [18] *Rodgers A. W., Campbell C., Whiteoak J.* A catalogue of H α -emission regions in the Southern Milky Way // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 1960. — Vol. 121, № 1. — P. 103–110.
- [19] *Zavagno A., Russeil D., Motte F. et al.* Star formation triggered by the Galactic H II region RCW 120. First results from the Herschel Space Observatory // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L81.
- [20] *Kirsanova M. S., Saliı̄ S. V., Kalenskii S. V. et al.* The warm-up phase in massive star-forming cores around RCW 120 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2021. — Vol. 503, № 1. — P. 633–642.
- [21] *Yoneda H., Tsukamoto Y., Furuya K., Aikawa Y.* Chemistry in a Forming Protoplanetary Disk: Main Accretion Phase // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 833, № 1. — P. 105.

- [22] *Priestley F., Clark P., Glover S. et al.* NEATH-II. N₂H⁺ as a tracer of imminent star formation in quiescent high-density gas // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — Vol. 526, № 4. — P. 4952–4960.
- [23] *Bergin E. A., Tafalla M.* Cold dark clouds: the initial conditions for star formation // Annu. Rev. Astron. Astrophys. — 2007. — Vol. 45, № 1. — P. 339–396.
- [24] *Araya E., Hofner P., Kurtz S. et al.* CH₃CN observations toward southern massive star-forming regions // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2005. — Vol. 157, № 2. — P. 279–301.
- [25] *Bisschop S. E., Jørgensen J., Van Dishoeck E., De Wachter E.* Testing grain-surface chemistry in massive hot-core regions // Astronomy & Astrophysics. — 2007. — Vol. 465, № 3. — P. 913–929.
- [26] *Sen S., Agarwal S., Chakraborty P., Singh K. P.* Astronomical big data processing using machine learning: A comprehensive review // Experimental Astronomy. — 2022. — Vol. 53, № 1. — P. 1–43.
- [27] *Samuel H. S., Etim E. E., Shinggu J. P., Bako B.* Machine learning of Rotational spectra analysis in interstellar medium // Communication in Physical Sciences. — 2023. — Vol. 10, № 1.
- [28] *Kochina O. V., Wiebe D. S., Kalenskii S. V., Vasyunin A. I.* Modeling of the formation of complex molecules in protostellar objects // Astronomy Reports. — 2013. — Vol. 57, № 11. — P. 818–832.
- [29] *Rathborne J. M., Whitaker J. S., Jackson J. M. et al.* Molecular Line Emission Towards High-Mass Clumps: The MALT90 Catalogue // Publications of the Astronomical Society of Australia. — 2016. — Vol. 33. — P. e030.
- [30] *Jackson J. M., Rathborne J. M., Foster J. B. et al.* MALT90: The Millimetre Astronomy Legacy Team 90 GHz Survey // Publications of the Astronomical Society of Australia. — 2013. — Vol. 30. — P. e057.

- [31] *Foster J. B., Jackson J. M., Barnes P. J. et al.* The Millimeter Astronomy Legacy Team 90 GHz (MALT90) Pilot Survey // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 2011. — Vol. 197, № 2. — P. 25.
- [32] *Ladeyschikov D., Sobolev A.* Multiwavelength analysis of star-forming regions using the online database of maser sources MaserDB.net // *Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies.* — 2022. — P. 165–167.

