

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт астрономии Российской академии наук

На правах рукописи

Плаkitина Каролина Владимировна

ОРГАНИЧЕСКИЕ МОЛЕКУЛЫ В ГОРЯЧИХ ЯДРАХ  
МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель  
д. ф.-м. н. М. С. Кирсанова

Москва — 2026

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>1</b>
<b>1 Глава 1. Химическое разнообразие и кинематика газа в области образования массивных звёзд RCW 120</b>	<b>10</b>
1.1 Область образования массивных звёзд RCW 120 . . . . .	10
1.2 Наблюдательные и архивные данные . . . . .	12
1.3 Результаты. Обнаруженные молекулы . . . . .	13
1.4 Анализ кинематики молекулярного газа . . . . .	32
1.5 Обсуждение . . . . .	35
1.6 Резюме Главы 1 . . . . .	35
<b>2 Глава 2. Газофазная и поверхностная химия в области образования массивных звёзд RCW 120</b>	<b>36</b>
2.1 Физические условия в молекулярном газе. . . . .	37
2.1.1 Метод определения лучевых концентраций молекул в приближении ЛТР . . . . .	37
2.1.2 Результаты. Температуры возбуждения вращательных уровней	42
2.2 Метод определения лучевой концентрации водорода и температуры пыли . . . . .	52
2.2.1 Результаты. Содержания молекул . . . . .	52
2.2.2 Результаты. Корреляции лучевых концентраций молекул . .	57
2.3 Моделирование содержаний молекул с помощью программного комплекса Presta . . . . .	61
2.4 Результаты моделирования . . . . .	62
2.5 Обсуждение . . . . .	63
2.5.1 Признаки наличия горячего газа в МЗО . . . . .	63
2.5.2 Особенности разрушения мантий пылинок вблизи МЗО . . . . .	65
2.6 Резюме Главы 2 . . . . .	66

<b>3 Глава 3. Классификация молекулярных облаков с помощью методов машинного обучения</b>	<b>68</b>
3.1 Данные каталогов . . . . .	69
3.2 Предварительная обработка данных . . . . .	71
3.3 Методы машинного обучения . . . . .	72
3.3.1 Метод главных компонент . . . . .	72
3.3.2 Метод стохастических вложений соседей с t-распределением (t-SNE) . . . . .	73
3.3.3 Классификатор случайного леса (Random Forest) . . . . .	73
3.3.4 Классификатор градиентного бустинга . . . . .	74
3.4 Фотометрия для объектов каталога MALT90 по данным <i>Spitzer</i> . . .	74
3.5 Результаты кластеризации . . . . .	76
3.5.1 Кластеризация молекулярных облаков по интегральным ин- тенсивностям молекулярных линий . . . . .	76
3.5.2 Кластеризация молекулярных облаков по интегральным ин- тенсивностям молекулярных линий, пиковому потоку пыле- вого континуума на 870 мкм и температуре пыли . . . . .	79
3.5.3 Кластеризация молекулярных облаков по интегральным ин- тенсивностям молекулярных линий, инфракрасным потокам по данным <i>Spitzer</i> и наличию метанольных мазеров . . . . .	80
3.5.4 Влияние полноты признаков на результаты кластеризации .	85
3.6 Результаты применения алгоритмов машинного обучения для клас- сификации молекулярных облаков из каталога MALT90 . . . . .	85
3.7 Обсуждение . . . . .	104
3.7.1 Обсуждение результатов машинного обучения без учителя .	104
3.7.2 Обсуждение результатов машинного обучения с учителем . .	109
3.8 Резюме Главы 3 . . . . .	110
<b>Заключение</b>	<b>112</b>

# Введение

Появление спектроскопии в XIX веке и развитие радиоастрономии в XX веке радикально изменили наше понимание состава и физики МЗС, позволив обнаружить в ней молекулы и исследовать их излучение в широком диапазоне длин волн. Одним из важнейших достижений стала возможность изучения гигантских молекулярных комплексов, в которых зарождается большинство звёзд. Эти объекты, с массами от  $10^4$  до  $10^7$  солнечных масс ( $M_{\odot}$ ), содержат подавляющую часть молекулярного газа Галактики и являются ключевым звеном в цепочке звёздной эволюции.

## Актуальность темы диссертации

Исследование механизмов звёздообразования 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 ее химический состав и физические характеристики [3]. Несмотря на постоянный интерес к этим объектам, процессы, приводящие к формированию массивных звезд, изучены не полностью. Существуют несколько теорий формирования массивных звезд, 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  $H_\alpha$  в южной 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  $10^4 \text{ см}^{-3}$  [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, остается чувствительным индикатором более плотного газа даже в относительно горячих областях, что позволяет различать локальные вариации плотности и температуры в пределах 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 молекулы<sup>1</sup>. 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 темные инфракрасные облака, протозвезды и области H II. Традиционные «ручные» методы с трудом справляются с обработкой таких больших объёмов данных. В последние годы все более активно используются алгоритмы машинного обучения для анализа многомерных наборов наблюдательных данных [26, 27]. Методы машинного обучения позволяют 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 про-

---

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

тозвёзд, 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. 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, наблюдениям инфракрасной обсерватории *Spitzer* и базе данных maserDB.

## Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Полный объем работы составляет 128 страниц, включая 34 рисунка и 9 таблиц. Список цитируемой

литературы содержит 157 наименования.

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

**Глава 1** посвящена анализу спектральных наблюдений в направлении протозвезд, расположенных на границе зоны II области RCW 120. Основное внимание уделено исследованию признаков истечений в области формирования массивных звезд. Полученные данные свидетельствуют о наличии истечений: вблизи МЗО S2 истечения ориентированы вдоль луча зрения, тогда как в районе МЗО S1 – перпендикулярно ему. Проведен сравнительный анализ спектров различных молекул: установлено, что излучение метилцианида ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ) формируется в более теплой среде по сравнению с областями, где доминируют линии метилацетилена ( $\text{CH}_3\text{CCH}$ ) и метанола ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Поскольку температуры в окрестности протозвезд недостаточно высоки для тепловой десорбции, вероятно, метанол переходит в газовую фазу за счет разрушения пылинок ударными волнами вблизи истечений. Единственным проявлением ультрафиолетового излучения является повышенное обилие простых углеводородов  $\text{CCH}$  и  $\text{c-C}_3\text{H}_2$  в области фотодиссоциации.

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

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 [28, 29, 30], архивные данные инфракрасной обсерватории *Spitzer*<sup>2</sup> и базы данных maserDB [31]. Для анализа применяются два подхода – обучение с учителем и без учителя. Алгоритмы кластеризации, относящиеся к методам обучения без учителя, позволяют выявлять группы объектов непосредственно по их характеристикам, без предварительных знаний об их типах. В свою очередь, алгоритмы классификации, обученные на выборках объектов с уже известными типами, дают возможность предсказывать эволюционную стадию молекулярных облаков. Такой подход позволяет сравнить эффективность анализа, выполняемого человеком и искусственным интеллектом и продемонстрировать

---

<sup>2</sup>[https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/?\\_\\_action=layout.showDropDown&](https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/?__action=layout.showDropDown&)

потенциал машинного обучения для изучения процессов звездообразования.

В **Заключении** подводятся итоги выполненной работы, обсуждаются дальнейшие направления исследования.

## 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  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{C}_2\text{H}$  и  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  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 были 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  $\text{C}_2\text{H}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{HCO}^+$  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. 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

Б1 Bianchi E., Brünken S., Ceccarelli C., Cordine M.r, 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 провел обработку и анализ спектроскопических данных в миллиметровом диапазоне, участвовал в постановке задач, интерпретации и обсуждении полученных результатов. В работе 3 соискатель самостоятельно освоил методы и выполнил ИК-фотометрию по архивным данным телескопа *Spitzer*, освоил работу с библиотеками машинного обучения и самостоятельно провел 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, поселок Нижний Архыз, Россия.
3. «Физика Космоса», 2023 г., Екатеринбург, Россия.
4. XX Всероссийская Конференция «Современная звездная астрономия» - 2022» 2022 г., КГО, Карачаево-Черкесская Республика, Россия.

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

# Глава 1

## Химическое разнообразие и кинематика газа в области образования массивных звёзд RCW 120

### 1.1 Область образования массивных звёзд RCW 120

Воздействие со стороны массивных звёзд может способствовать образованию протозвезд. Этот процесс может быть запущен внешним триггером, например, расширяющимися оболочками H II-областей [32]. Чтобы убедиться в правильности этих предположений, нужно исследовать крупномасштабные структуры (порядка кпк) в отдаленных галактиках, где можно наблюдать отдельные поколения звёзд и области ионизированного водорода (см., например, работы [33, 34]). Однако, при исследовании областей звездообразования в нашей Галактике оказывается затруднительно установить, было ли образование конкретной группы протозвёзд вызвано внешним (триггерным) фактором [35, 36, 37, 38]. Считается, что формирование протозвёзд связано с определенными условиями в окружающей их среде. Эти условия включают в себя наличие молодых скоплений звезд, плотного молекулярного газа и ионизированного газа вблизи молодых массивных звезд. Однако простое наличие этих условий недостаточно, чтобы однозначно утверждать, что именно эти факторы способствовали появлению протозвёзд (см. [39]).

В условиях активных масштабных исследований перспективной становится задача выявления различий между различными этапами процесса звездообразования. Для этого используются данные об интенсивностях спектральных линий, содержаниях молекул и многие другие. Например, авторы работы [40] показали, что

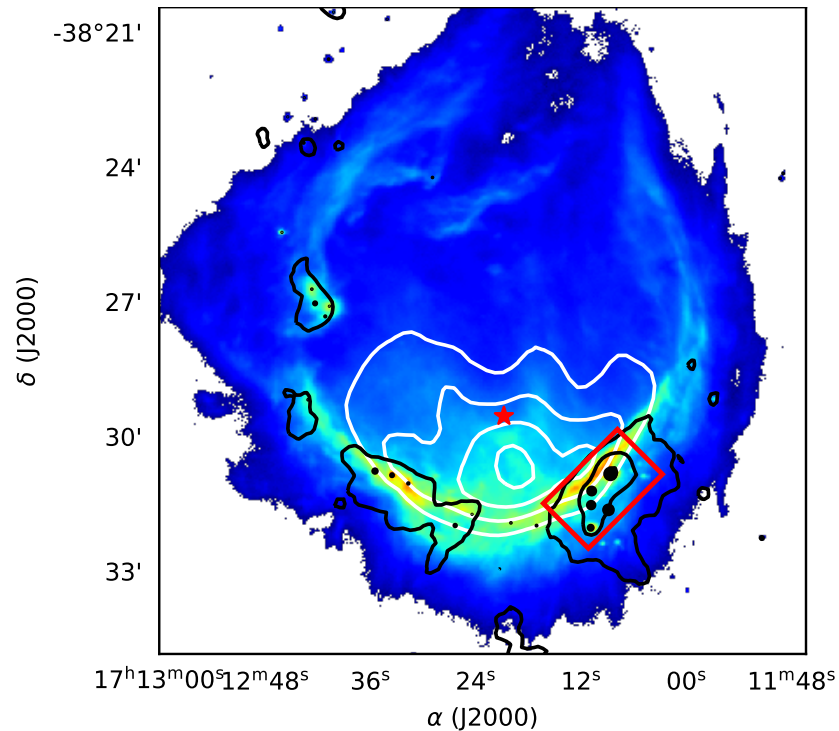


Рис. 1: Изображение RCW 120 при 70 мкм. Цветовая шкала показывает излучение нейтрального материала вокруг ионизированного газа. Положение ионизирующей звезды RCW 120 обозначено маркером в виде красной звезды. Белым цветом на изображении представлены контуры излучения радио-континуума с частотой 843 МГц [47], соответствующее свободному излучению ионизированного газа. Контуры этих радиоволн размещенные линейно и представлены в диапазоне от 0.1 до 0.4 Ян/луч. Контуры для 870 мкм [48] при 0.4, 2.0 и 10.0 Ян/луч показаны черным цветом. Черные круги показывают местоположение компактных источников [49]. Размеры кругов линейно зависят от массы источников. Область, наблюдаемая в рамках данного исследования, показана красным прямоугольником.

эмиссионные линии  $N_2H^+$  и  $CH_3OH$  являются более надёжными индикаторами плотного молекулярного газа в 3-мм диапазоне по сравнению с другими широко используемыми индикаторами, такими как линии  $HCN^+$  или  $HCN$ . Авторы работы [41] на основе нескольких изотопологов  $CO$  и  $HCN^+$  выделили в пределах одного молекулярного облака газ, находящийся под воздействием УФ-излучения, и газ, экранированный от него. В работе [42] на основе анализа лучевых концентраций показано, что молекулярные облака вокруг H II-областей (S 235 и S 235 A) имеют состав, типичный для тёмных звездообразующих облаков без признаков воздействия УФ-излучения. Масштабные исследования в ближнем ИК-диапазоне позволяют отличить оболочки, образованные массивными звёздами главной последовательности, от оболочек, связанных с молодыми звёздными объектами, погружёнными в молекулярные облака (например, [43, 44, 45, 46]).

Область фотодиссоциации (ФДО) RCW 120 имеет кольцеобразную форму; она

была сформирована в сплюснутом молекулярном облаке [50, 51, 52]. Ранее авторы работы [49] выделили ряд компактных источников на краю H II-области RCW 120, используя данные наблюдений космического телескопа Herschel. Среди этих источников они обнаружили объекты с массивными оболочками, отождествлённые с массивными молодыми протозвёздами. Последующие исследования [53] подвергли сомнению сценарий триггерного механизма образования массивных протозвёзд в RCW 120 и предположили, что образование массивных МЗО вокруг H II-области предшествовало расширению самой H II-области. Авторы работы [54] обнаружили плотный слой, порождённый расширяющейся H II-областью, а также молодые звёзды за пределами этого слоя. Это указывает на то, что молодые звезды существовали до формирования H II-области и ее последующего расширения.

Несмотря на упомянутые выше работы, вопрос о влиянии расширяющейся H II-области на текущий процесс звездообразования в RCW 120 по-прежнему остаётся открытым. Этот вопрос интересен из-за возможного влияния H II-области на функцию масс или временной масштаб звездообразования (см., например, [55]). Недавно в работе [20] было проанализировано излучение молекул  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$  в двух МЗО в окрестности RCW 120. Авторы оценили содержания этих молекул и физические параметры окружающего газа в обоих МЗО и обнаружили, что массивный МЗО RCW 120 S2 [49] находится на самой ранней стадии формирования горячего ядра — области, нагретой до 100 К и выше, в которой происходит интенсивное испарение молекул с поверхности пыли. МЗО RCW 120 S1 менее массивный, чем RCW 120 S2, и находится на более ранней стадии эволюции. В настоящей главе анализируется распределение молекулярного излучения в облаке и изучается кинематика газа, чтобы выяснить, продолжает ли H II-область оказывать влияние на эти источники.

## 1.2 Наблюдательные и архивные данные

Исследуется плотный молекулярный сгусток, расположенный непосредственно на юго-западной границе H II-области RCW 120. Используемые наблюдательные данные охватывают этот сгусток с погружёнными в него молодыми звёздными объектами, предположительно находящимися на самой ранней стадии горячего ядра и обозначенными как МЗО RCW 120 S1, RCW 120 S2, RCW 120 S9, RCW 120 S10, RCW 120 S39 (далее для краткости обозначение RCW 120 опускается). Наблюдаемая область показана на рис. 1.

Наблюдения были выполнены сотрудниками космической обсерватории Онсала с использованием телескопа APEX (Atacama Pathfinder EXperiment telescope) в Чили [56] с 16 по 23 сентября 2021 года в рамках проекта O-0108.F-9313-2021 (руководитель проекта: М. С. Кирсанова). Для наблюдений использо-

вался гетеродинный приёмник nFLASH230, который одновременно охватывает две полосы частот по 8 ГГц. При работе в режиме USB (верхняя боковая полоса), приёмник был настроен на частоту 217 ГГц. В этом режиме наблюдения охватывали две полосы частот: от 199 ГГц до 207 ГГц и от 215 ГГц до 223 ГГц. В режиме LSB (нижняя боковая полоса) частота была настроена на 241 ГГц, поэтому наши наблюдения охватывали две полосы частот: 238–246 ГГц и 258–262 ГГц. Спектральное разрешение в спектрометре с Фурье-преобразованием (FFT) составляло около 0.3 км/с ( $R \approx 10^6$ ). Пространственное разрешение при частоте 230 ГГц составляло 26", что соответствует 0.17 пк на расстоянии в 1.34 кпк до RCW 120 (см. расстояние до ионизирующей звезды в статье [57]). Были созданы две карты методом сканирования «на лету» (On-The-Fly (OTF)), размером 140" на 85" повёрнутых на 45° в экваториальной системе координат (с длинной стороной, простирающейся с юго-востока на северо-запад). Строки/столбцы на карте чередовались по  $x$ - и  $y$ -направлениям — с временем записи данных 1.0 с и шагом 1/3 от размера диаграммы направленности.

Данные были приведены к антенной температуре с использованием стандартного пакета `apexOnlineCalibrator`, впоследствии был также применен дополнительный коэффициент  $\eta_{mb} = 0.79^1$ , чтобы перевести данные антенной температуры на шкалу температуры главного луча ( $T_{mb}$ ).

Обработка данных и коррекция базовой линии выполнялись с использованием пакета `CLASS` из программного обеспечения `GILDAS`<sup>2</sup>. Дальнейший анализ проводился с использованием пакета `Astropy` ([58, 59]), а для представления результатов использовался `APLpy` [60, 61]. Конечные спектральные кубы данных были преобразованы в общую сетку с шагом 10" по направлениям  $x$  и  $y$ . Типичный уровень шума ( $1\sigma$ ) для данных с измененной сеткой составляет 20–40 мК. Вся программа потребовала примерно 10 часов наблюдательного времени (включая время работы телескопа и время, необходимое на калибровку).

Помимо собственных наблюдений молекулярных линий, были использованы предварительно подготовленные спектральные кубы данных с интегральной интенсивностью линии излучения SiO(2–1) из обзора MALT90 [29, 28].

### 1.3 Результаты. Обнаруженные молекулы

Молекулярный сгусток, изучаемый в этой работе, имеет общую границу с ФДО RCW 120. Следовательно, при движении от границы молекулярного сгустка вглубь, будут обнаружены области, с разнообразными физическими условиями и химическим составом. Самый богатый состав молекул проявляется в направлении

<sup>1</sup><https://www.apex-telescope.org/telescope/efficiency/index.php>

<sup>2</sup><https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>

массивных МЗО. В частности, рассматривались пять МЗО среди которых есть как МЗО промежуточных масс, так и массивные МЗО, которые были найдены [49]. В выбранном спектральном диапазоне и при пороге в  $3\sigma$ , где  $\sigma = 12 - 21$  мК (стандартное отклонение шума в спектре), в направлении МЗО S2 было идентифицировано 95 линий, принадлежащих 35 молекулам. Широкополосные спектры приведены на рис. 2, спектры в направлении пяти МЗО показаны на рис. 3–5 и спектр серии линий метанола на рис. 6.

Обнаруженные молекулы варьируются от двухатомных молекул (например, SO, CO) до сложных органических (СОМ), таких как  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCN}$ , которые обычно наблюдаются в окрестностях горячих молекулярных ядер. Самая сложная из них — метилформиат  $\text{HCOOCH}_3$  — состоит из 8 атомов. Насколько нам известно, это первое молекулярное исследование области RCW 120 в диапазоне 200–260 ГГц и уровнем шума, достигающим 20–40 мК.

Для изучения пространственного распределения молекулярного излучения вокруг МЗО и на границе ФДО области RCW 120 построены карты интегральных интенсивностей — яркости, проинтегрированной по профилю линии в пределах её полной ширины. Карты показаны на рис. 7–9. Для карт  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{CH}_3\text{CCN}$  использовались К-компоненты с  $K = 0, 1, 2, 3$ . Для карты  $\text{CH}_3\text{OH}$  рассматривались эмиссионные линии метанола в диапазоне частот 241680–241910 МГц. Карты яркостных температур для тех же линий показаны на рис. 10. При построении карт учитывалось пороговое значение сигнал/шум, равное трём, а разрешение всех карт было снижено до  $33''6$ , с целью улучшения качества изображения и увеличения отношения сигнал/шум. После построения карт, производилась визуальная оценка распределения молекулярного излучения, на основе которой карты были классифицированы по трем группам, в зависимости от обнаруженных особенностей молекулярного излучения.

К первой группе относятся молекулы, излучение которых наблюдается вдоль границы области ионизации. Это излучение двухатомных молекул  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{CN}$ , а также простых углеводов  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ ,  $\text{CCN}$  (и его дейтерированного изотолога  $\text{CCD}$ ), образование которых связано с проникновением УФ-квантов в молекулярный газ. Эти молекулы распространены в ФДО, и их излучение наблюдается вдоль области, яркой на карте излучения пыли на длине волны 70 мкм (показана голубыми контурами на рис. 7 и 8). Излучение  $\text{C}^{18}\text{O}$  распространяется от юго-востока к северо-западу, с наибольшей интенсивностью в направлении МЗО S2, тогда как яркое излучение  $^{13}\text{CO}$  распределено более равномерно и простирается также в направлении МЗО S1. Карты интегральных интенсивностей  $\text{CCN}$  и  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  занимают промежуточное положение между первой и второй группами карт (см. ниже): их излучение также имеет вытянутую форму в направлении северо-восток–юго-запад, с максимумом вблизи МЗО S2 и протяжённым излуче-

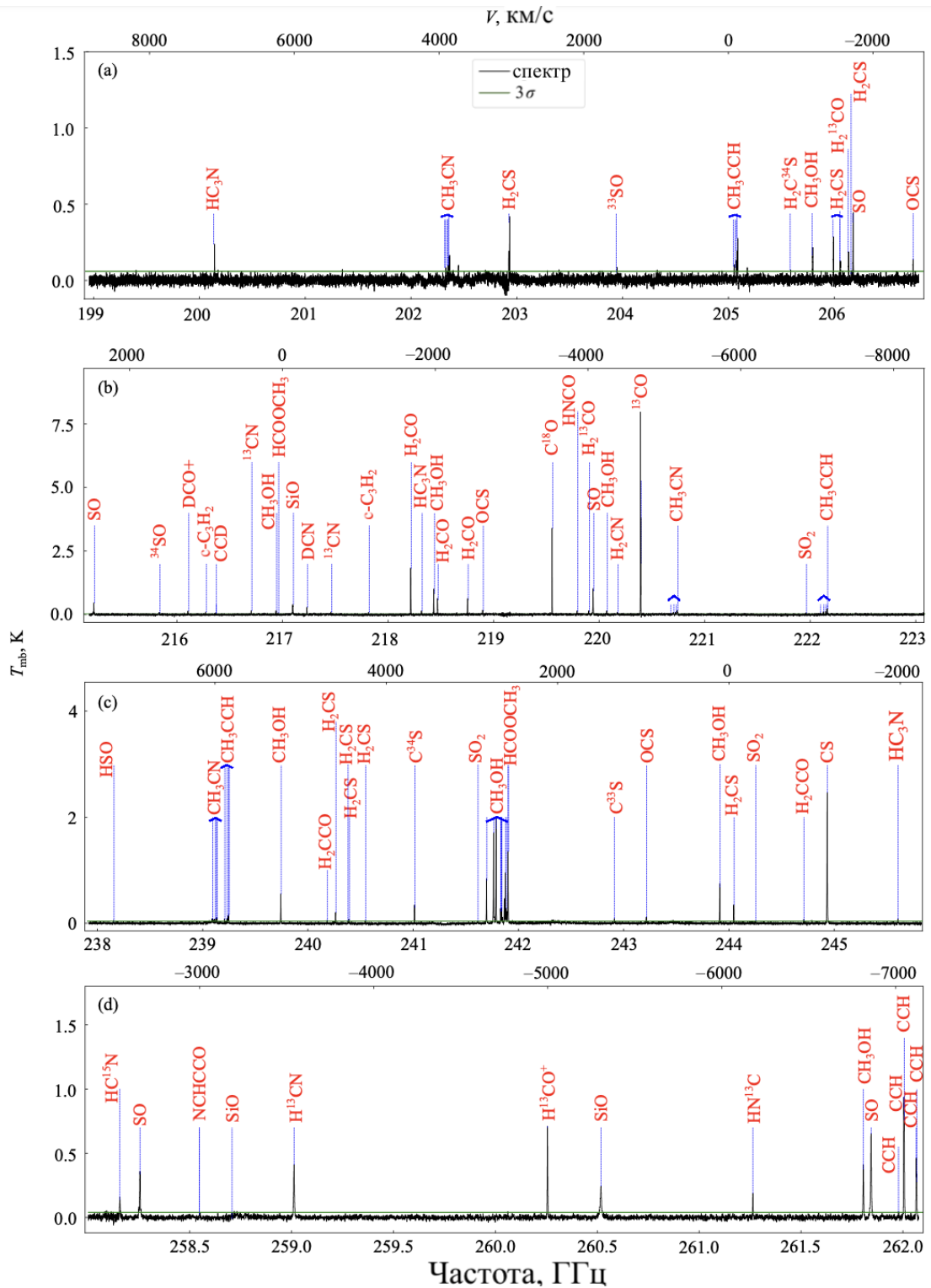


Рис. 2: Широкополосный спектр от приёмника nFLASH230 в направлении МЗО S2. Молекулы, линии которых идентифицированы, обозначены. Сплошная зелёная линия показывает уровень  $3\sigma$ , где  $\sigma = 19$  мК, 21 мК, 12 мК, 12 мК (от верхней панели к нижней).

нием в сторону МЗО S1. Критическая плотность  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  на два порядка выше, чем у  $^{13}\text{CO}$  и  $\text{C}^{18}\text{O}$ , что требует более высоких плотностей газа для возбуждения её излучения, тем не менее эта молекула также наблюдается параллельно ФДО области RCW 120.

Карта яркостной температуры молекулы  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $2-1$ ), представленная на рис. 10, показывает заметное уменьшение яркостной температуры в направлении МЗО S10 и S39, вызванное эффектом самопоглощения. Карты яркостных температур  $\text{CCN}$  и  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  в основном повторяют распределения на соответствующих картах интегральной интенсивности, за исключением относительно яркого излучения к северо-западу, которое заметно на карте  $T_{\text{mb}}$  и едва различимо на карте интегральной интенсивности. Это связано с тем, что линии  $\text{CCN}$  и  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  становятся яркими и узкими в направлении северо-запада. По-видимому, плотность газа в этом направлении выше, поскольку у этих двух простых углеводородов критическая плотность  $n_{\text{crit}}$  больше, чем на порядок превышает значения для изотопологов  $\text{CO}$  (ср.  $n_{\text{crit}}$  для  $c\text{-C}_3\text{H}_2$  ( $J_{K_a, K_c} = 3_{3,0} - 2_{2,1}$ ):  $3.4 \cdot 10^5$  [62] и  $n_{\text{crit}}$  для  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J = 2-1$ ):  $2 \cdot 10^4$  [63]). В отличие от  $^{13}\text{CO}$  и  $\text{C}^{18}\text{O}$ , которые наблюдаются вдоль всей ФДО, простые углеводороды регистрируются только в её наиболее плотной части.

Таблица 1: Спектральные линии обнаруженных молекул и характеристики линий: квантовые числа, частоты, энергии верхних уровней  $E_u$ . Вся информация была взята из базы данных CDMS. Карты интегральных интенсивностей для всех обнаруженных молекул вместе с картами яркостной температуры отображаются на рис. 7–9 и 10.

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_u$ , К	Примечание
$\text{HC}_3\text{N}$	$J = 22 - 21$	200135.392	110.5	в обзоре MALT90 [28] наблюдался переход $J = 1 - 0$
$\text{HDCO}$	$J_{K_a, K_c} = 3_{1,2} - 2_{1,1}$	201341.362	27.3	молекула наблюдалась впервые в RCW 120
$\text{CH}_3\text{CN}^a$	$J_K = 11_0 - 10_0$	202355.510	58.3	молекула наблюдалась ранее $J_K = 12_K - 11_K$ в [64, 20] и $J_K = 5_1 - 4_1$ в MALT90 [28]

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_u$ , К	Примечание
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{1,6} - 5_{1,5}$	202924.054	47.3	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
<sup>33</sup> SO	$J_{K_a, K_c} = 5_{4,6} - 4_{3,5}$	203939.255	38.3	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
CH <sub>3</sub> CCH <sup>a</sup>	$J_K = 12_0 - 11_0$	205080.732	64.0	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{0,6} - 5_{0,5}$	205987.858	34.6	
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{3,4} - 5_{3,3}$	206052.602	153.1	
H <sub>2</sub> <sup>13</sup> CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{1,3} - 2_{1,2}$	206131.626	31.6	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{2,4} - 5_{2,3}$	206158.602	87.3	
SO	$J_K = 5_4 - 4_3$	206176.005	38.6	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
OCS	J=17-16	206745.156	89.3	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
SO	$J_K = 5_5 - 4_4$	215220.653	44.1	
<sup>34</sup> SO	$J_K = 5_6 - 4_5$	215839.920	34.4	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
DCO <sup>+</sup>	$J = 3 - 2$	216112.582	20.7	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_u$ , К	Примечание
c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	$J_{K_a, K_c} = 3_{3,0} - 2_{2,1}$	216278.756	19.5	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
CCD	$J_{K_a, K_c} = 3_{4,5} - 2_{3,4}$	216372.837	20.8	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
<sup>13</sup> CN	$N = 2 - 1, J = 3/2 - 3/2, F1 = 2 - 1, F = 1 - 2$	216710.144	15.6	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
H <sub>2</sub> S	$J_{K_a, K_c} = 2_{2,0} - 2_{1,1}$	216710.437	84.0	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
HCOOCH <sub>3</sub>	$J_{K_a, K_c} = 20_{0,20} - 19_{1,19}, A$	216964.157	111.5	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
SiO	$J = 5 - 4$	217104.919	31.3	молекула на- блюдалась ранее $J = 2 - 1$ , MALT90 [28]
DCN	$J = 3 - 2$	217238.538	20.9	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
<sup>13</sup> CN	$N = 2 - 1, J = 5/2 - 3/2, F1 = 3 - 2, F = 4 - 3$	217467.150	15.7	
c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	$J_{K_a, K_c} = 6_{0,6} - 5_{1,5}$	217822.148	38.6	
H <sub>2</sub> CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{0,3} - 2_{0,2}$	218222.192	21.0	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_u$ , К	Примечание
HC <sub>3</sub> N	$J = 24 - 23$	218324.723	131.0	наблюдалась в обзоре MALT90 [28], переход $J = 1 - 0$
H <sub>2</sub> CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{2,1} - 2_{2,0}$	218760.066	68.1	
OCS	$J = 18 - 17$	218903.356	99.8	
C <sup>18</sup> O	$J = 2 - 1$	219560.354	15.8	наблюдались переходы $J = 2 - 1$ , $J = 1 - 0$ , $J = 3 - 2$ , $J = 0 - 1$ в работах [51, 65, 53, 49, 66]
HNCO	$J_{K_a, K_c} = 10_{0,10} - 9_{0,9}$	219798.274	58.0	наблюдалась в обзоре MALT90 [28], переход $J_{K_a, K_c} = 4_{0,4} - 3_{0,3}$ и $J_{K_a, K_c} = 4_{1,4} - 3_{1,2}$
H <sub>2</sub> <sup>13</sup> CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{1,2} - 2_{1,1}$	219908.525	32.9	
H <sub>2</sub> CN	$J_{K_a, K_c} = 3_{0,3} - 2_{0,2}$ , $F = 5/2 - 5/2$ , n=18-10	220178.897	21.1	молекула наблюдалась впервые в RCW 120

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_u$ , К	Примечание
$^{13}\text{CO}$	$J = 2-1$	220398.667	15.9	наблюдались переходы $J = 1-0$ , $J = 2-1$ , $J = 3-2$ , $J = 3-2$ , $J = 0-1$ и переходы между $J = 5-4$ и $J = 8-7$ в работах [51, 54, 53, 49, 67, 66, 68]
$\text{CH}_3\text{CN}^a$	$J_K = 12_0-11_0$	220747.261	68.9	наблюдались переходы $J_K = 12_K-11_K$ [64, 20] и $J_K = 5_1-4_1$ в MALT90 [28]
$\text{SO}_2$	$J_{K_a, K_c} = 11_{1,11}-10_{0,10}$	221965.220	60.4	молекула наблюдалась ранее $J_{K_a, K_c} = 5_{2,4}-4_{1,3}$ [20]
$\text{CH}_3\text{CCH}^a$	$J_K = 13_0-12_0$	222166.971	74.6	
$\text{HSO}$	$N_{K_a, K_c} = 6_{2,5}-5_{2,4}$ , $J = 13/2-11/2$ , $F = 6-5$	238156.771	93.4	молекула наблюдалась впервые в RCW 120
$\text{CH}_3\text{CN}^a$	$J_K = 13_0-12_0$	239137.917	80.3	наблюдались переходы $J_K = 12_K-11_K$ [64, 20] и $J_K = 5_1-4_1$ в MALT90 [28]
$\text{CH}_3\text{CCH}^a$	$J_K = 14_0-13_0$	239252.294	86.1	

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_u$ , К	Примечание
H <sub>2</sub> CSO	$J_{K_a, K_c} = 12_{1,12} - 11_{1,11}$	240185.794	88.0	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{0,7} - 6_{0,6}$	240266.872	46.1	
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{2,6} - 6_{2,5}$	240382.051	98.8	
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{3,5} - 6_{3,4}$	240393.037	164.6	
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{3,4} - 6_{3,3}$	240393.762	164.6	
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{2,5} - 6_{2,4}$	240549.066	98.8	
C <sup>34</sup> S	$J = 5 - 4$	241016.089	27.8	
SO <sub>2</sub>	$J_{K_a, K_c} = 5_{2,4} - 4_{1,3}$	241615.797	23.6	молекула на- блюда- лась ранее $J_{K_a, K_c} = 5_{2,4} -$ $4_{1,3}$ [20]
CH <sub>3</sub> OH, $v_t = 0 - 2^a$	$J_{K_a, K_c} = 5_{0,5} - 4_{0,4},$ $A^+$	241791.352	34.8	множество пе- реходов в рабо- те [20]
C <sup>33</sup> S	$J_K = 5_0 - 4_0$	242913.610	35.0	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
OCS	$J = 20 - 19$	243218.036	122.6	
H <sub>2</sub> CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{1,6} - 6_{1,5}$	244048.504	60.0	
SO <sub>2</sub>	$J_{K_a, K_c} = 14_{0,14} - 13_{1,13}$	244254.218	93.9	
H <sub>2</sub> CSO	$J_{K_a, K_c} = 12_{1,11} - 11_{1,10}$	244712.269	89.4	

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_u$ , К	Примечание
CS	$J = 5-4$	244935.557	35.3	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
HC <sub>3</sub> N	$J=27-26$	245606.320	165.0	наблюдалась в обзоре MALT90 [28], переход $J = 1-0$
HC <sup>15</sup> N	$J = 3-2$	258156.996	24.8	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
SO	$N_J = 6_6-5_5$	258255.826	56.5	
H <sup>13</sup> CN	$J = 3-2$	259011.798	24.9	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
H <sup>13</sup> CO <sup>+</sup>	$J = 3-2$	260255.339	25.0	молекула на- блюдалась впервые в RCW 120
SiO	$J = 6-5$	260518.009	43.8	молекула на- блюдалась ранее $J = 2-1$ , MALT90 [28]
HN <sup>13</sup> C	$J = 3-2$	261263.513	25.1	молекула на- блюдалась ранее $J = 1-0$ , MALT90 [28]
SO	$J_K = 6_7-5_6$	261843.721	47.6	
CCH <sup>a</sup>	$N_J = 3_{7/2}-2_{5/2}$ $F =$ $4-3$	262004.260	25.1	молекула наблюда- лась ранее $N_J = 1_{3/2}-0_{2/1}$ , MALT90 [28]

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_u$ , К	Примечание
ССН	$N_J = 3_{5/2} - 2_{3/2}$ , $F = 3 - 2$	262064.986	25.2	молекула наблюда- лась ранее $N_J = 1_{3/2} - 0_{2/1}$ , MALT90 [28]
ССН	$N_J = 3_{5/2} - 2_{3/2}$ , $F = 2 - 1$	262067.469	25.2	молекула наблюда- лась ранее $N_J = 1_{3/2} - 0_{2/1}$ , MALT90 [28]

<sup>a</sup>Характеристики наиболее яркой компоненты обнаруженной серии линий.

Во второй группе карт наблюдается пространственная корреляция между излучением молекул и излучением пыли на длине волны 870 мкм. В частности, в направлении на МЗО S1 и S2 наблюдается возрастание интегральной интенсивности, в то время как промежуточная область обладает относительно более слабым уровнем излучения. В эту группу входят как двухатомные молекулы, так и более сложные соединения: CS, CH<sub>3</sub>OH, SiO, DCO<sup>+</sup>, H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>CO, HNCO, HDCO, H<sub>2</sub><sup>13</sup>CO, H<sub>2</sub>CS, HN<sup>13</sup>C, SO, <sup>33</sup>SO, HC<sub>3</sub>N, OCS, SO<sub>2</sub>. Линии молекулярного излучения из этой группы имеют схожее распределение с компактным точечным возрастанием интенсивности в направлении МЗО S1 и S2, а также с менее ярким (в 1,5–3 раза) и более однородным излучением между ними. Кроме того, можно заметить, что молекулы метанола и оксида кремния проявляют яркие эмиссионные признаки к югу от исследуемого молекулярного сгустка. На карте яркостной температуры излучения молекулы DCO<sup>+</sup> видно несколько отдельных ярких пикселей сравнимой яркости, вблизи каждого из МЗО, тогда как на карте интегральной интенсивности наблюдается непрерывное излучение вдоль контуров излучения пыли на длине волны 870 мкм. Также отмечается различие между областью с самой яркой интегральной интенсивностью и областью, где проявляется максимум яркостной температуры молекулы DCO<sup>+</sup>, последняя смещена дальше от ФДО.

Для третьей группы карт характерно излучение, преимущественно исходящее от МЗО S2 и едва заметное в окрестностях других МЗО. Эта группа включает в себя такие молекулы, как C<sup>34</sup>S, SO, DCN, CH<sub>3</sub>CCH, CH<sub>3</sub>CN, H<sub>2</sub>S, H<sup>13</sup>CN, H<sub>2</sub>CN, HC<sup>15</sup>N, <sup>34</sup>SO, C<sup>33</sup>S, HSO, а также органические молекулы H<sub>2</sub>CCO и HCOOCH<sub>3</sub>. Интегральные интенсивности азотсодержащих соединений (DCN, CH<sub>3</sub>CN, H<sup>13</sup>CN) симметричны относительно МЗО S2. В то время как асимметричное распределение молекулярного излучения в направлении S2 наблюдается для серосодержащих соединений: C<sup>34</sup>S, SO, H<sub>2</sub>S. Яркое излучение смещено на восток относительно

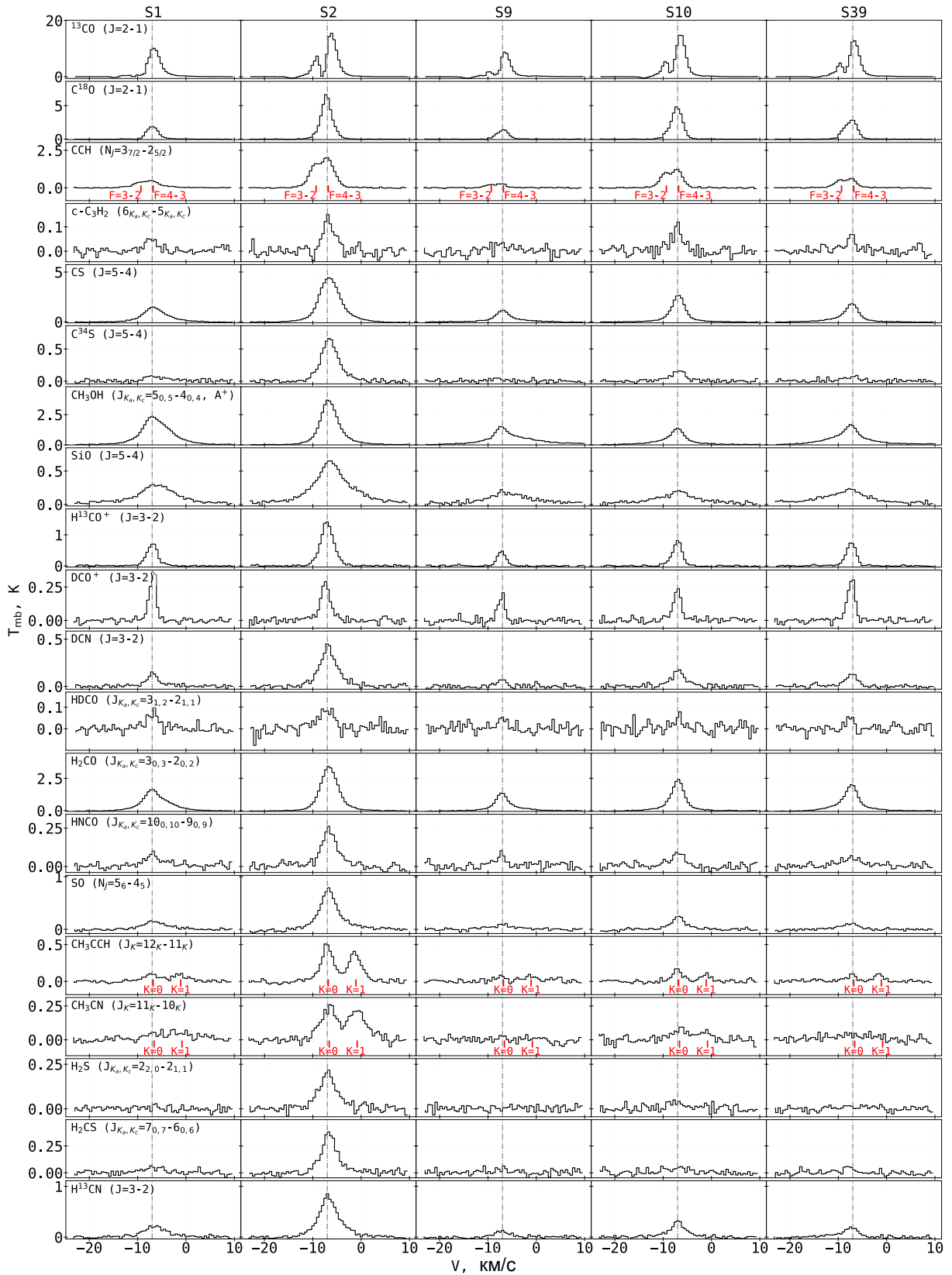
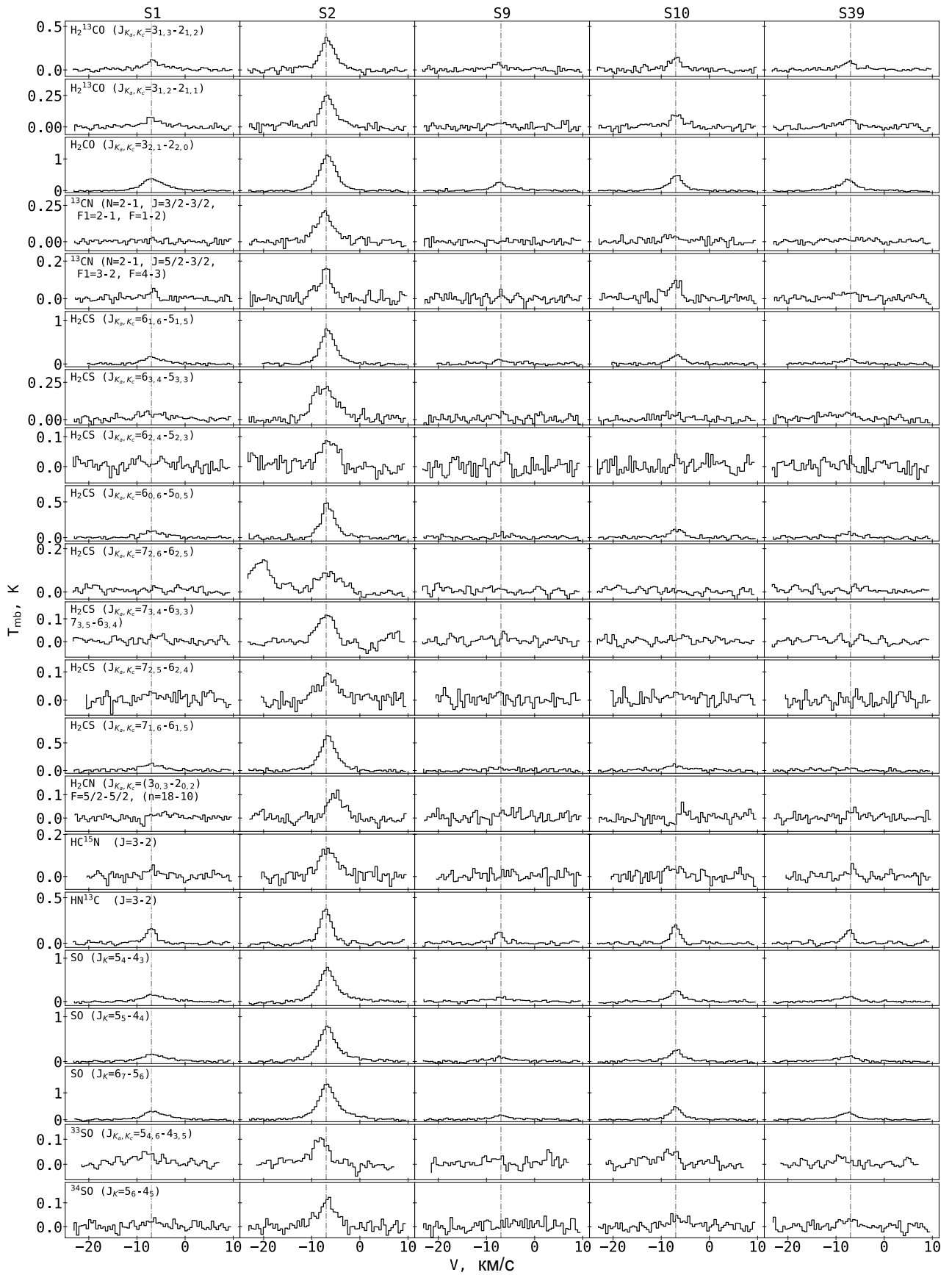


Рис. 3: Спектральные линии обнаруженных молекул в направлении пяти молодых звёздных объектов: S1, S2, S9, S10, S39. Пунктирная серая линия обозначает  $V_{\text{LSR}} = -7 \text{ KM s}^{-1}$ .



(a)

Рис. 4: Продолжение рис. 3.

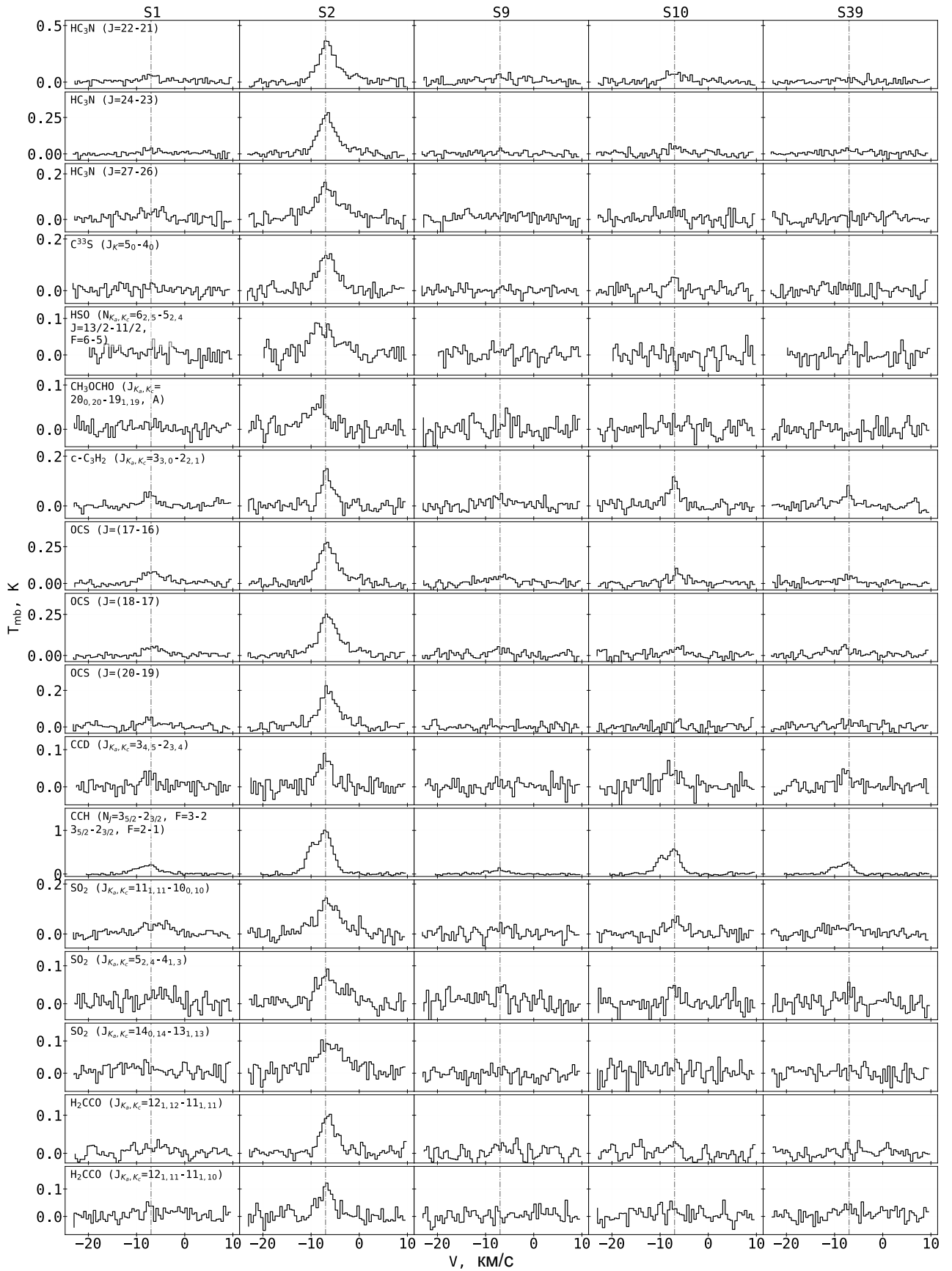


Рис. 5: Продолжение рис. 3.

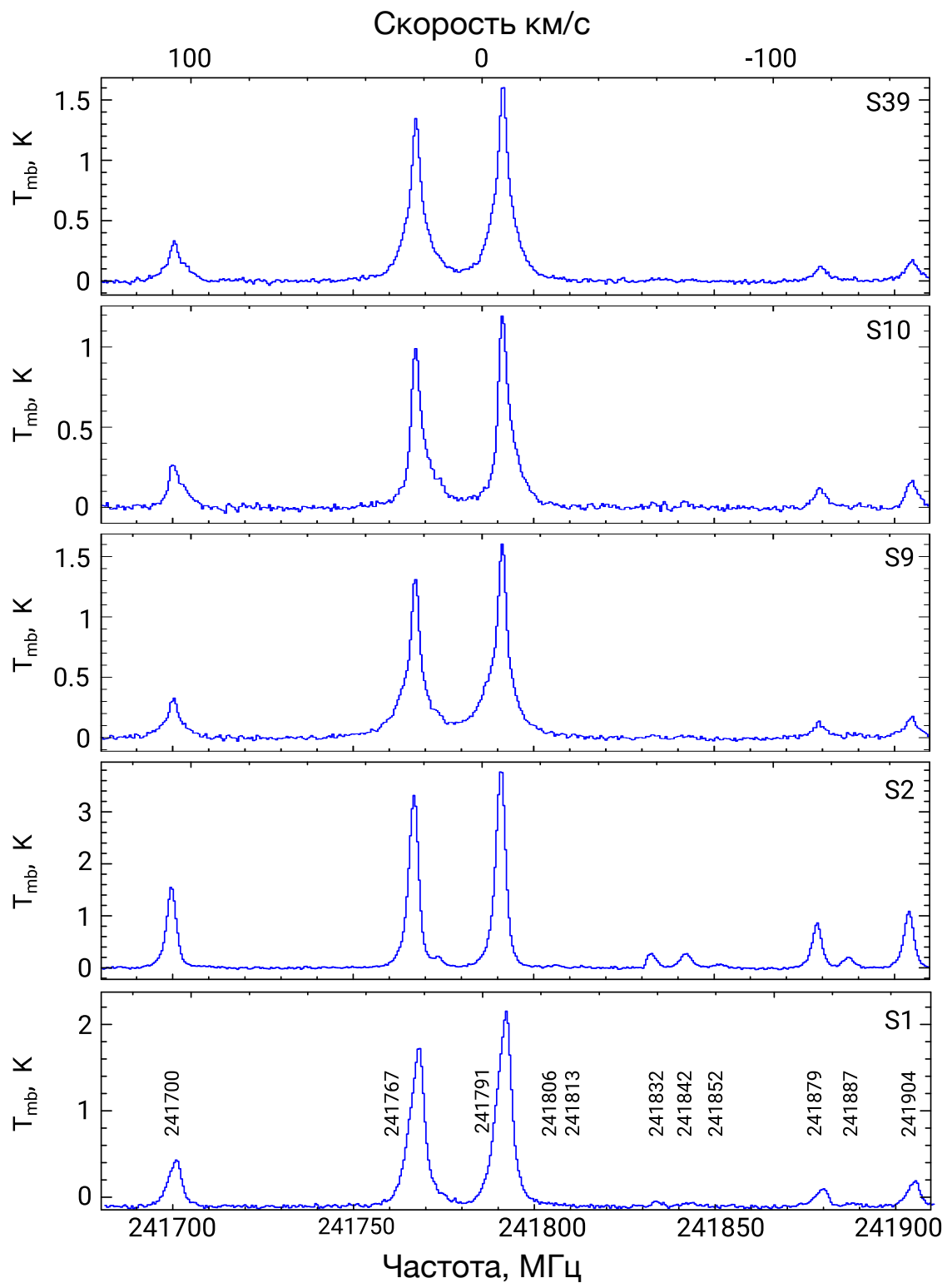


Рис. 6: Спектральная серия линий метанола в диапазоне 241680–241910 МГц, спектры в направлении на пять источников.

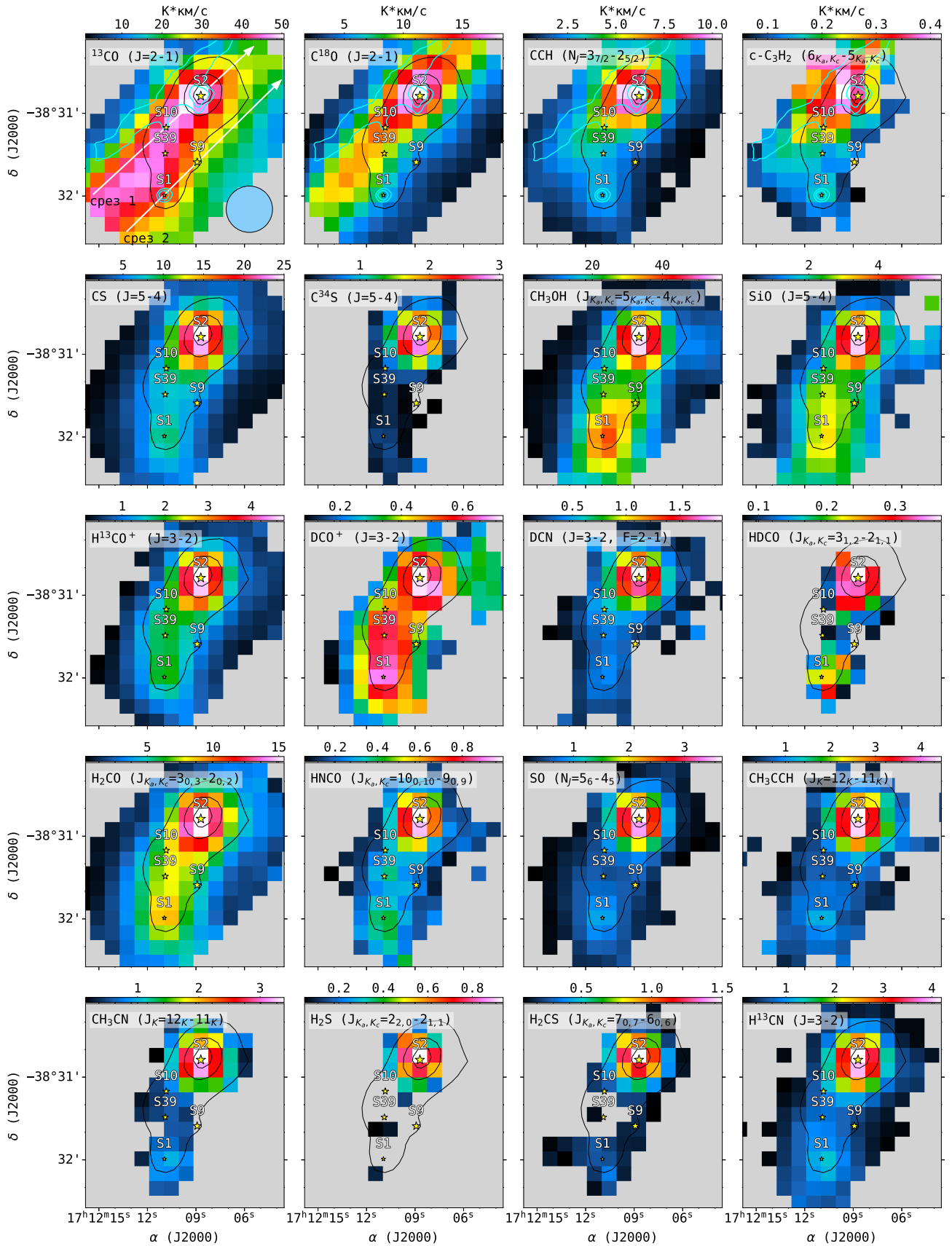


Рис. 7: Карты интегральных интенсивностей (карты нулевых моментов) рассматриваемых молекул. Молодые звёздные объекты обозначены маркерами в виде желтых звезд, размер маркера-звезды пропорционален массе каждого МЗО. Черные контуры показывают излучение пыли на длине волны 870 мкм, уровни контуров составляют 2.0, 6.0, 10.0 Ян/луч. Синие контуры показывают излучение пыли на длине волны 70 мкм, уровни контуров составляют 0.47, 1.0 Ян/пиксель. Белые стрелки, обозначенные как «срез 1» и «срез 2», указывают выбранные направления для построения диаграмм «позиция-скорость» (PV-диаграмм), обсуждаемых в разделе 1.4. Голубым кружком в нижнем правом углу панели  $^{13}\text{CO}$  обозначен приведенный размер диаграммы направленности АРЕХ.

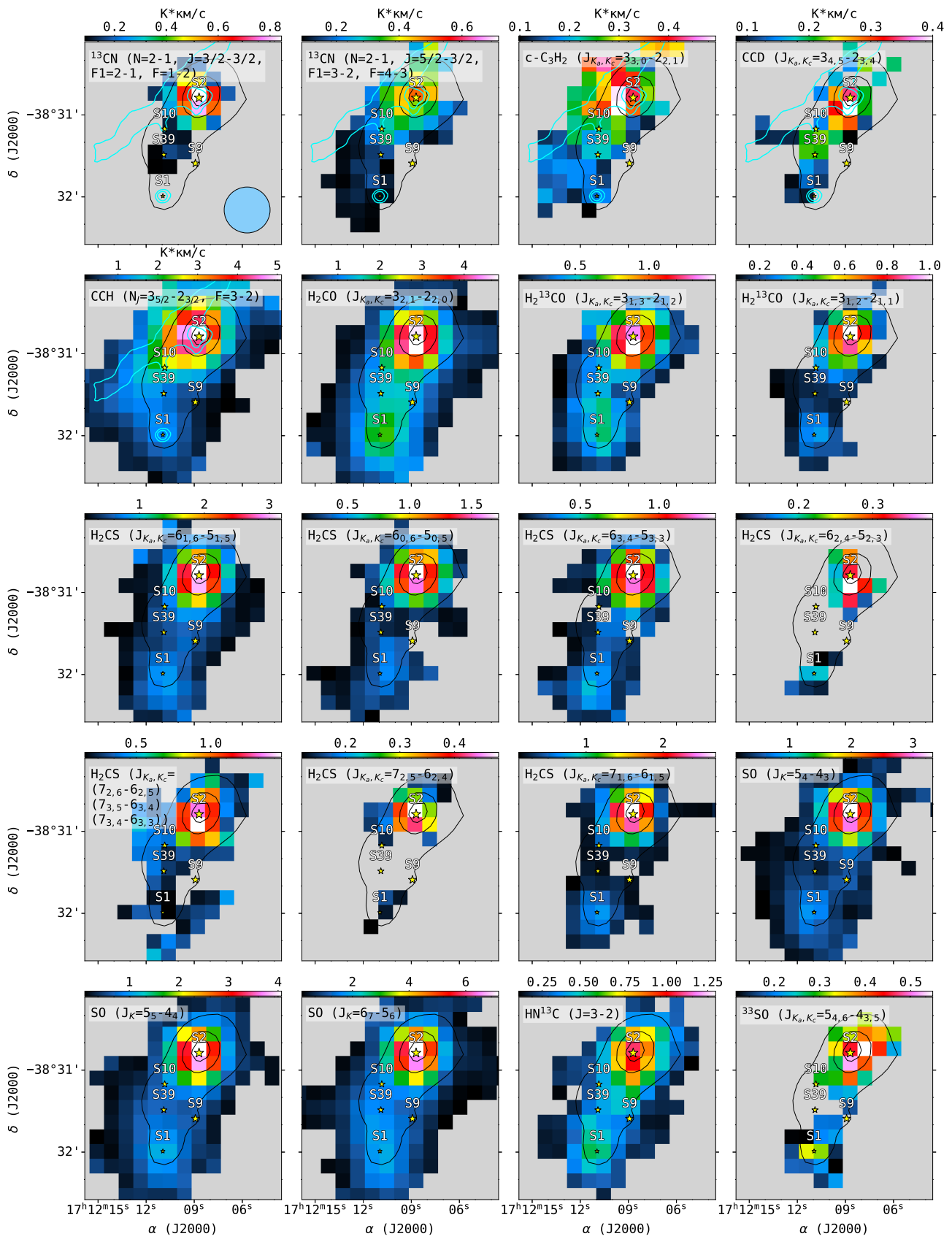


Рис. 8: Продолжение рис. 7.

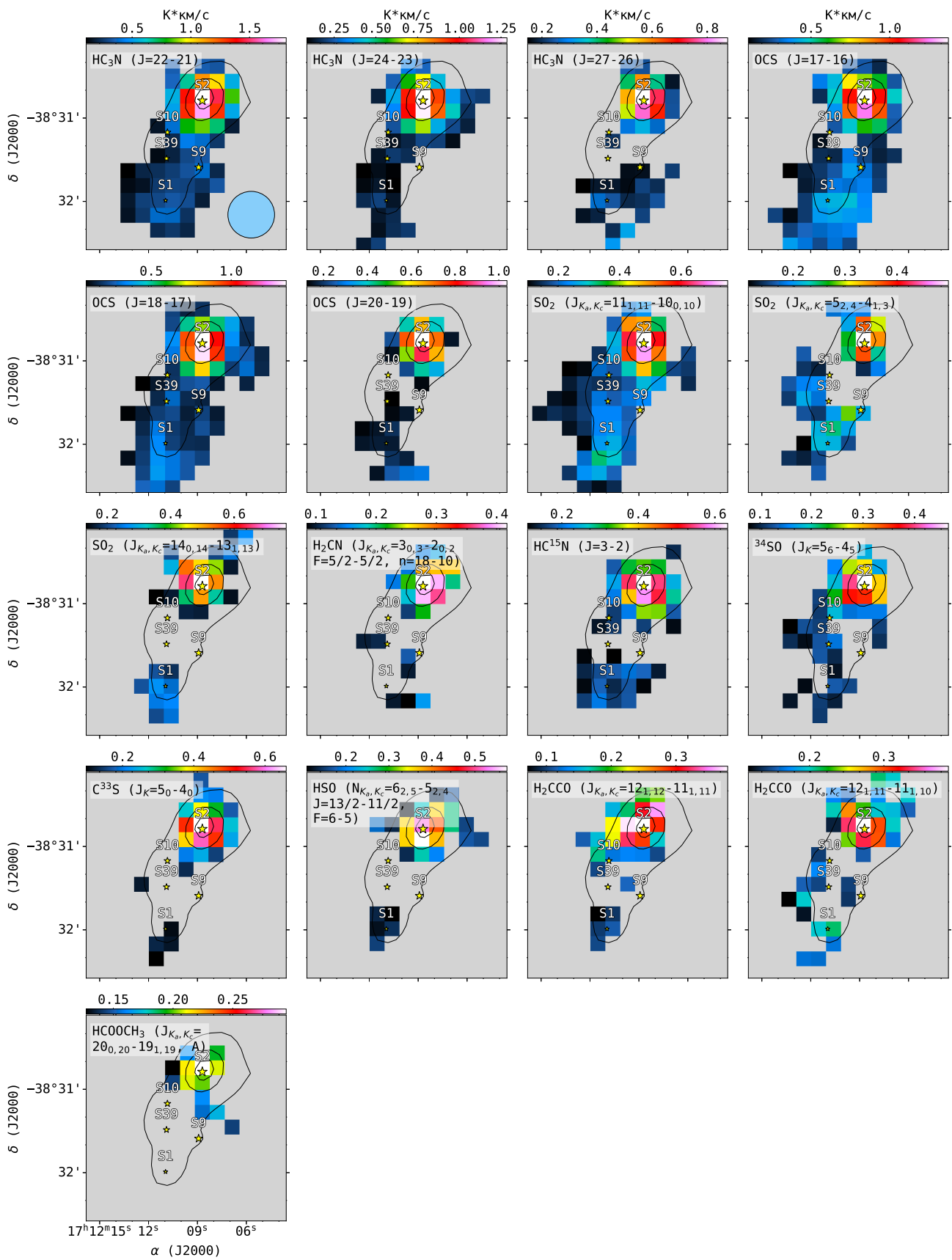


Рис. 9: Продолжение рис. 7.

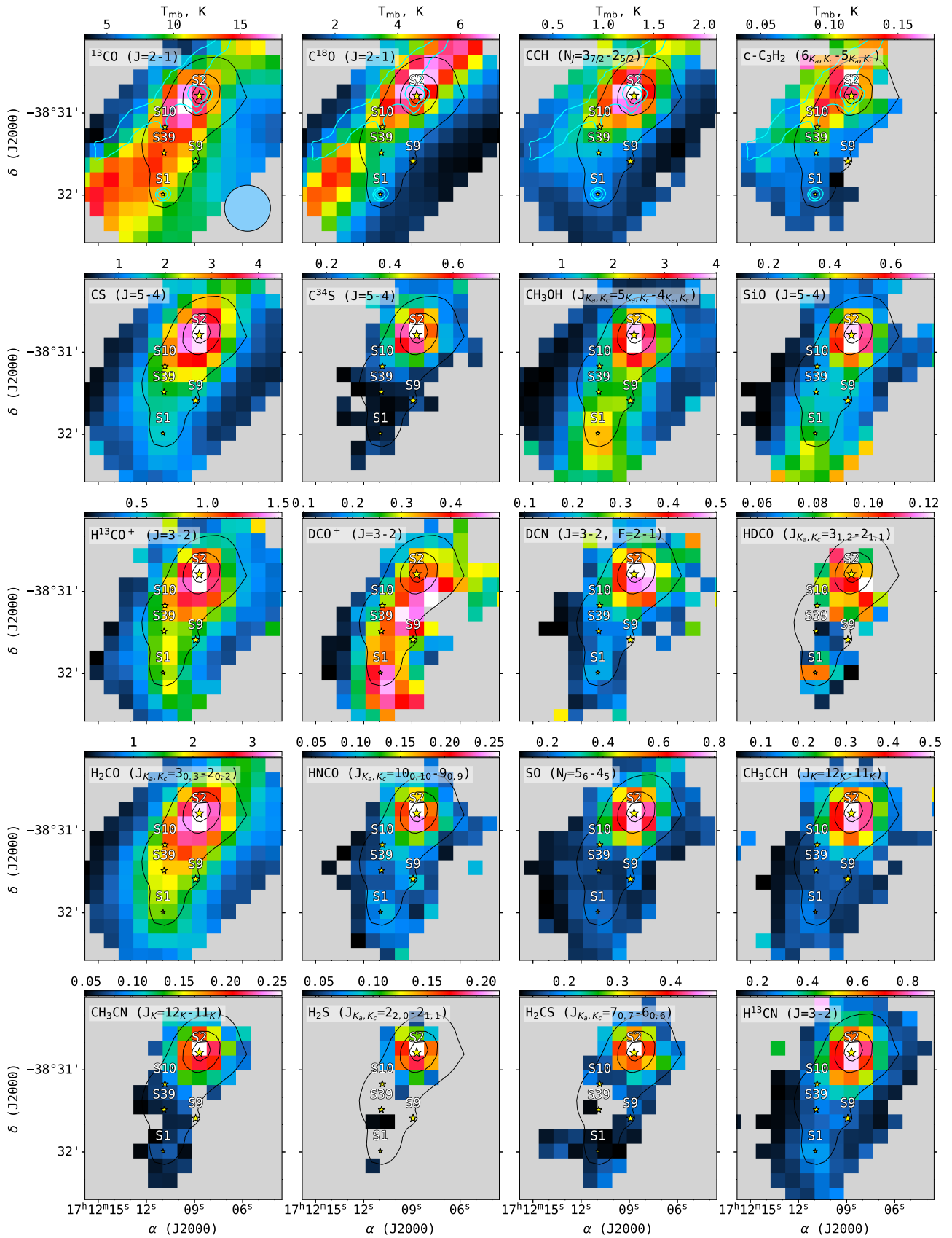


Рис. 10: Карты яркостной температуры линий двадцати молекул с наиболее яркими линиями. Молодые звездные объекты обозначены маркерами в виде желтых звезд, размер маркера-звезды пропорционален массе каждого МЗО. Черные контуры показывают излучение пыли на длине волны 870 мкм, уровни контуров составляют 2.0, 6.0, 10.0 Ян/луч. Синие контуры показывают излучение пыли на длине волны 70 мкм, уровни контуров составляют 0.47, 1.0 Ян/пиксель.

МЗО S2. Распределение излучения  $\text{CH}_3\text{CCH}$  имеет пик интегральной интенсивности в направлении МЗО S2, и в отличие от других карт в этой группе, его излучение в некоторой степени симметрично.

## 1.4 Анализ кинематики молекулярного газа

Для изучения кинематики газа внимание было сосредоточено на поиске высокоскоростных крыльев линий излучения  $\text{SiO}$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Эти молекулы обычно используются для обнаружения истечений в окрестностях горячих молекулярных ядер (например, [69, 70, 71]). Изучаемое молекулярное облако имеет градиент скорости в направлении северо-запад—юго-восток, приблизительно равный  $-1 \text{ км с}^{-1}$  (см. [51, 54]). Поэтому необходимо учитывать этот градиент при изучении истечений по крыльям спектральных линий вблизи МЗО. Для выделения крыльев на картах излучения в каждом пикселе была выполнена аппроксимация линий функцией Гаусса. Как синий и красный интервалы идентифицировались участки спектра, выходящие за пределы скорости, соответствующей максимуму излучения, на  $\pm \text{FWHM}/2$ . Интегральное излучение в пределах ширины профиля на половине высоты считается основным излучением в каждом пикселе и называется средним интервалом. Были построены карты излучения линий  $\text{SiO}$  (5–4) и  $\text{CH}_3\text{OH}$  ( $5_{0,5}$ – $4_{0,4}$ ) в красном и синем интервалах скоростей. Примеры интервалов для МЗО S1 и S2 и карты излучения в этих интервалах показаны на рис. 11. Излучение красного и синего крыльев в обеих линиях практически накладывается друг на друга в направлении МЗО S2, откуда делается вывод, что истечение в этом МЗО ориентировано вдоль луча зрения. В то же время заметно, что синее крыло менее выражено в излучении метанола по сравнению с  $\text{SiO}$ , что видно на примере спектров слева на рис. 11. Вокруг МЗО S1 также наблюдаются красные и синие крылья; это излучение имеет вид биполярного истечения, ориентированного с северо-запада на юго-восток. Ещё одна область с излучением в синем крыле наблюдается в направлении МЗО S39. Профили линий метанола состоят из нескольких перекрывающихся компонентов, однако разделить их в отдельных областях не удаётся. Возможная причина — размер диаграммы направленности, сопоставимый с угловым расстоянием между МЗО.

Для изучения кинематики на более крупном масштабе были построены диаграммы «позиция–скорость» (PV-диаграммы) по профилям линий  $\text{CH}_3\text{OH}$  ( $5_{0,5}$ – $4_{0,4}$ ),  $\text{C}^{18}\text{O}$  (2–1) и  $\text{DCO}^+$  (3–2) вдоль срезов, ориентированных параллельно ФДО RCW 120 (см. рис. 12). Сами срезы показаны на рис. 7 белыми стрелками, наложенными на панель  $^{13}\text{CO}$ , и обозначены как «срез 1» и «срез 2». Срез 1 пересекает МЗО S10 и S2, срез 2 — МЗО S1 и S9. Заметный контраст компонент скорости проявляется на PV-диаграмме линии  $\text{C}^{18}\text{O}$  вдоль среза 1. При движении вдоль среза с юго-востока на северо-запад пик скорости линии сдвигается примерно с  $-9 \text{ км с}^{-1}$

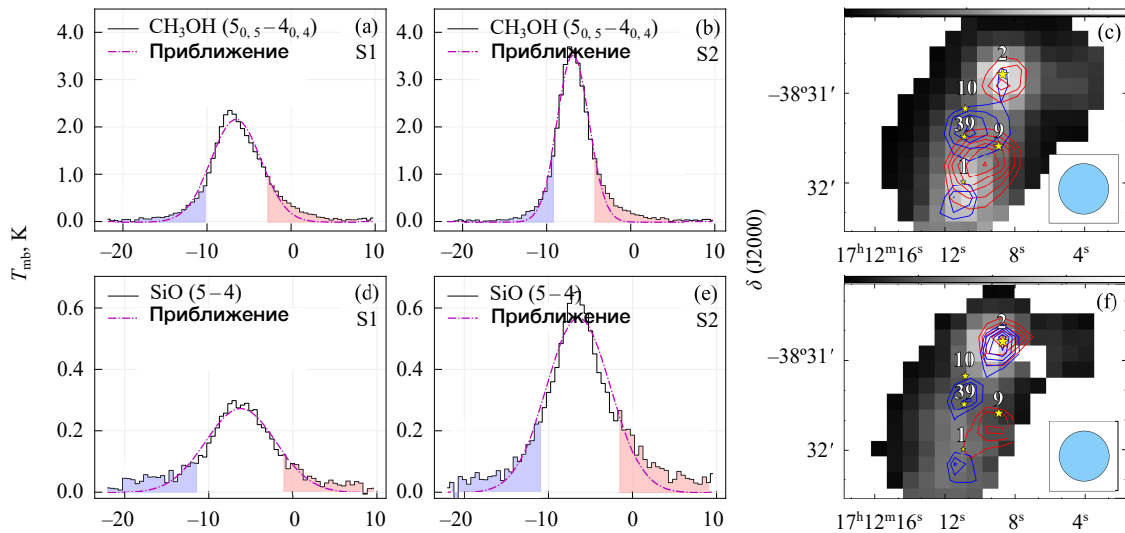


Рис. 11: Верхняя панель: Оттенками серого показана интегральная интенсивность средней компоненты излучения линии  $\text{CH}_3\text{OH}$  ( $5_{0,5}-4_{0,4}$ ,  $A^+$ ). Синие и красные контуры указывают на излучение линии  $\text{CH}_3\text{OH}$  смещенное в синюю и красную стороны, соответственно. Уровни красных контуров составляют: 20, 24, 28, 32, 36, 40  $\sigma$ , а уровни синих контуров составляют: 14, 16, 18, 20  $\sigma$  ( $\sigma = 0.15 \text{ K km s}^{-1}$ ). Нижняя панель: Оттенками серого показана интегральная интенсивность средней компоненты излучения линии  $\text{SiO}$  ( $5-4$ ). Синие и красные контуры указывают на излучение линии  $\text{SiO}$ , смещенное в синюю и красную стороны соответственно. Уровни красных контуров составляют: 6, 7, 8, 9, 10  $\sigma$ , а уровни синих контуров составляют: 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5  $\sigma$  ( $\sigma = 0.14 \text{ K km s}^{-1}$ ).

до  $-6 \text{ km s}^{-1}$  вблизи МЗО S10. К востоку от МЗО S10 вдоль этого среза плотного газа нет (см. рис. 12). На срезе 2, который находится дальше от ФДО, этот сдвиг выражен слабее: вдоль среза наблюдается почти прямая линия с незначительной особенностью самопоглощения.

Диаграммы позиция-скорость линий таких молекул, как  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{SiO}$ , отличаются от того, что наблюдается для  $\text{C}^{18}\text{O}$ . Однако они обладают заметным сходством: широкая линия, связанная с истечением, наблюдается в направлении МЗО S2. Сравнивая направления МЗО S1 и S2, истечение более заметно на диаграмме  $\text{SiO}$ , чем на диаграмме  $\text{CH}_3\text{OH}$ .

Однако на PV-диаграмме, представленной на рис. 12, линия  $\text{DCO}^+$  ( $3-2$ ) остаётся узкой даже в направлении МЗО. Узкая линия видна между МЗО S2 и S10 на срезе 1, при этом в области, где линия  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $2-1$ ) имеет сдвиг по скорости,  $\text{DCO}^+$  отсутствует. На срезе 2 выделяются две разделённые области с одинаковой скоростью: первая — между МЗО S1 и S9, вторая — без МЗО. Положения МЗО совпадают с границами этих областей на обеих диаграммах. Таким образом, на диаграммах  $\text{DCO}^+$  ( $3-2$ ), в отличие от всех рассмотренных выше молекул, истечения не прослеживаются — виден только спокойный молекулярный газ.

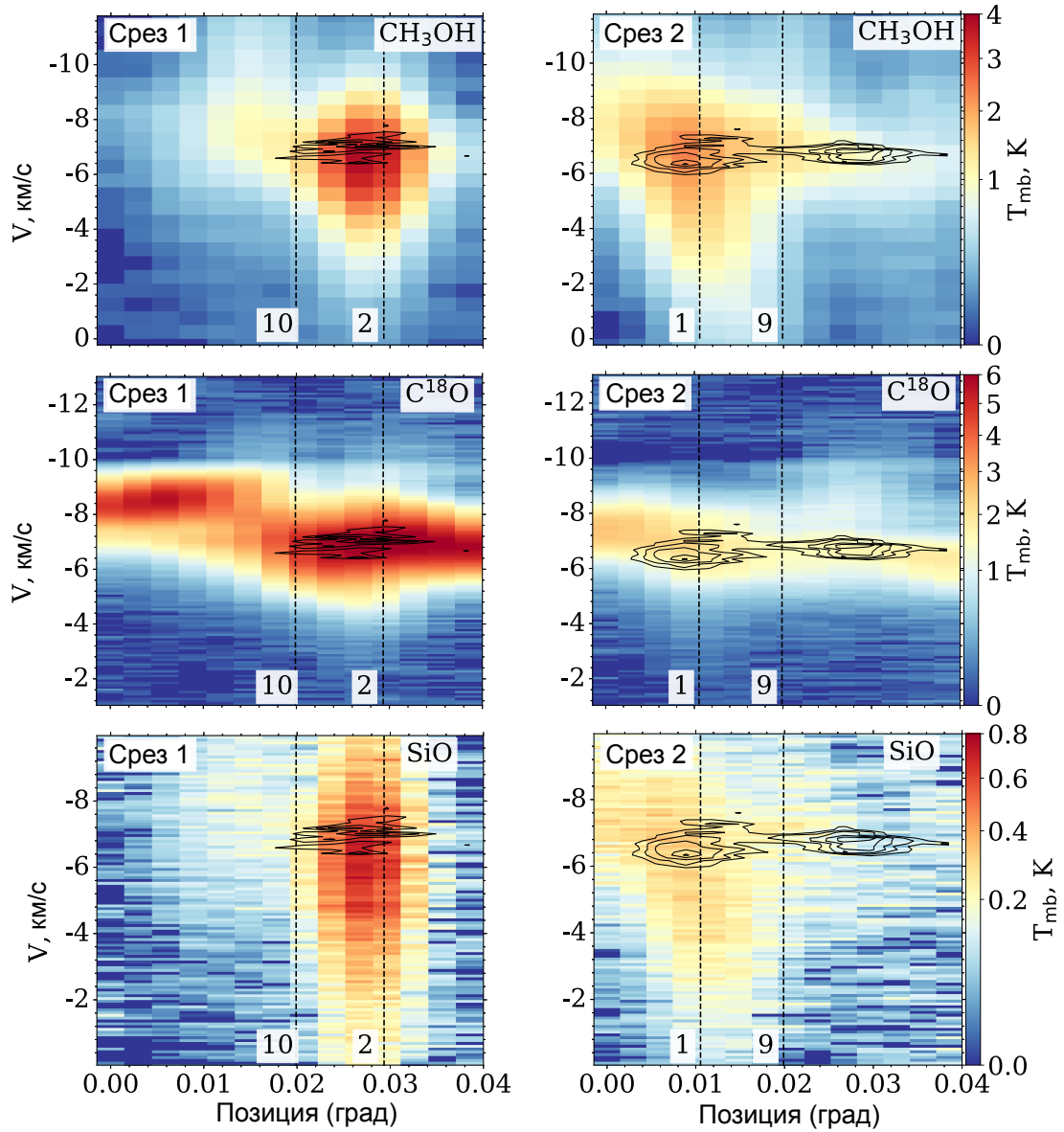


Рис. 12: Диаграммы позиция-скорость (PV-диаграммы) излучения линий  $\text{CH}_3\text{OH}$  ( $5_{0,5}-4_{0,4}$ ),  $\text{SiO}$  ( $5-4$ ) и  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $3-2$ ) показаны цветом. Черные пунктирные линии указывают на положение молодых звёздных объектов. PV диаграмма излучения линии  $\text{DCO}^+$  ( $3-2$ ) показана черными контурами. Уровни контуров изменяются от 0.25 K до 0.6 K с шагом 0.05 K.

## 1.5 Обсуждение

Анализ кинематики газа и содержаний молекул показывает, что плотный молекулярный сгусток на границе ФДО RCW 120 состоит из двух частей: южной, в которой находится МЗО S1, и северной, содержащей МЗО S2. Обе части содержат спокойный молекулярный газ, видимый по узкой линии  $\text{DCO}^+$  (3–2), и истечения, прослеживаемые по широким крыльям линий  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{SiO}$ . Узкая линия  $\text{C}^{18}\text{O}$  на  $\text{PV}$ -диаграмме согласуется со скоростью слоя, подвергнувшегося воздействию расширяющейся  $\text{H II}$ -области, найденного в работе [54]. Авторы работы [55] показали, что ФДО расширяется в сторону наблюдателя. Видно, что скорости линии  $\text{C}^{18}\text{O}$  (2–1) сдвигаются в синюю область спектра от  $-6 \text{ км с}^{-1}$  до  $-9 \text{ км с}^{-1}$  вблизи МЗО S10. Этот сдвиг может быть связан с различной плотностью молекулярного облака: плотный газ вокруг МЗО S2 замедляет ударную волну более эффективно, чем менее плотный газ к востоку от МЗО.

## 1.6 Резюме Главы 1

С помощью телескопа APEX были проведены наблюдения излучения молекулярных линий в плотном молекулярном сгустке на границе ФДО RCW 120, где МЗО всё ещё погружены в родительское облако плотного молекулярного газа. В рамках наблюдений был охвачен диапазон частот от 200 до 260 ГГц. В этой главе рассмотрены молекулярные линии, отождествлённые с 35 молекулами, включая двухатомные ( $\text{CS}$ ,  $\text{SO}$ ) и сложные органические ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{HCOOCH}_3$ ). Сделаны следующие выводы.

- Обнаружено, что все карты интегральной интенсивности можно разделить на три группы: (i) молекулы, присутствующие повсеместно в ФДО ( $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ , малоатомные углеводороды  $\text{CCH}$  и  $s\text{-C}_3\text{H}_2$ ); (ii) молекулы, излучение которых пространственно коррелирует с излучением пыли на длине волны 870 мкм ( $\text{CS}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{DCO}^+$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{HNCO}$ ,  $\text{HDCO}$ ); (iii) молекулы, излучение которых в основном наблюдается в направлении МЗО S2 (серосодержащие:  $\text{SO}$ ,  $\text{C}^{34}\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ; азотсодержащие:  $\text{DCN}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ; а также  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ).
- Анализ спектральных линий молекул-индикаторов ударных волн, таких как  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{SiO}$ , выявил широкие асимметричные профили вблизи МЗО, что свидетельствует о наличии истечений в наблюдаемых областях. Предполагается, что вблизи МЗО S2 истечение ориентировано вдоль луча зрения, а вблизи МЗО S1 — в картинной плоскости. Для выяснения происхождения истечений требуются дополнительные наблюдения излучения  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{SiO}$  с более высоким пространственным разрешением.

Результаты настоящей главы представлены в работах А 1 и А 2.

## Глава 2

# Газофазная и поверхностная химия в области образования массивных звёзд RCW 120

В настоящее время, когда рутинными стали обзоры областей звездообразования в миллиметровом диапазоне со сверхвысоким ( $R \geq 10^7$ ) спектральным разрешением [72], в том числе обзоры галактической плоскости [73], генерирующие большие объёмы данных, особенно актуальным стал вопрос об эффективной интерпретации этих наблюдений. Одним из путей решения этой проблемы является развитие статистических методов, которые позволили бы на основании наблюдаемых яркостей молекулярных линий и корреляций между ними массово определять физические параметры областей звездообразования и изучать происходящие в них процессы [74, 75]. Применение этих методов осложняется тем, что распределение яркости излучения молекул определяется далеко не только общим распределением вещества или условий возбуждения, но и особенностями химических процессов в различных физических условиях.

В предыдущей главе было проведено исследование распределения интенсивностей молекулярных линий в окрестности молодых звёздных объектов и проанализирована кинематика газа. В настоящей главе определяются физические условия вблизи МЗО и рассматривается возможность исследования астрохимических путей образования молекул на основе статистических методов анализа. Из многочисленных наблюдений и результатов моделирования известно, например, что малоатомные углеводороды, такие как CCH, образуются в газовой фазе, причём этот процесс может идти как от простых соединений к сложным [76, 77], так и наоборот [78, 79]. Другие малоатомные молекулы, например SO и OCS [80], могут образовываться и на пыли; пылевые частицы особенно важны в качестве катализатора образования сложных органических молекул — метанола и ещё более сложных соединений [81, 82] (см. также [83]). С другой стороны, некоторые сложные молекулы, например  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и другие длинные углеродные цепочки, образуются в газовой фазе [84, 85]. Наконец, многим молекулам, например воде, присуци

несколько химических каналов образования (см., например, работу [86]), и для них актуален вопрос о преобладании какого-либо канала в тех или иных физических условиях.

## 2.1 Физические условия в молекулярном газе.

### 2.1.1 Метод определения лучевых концентраций молекул в приближении ЛТР

Как было показано в ряде работ (например, [51, 53, 20, 87, 54]), приближение локального термодинамического равновесия (ЛТР) хорошо описывает физические условия в исследуемом молекулярном облаке. Поэтому это приближение было использовано для анализа излучения всех обнаруженных молекул. В Главе 1 были представлены спектры и карты молекулярного излучения для 35 молекул. Для тех молекул, у которых наблюдалось три и более перехода, построены вращательные диаграммы для определения вращательных температур. Во всех остальных случаях в качестве температуры возбуждения  $T_{\text{ex}}$  принята температура пыли  $T_{\text{dust}}$ . В плотных молекулярных сгустках, где состояние газа близко к ЛТР,  $T_{\text{dust}}$  должна быть близка к температуре газа и температуре возбуждения молекул. При использовании  $T_{\text{dust}}$  в качестве  $T_{\text{ex}}$  полученные лучевые концентрации молекул дают оценку снизу, поскольку нет возможности оценить оптические толщины линий излучения. Температура пыли была определена путём анализа данных в дальней инфракрасной области спектра, полученных с помощью космической обсерватории *Herschel*, а также данных ATLASGAL.

Такие молекулы, как метилацетилен ( $\text{CH}_3\text{CCH}$ ) и метилцианид ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ), часто используются в качестве «термометров» для тёплого и плотного газа (см., например, [88, 89, 90, 91, 92]). Обе молекулы относятся к типу симметричного волчка. Вращательные переходы между состояниями  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и  $\text{CH}_3\text{CN}$  описываются двумя квантовыми числами: полным моментом импульса ( $J$ ) и его проекцией на ось симметрии ( $K$ ). Переходы этих молекул охватывают широкий диапазон энергетических уровней. Переходы  $J \rightarrow J - 1$  с одинаковыми значениями  $K$  близки по частоте и могут наблюдаться одновременно. Как показано в работе [93],  $\text{CH}_3\text{CCH}$  может использоваться в качестве «зонда» для определения кинетической температуры молекулярного газа благодаря относительно небольшому дипольному моменту (0.784 Д [94]). Напротив,  $\text{CH}_3\text{CN}$  термализуется только в областях с высокой плотностью, поскольку его дипольный момент составляет 3,92 Д [95].

Для определения лучевых концентраций и вращательных температур использовался метод вращательных диаграмм, описанный в работе [96]. Метод основан на построении графика натурального логарифма лучевой концентрации молекул

в верхнем состоянии  $N_u$ :

$$\ln \left( \frac{N_u^{\text{thin}}}{g_u} \right) = \ln \left( \frac{N_{\text{tot}}^{\text{thin}}}{Q(T_{\text{rot}})} \right) - \frac{E_u}{k_B T_{\text{rot}}}, \quad (2.1)$$

где  $T_{\text{rot}}$  — вращательная температура,  $Q$  — вращательная статистическая сумма  $T_{\text{rot}}$ ,  $g_u$  — статистический вес уровня,  $E_u$  — энергия верхнего уровня,  $k_B$  — постоянная Больцмана. Лучевая концентрация молекул в оптически тонком приближении  $N_u^{\text{thin}}$  может быть найдена как:

$$N_u^{\text{thin}} = \frac{8\pi k_B \nu^2 W}{hc^3 A_{ul}}, \quad (2.2)$$

где  $\nu$  — это частота линии,  $W = \int T_{\text{mb}} dV$  — интегрированная интенсивность линии,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $A_{ul}$  — коэффициент Эйнштейна спонтанного излучения из верхнего в нижнее состояние. Для построения вращательной диаграммы учитывались только линии с отношением  $S/N > 3$ .

Если линии оптически тонкие и соответствующие переходы имеют примерно одинаковую температуру возбуждения, график  $\ln(N_u^{\text{thin}}/g_u)$  в зависимости от  $E_u/k_B$  представляет собой прямую вида  $y(x) = -kx + b$ , откуда можно получить вращательную температуру, обратную пропорциональную тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс. Полная лучевая концентрация молекулы  $N_{\text{tot}}^{\text{thin}}$  определяется по точке пересечения прямой с осью ординат, равной  $\ln(N_{\text{tot}}^{\text{thin}}/Q(T_{\text{rot}}))$ . Статистическая сумма  $Q(T_{\text{rot}})$  была получена путём интерполяции данных Кёльнской базы данных по молекулярной спектроскопии (CDMS) [97]<sup>1</sup>. Использовались значения  $Q$ , включающие как  $A$ -, так и  $E$ -типы молекул  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$ .

Для молекул, температура возбуждения которых не поддавалась оценке, была использована методика, описанная в работе [98], для определения лучевых концентраций молекул. Сначала вычислялись лучевые концентрации, с использованием оптически тонкого приближения:

$$N_{\text{tot}}^{\text{thin}} = \left( \frac{3h}{8\pi^3 S \mu^2 R_i} \right) \left( \frac{Q(T_{\text{rot}})}{g_u} \right) \frac{\exp \left( \frac{E_u}{k_B T_{\text{ex}}} \right)}{\exp \left( \frac{h\nu}{k_B T_{\text{ex}}} \right) - 1} \quad (2.3)$$

$$\times \frac{1}{(J_\nu(T_{\text{ex}}) - J_\nu(T_{\text{bg}}))} \int \frac{T_{\text{mb}} dV}{f},$$

где сила линии вычисляется как  $S = \frac{J_u}{2J_u + 1}$  для линейных молекул и  $S =$

$\frac{J_u^2 - K^2}{J_u(2J_u + 1)}$  для молекул типа симметричного волчка,  $\mu$  — постоянный дипольный

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

момент, взятый из CDMS,  $R_i$  — относительные сверхтонкие интенсивности. Статистическая сумма  $Q$  была вычислена для линейных молекул ( $Q \simeq kT_{\text{ex}}/h\nu + 1/3$ ) и интерполирована с использованием данных, представленных в CDMS, для молекул типа симметричного и асимметричного волчка,  $g_u$  — статистический вес,  $T_{\text{ex}}$  — температура возбуждения,  $J_\nu(T)$  — эквивалентная интенсивность черного тела при температуре  $T$ :

$$J_\nu(T) \equiv \frac{h\nu}{k_{\text{B}} \left( \exp \left( \frac{h\nu}{k_{\text{B}}T} \right) - 1 \right)}.$$

В дальнейшем, предполагается, что коэффициент заполнения диаграммы направленности  $f = 1$  и  $T_{\text{bg}} = 2.7$  К.

При наблюдениях в широком диапазоне частот были обнаружены как оптически толстые линии молекул, так и линии некоторых изотопологов. В силу малых содержаний изотопологов разумно предположить, что связанные с ними линии можно считать оптически тонкими. Это позволяет оценить оптическую толщину основного изотополога  $\tau_\nu$  по значениям максимумов яркостных температур для оптически тонких и оптически толстых линий —  $T_{\text{mb, thin}}$  и  $T_{\text{mb, thick}}$  соответственно:

$$\frac{T_{\text{mb, thin}}}{T_{\text{mb, thick}}} = \frac{1 - e^{-\tau_\nu/r}}{1 - e^{-\tau_\nu}}, \quad (2.4)$$

где  $r$  — это соотношение изотопов, которое зависит от галактоцентрического расстояния объекта (использовались значения, приведенные в работе [99]). Уравнение было решено с помощью функции `fsolve` из модуля Python `scipy.optimize`<sup>2</sup>. Используя ту же функцию Python и предполагая, что среда однородна, температуры возбуждения  $T_{\text{ex}}$  определялись следующим образом:

$$T_{\text{mb, thick}} = (J_\nu(T_{\text{ex}}) - J_\nu(T_{\text{bg}})) (1 - e^{-\tau_\nu}). \quad (2.5)$$

Ввиду схожести сечений столкновений температура возбуждения всех изотопологов считалась одинаковой. В этом предположении были определены лучевые концентрации молекул CO (по изотопологам  $^{13}\text{CO}$  и  $\text{C}^{18}\text{O}$ ) и CS (по изотопологу  $\text{C}^{34}\text{S}$ ). Используются изотопные отношения  $r = 50,1$  для  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  и  $r = 440,5$  для  $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$  в соответствии с галактоцентрическим расстоянием RCW 120 (см. [99]). Для отношения  $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$  использовалось значение  $r = 22$ : как показано в работе [100], это отношение не изменяется с расстоянием от галактического центра. Для всех остальных молекул в качестве температуры возбуждения  $T_{\text{ex}}$  использовалась температура пыли  $T_{\text{dust}}$ .

<sup>2</sup><https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.fsolve.html>

Наконец, учитывая оптическую толщину линий главных изотопологов, можно ввести поправку на оптическую толщину к лучевой концентрации ( $N_{\text{tot}}^{\text{thick}}$ ):

$$N_{\text{tot}}^{\text{thick}} = N_{\text{tot}}^{\text{thin}} \frac{\tau}{1 - e^{-\tau}}. \quad (2.6)$$

Для анализа дейтерированных молекул и соединений, для которых нет доступных наблюдений их изотопологов, был применён следующий подход. В предположении оптически тонкого излучения лучевые концентрации вычислялись по уравнениям (2.2) и (2.1).

При расчёте полных (орто+пара) лучевых концентраций молекул  $\text{H}_2\text{CO}$  и  $s\text{-C}_3\text{H}_2$  использовалось отношение ядерных спиновых изомеров орто:пара, равное 3 : 1. Для определения полной лучевой концентрации  $s\text{-C}_3\text{H}_2$  учитывалось, что орто-состояние расположено на  $1,63 \text{ см}^{-1}$  выше основного.

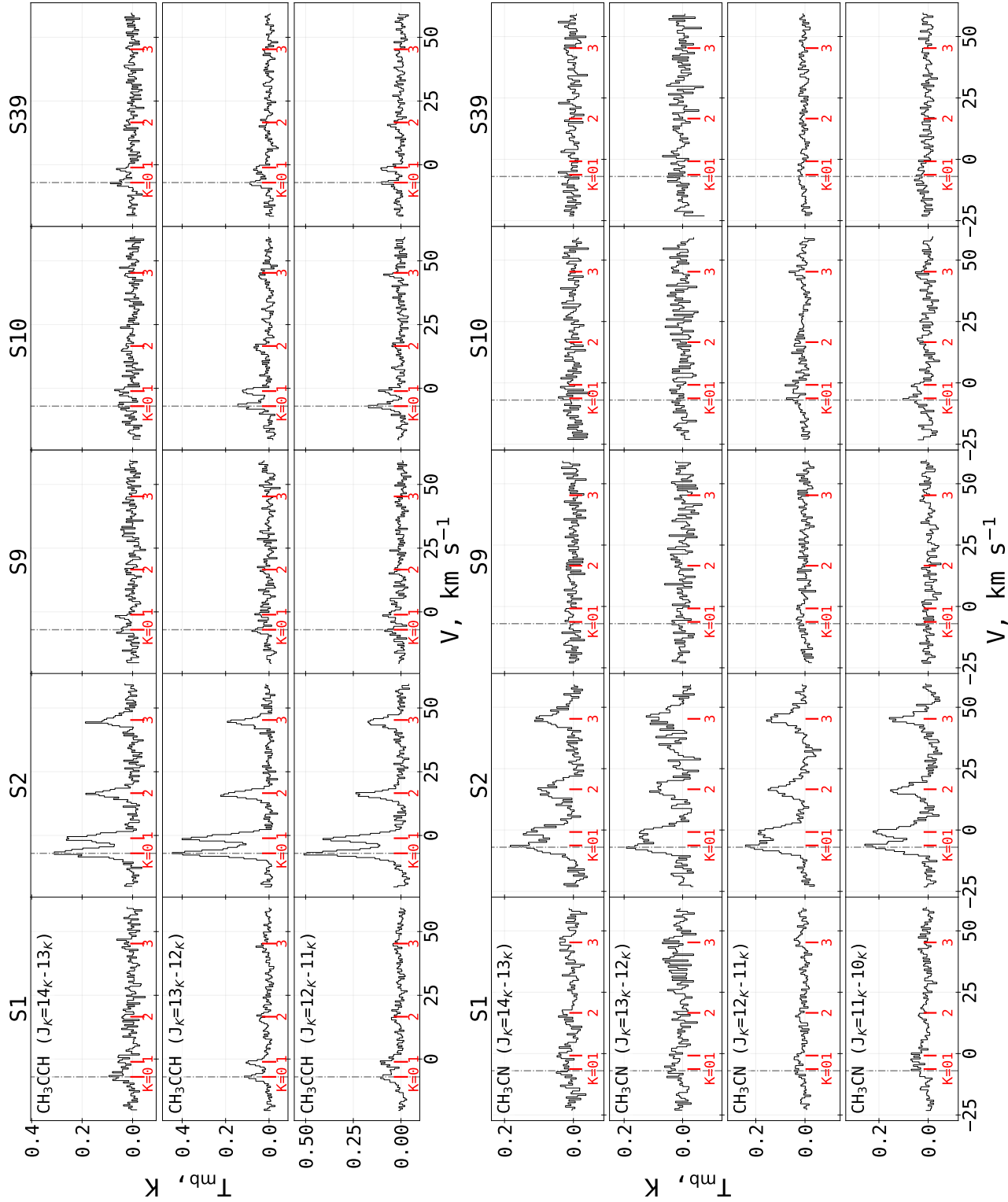


Рис. 13: Спектральные линии, используемые для анализа в условиях локального термодинамического равновесия (ЛТР), спектры в направлении на пять источников. Пунктирная серая линия обозначает скорость локального стандарта покоя  $V_{\text{LSR}} = -7 \text{ km s}^{-1}$ . Верхняя панель: линии лесенки:  $\text{CH}_3\text{CCH}$  K-сверху вниз:  $J_K = 14_K-13_K$ ,  $J_K = 13_K-12_K$ ,  $J_K = 12_K-11_K$ . Нижняя панель: линии лесенки:  $\text{CH}_3\text{CN}$  K-сверху вниз:  $J_K = 14_K-13_K$ ,  $J_K = 13_K-12_K$ ,  $J_K = 12_K-11_K$ ,  $J_K = 11_K-10_K$ .

### 2.1.2 Результаты. Температуры возбуждения вращательных уровней

В наблюдаемом диапазоне частот были обнаружены серии линий следующих молекул:

- $\text{CH}_3\text{CCH}$ :  $J = 12_K-11_K$ ,  $J = 13_K-12_K$ ,  $J = 14_K-13_K$ ;
- $\text{CH}_3\text{CN}$ :  $J = 11_K-10_K$ ,  $J = 12_K-11_K$ ,  $J = 13_K-12_K$ ;
- $\text{SO}_2$ :  $J_{K_a, K_c} = 5_{2,4}-4_{1,3}$ ,  $J_{K_a, K_c} = 11_{1,11}-10_{0,10}$ ,  $J_{K_a, K_c} = 14_{0,14}-13_{0,13}$ ;
- $\text{OCS}$ :  $J = 17-16$ ,  $J = 18-17$ ,  $J = 20-19$ ;
- $\text{HC}_3\text{N}$ :  $J = 22-21$ ,  $J = 24-23$ ,  $J = 27-26$ ;
- $\text{H}_2\text{CS}$ :  $J = 6_{K_a, K_c}-5_{K_a, K_c}$ ,  $J = 7_{K_a, K_c}-6_{K_a, K_c}$ ;
- $\text{SO}$ :  $J = 5_K-4_K$ ,  $J = 6_K-5_K$ .

Для этих переходов применён описанный выше метод вращательных диаграмм для определения физических условий в плотном молекулярном облаке. Интегральные интенсивности использованных линий излучения в направлении МЗО приведены в табл. 2.

Диаграммы населённости вращательных уровней молекул в направлении МЗО показаны на рис. 14–18. Максимальное число диаграмм — восемь — построено для МЗО S2 и МЗО S1 по молекулам  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{SO}$  и  $\text{SiO}$ . Отношение сигнал/шум в других МЗО оказалось ниже, поэтому для них число диаграмм меньше. Из рисунков видно, что для всех перечисленных молекул наблюдаемые интенсивности линий соответствуют линейному соотношению между  $E_u$  и логарифмом лучевой концентрации, а значит, условия возбуждения молекул в МЗО соответствуют температурам, указанным на диаграммах. Исключение составляют диаграммы для молекулы  $\text{H}_2\text{CS}$ , где на одну прямую ложатся только переходы, для которых  $E_u < 90$  К. Переходы с более высокими значениями  $E_u$  не рассматривались при построении вращательных диаграмм, хотя и показаны на рисунках.

Наибольшие вращательные температуры для МЗО S2 — 58 и 52 К — были получены из вращательных диаграмм молекул  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{OCS}$  соответственно, а наименьшее значение — 19 К — было найдено из вращательной диаграммы для молекулы  $\text{SiO}$ . По убыванию вращательных температур молекулы выстраиваются в последовательность  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{SiO}$ , которая может быть связана с химической структурой МЗО S2.

Для МЗО S1 наибольшая вращательная температура была получена для молекулы  $\text{CH}_3\text{CN}$  и составила  $61 \pm 16$  К, наименьшая — для  $\text{SiO}$  и составила 14 К.

За исключением вращательных температур молекул  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{HC}_3\text{N}$ , полученные значения для МЗО S1 в среднем ниже, чем для МЗО S2, примерно на 5–20 К, с наименьшим различием для молекулы SO и с максимальным — для молекулы  $\text{SO}_2$ . Стоит отметить, что в МЗО S1 молекулы (кроме  $\text{HC}_3\text{N}$ ) выстраиваются в такой же порядок по убыванию вращательных температур, как и в случае МЗО S2.

В направлении МЗО S10 и S39 достаточное количество линий для построения вращательных диаграмм наблюдалось только для молекул SO,  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$  и SiO. В МЗО S10 вращательная температура, определённая по линиям молекулы  $\text{CH}_3\text{CCH}$ , оказалась выше вращательных температур, найденных по линиям молекул  $\text{H}_2\text{CS}$ , SO и SiO: 41 К, 20 К, 13 К и 11 К соответственно (рис. 14 и 17). В МЗО S39 температура возбуждения  $\text{CH}_3\text{CCH}$  также около 42 К, температуры молекул  $\text{H}_2\text{CS}$  и SO в пределах ошибок совпадают и равны 13–14 К (рис. 18), а для SiO получено значение 12 К. В МЗО S9 удалось определить температуру возбуждения SO,  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и SiO на уровне 12 К, 27 К и 12 К соответственно (рис. 16). Компоненты  $K = 2$  и  $K = 3$  серии линий  $\text{CH}_3\text{CCH}$  для МЗО S9 и S39 относительно слабы. В результате использовались только компоненты  $K = 0$  и  $K = 1$  для этих МЗО (и  $K = 3$  в случае наименьшего наблюдаемого перехода  $J$  для МЗО S39). Это ограничение привело к увеличению неопределённостей в анализе этих МЗО по сравнению с другими, где было рассмотрено большее количество переходов. Отношение сигнал/шум для наблюдения серий линий  $\text{CH}_3\text{CN}$  в направлении МЗО S9 и S39 недостаточно для получения надёжных результатов. В отличие от других источников, в МЗО S2 удалось обнаружить все четыре линии для каждой серии. Видно, что  $T_{\text{rot}}$  линий  $\text{CH}_3\text{CN}$  приблизительно на 20 К выше для МЗО S1 и S2 и примерно на 10 К выше для МЗО S10, чем для линий  $\text{CH}_3\text{CCH}$ . Следовательно, излучение  $\text{CH}_3\text{CN}$  указывает на более высокую температуру газа по сравнению с излучением  $\text{CH}_3\text{CCH}$ , образуя структуру, напоминающую луковичу. Излучение  $\text{CH}_3\text{CN}$  сосредотачивается в более компактных областях и, вероятно, указывает на более высокую плотность и температуру газа вблизи МЗО по сравнению с излучением  $\text{CH}_3\text{CCH}$ . Температуры возбуждения SiO во всех МЗО оказываются самыми низкими среди рассмотренных молекул и лежат в диапазоне 11–19 К. Общий вывод, который можно сделать по диаграммам населённостей, состоит в том, что излучение одних и тех же молекул в разных МЗО возникает в похожих условиях; в МЗО S2 линии ярче, по-видимому, за счёт более высокой лучевой концентрации молекул.

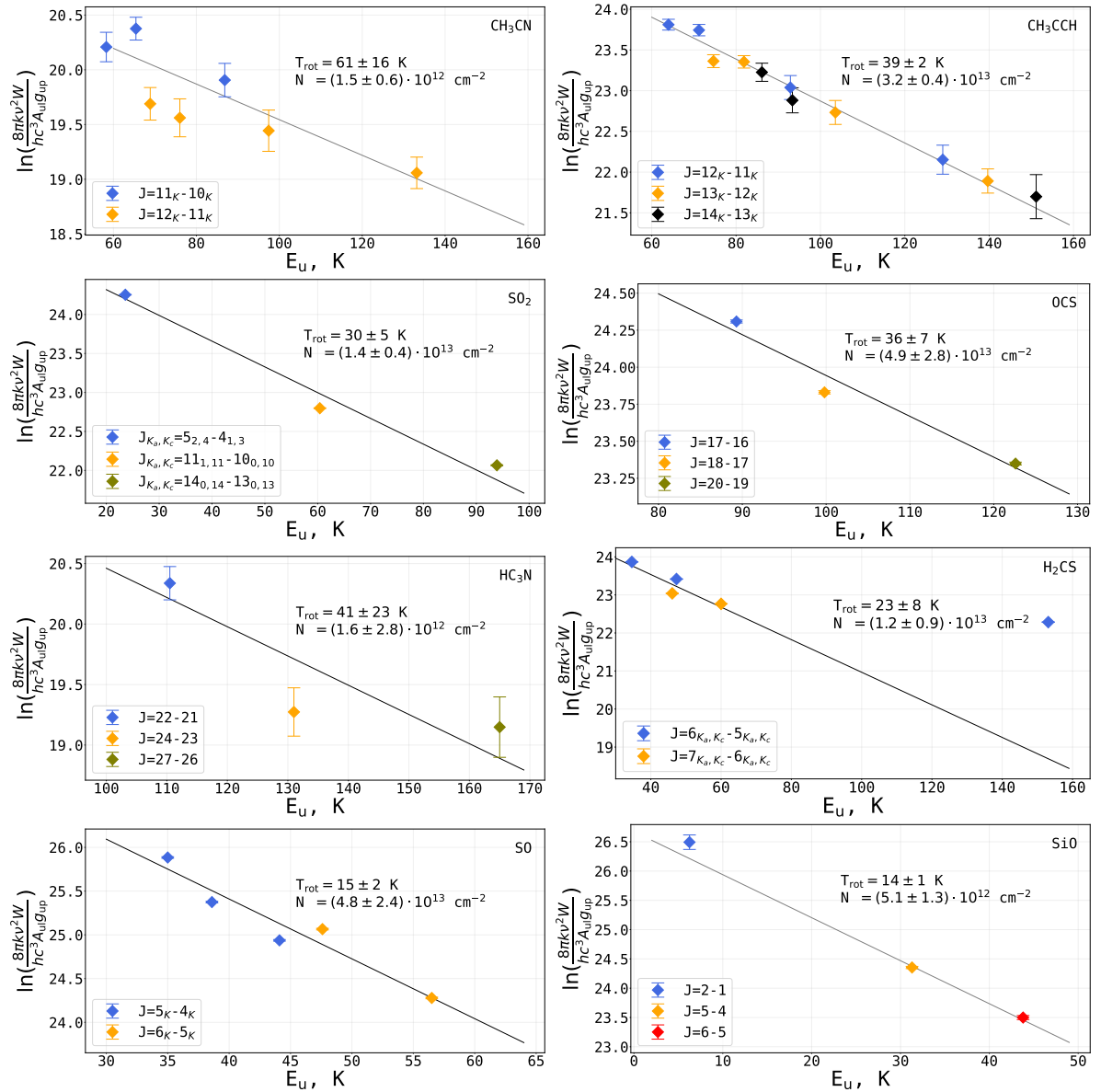


Рис. 14: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул CH<sub>3</sub>CN, CH<sub>3</sub>CCH, SO<sub>2</sub>, OCS, HC<sub>3</sub>N, H<sub>2</sub>CS, SO и SiO в МЗО S1.

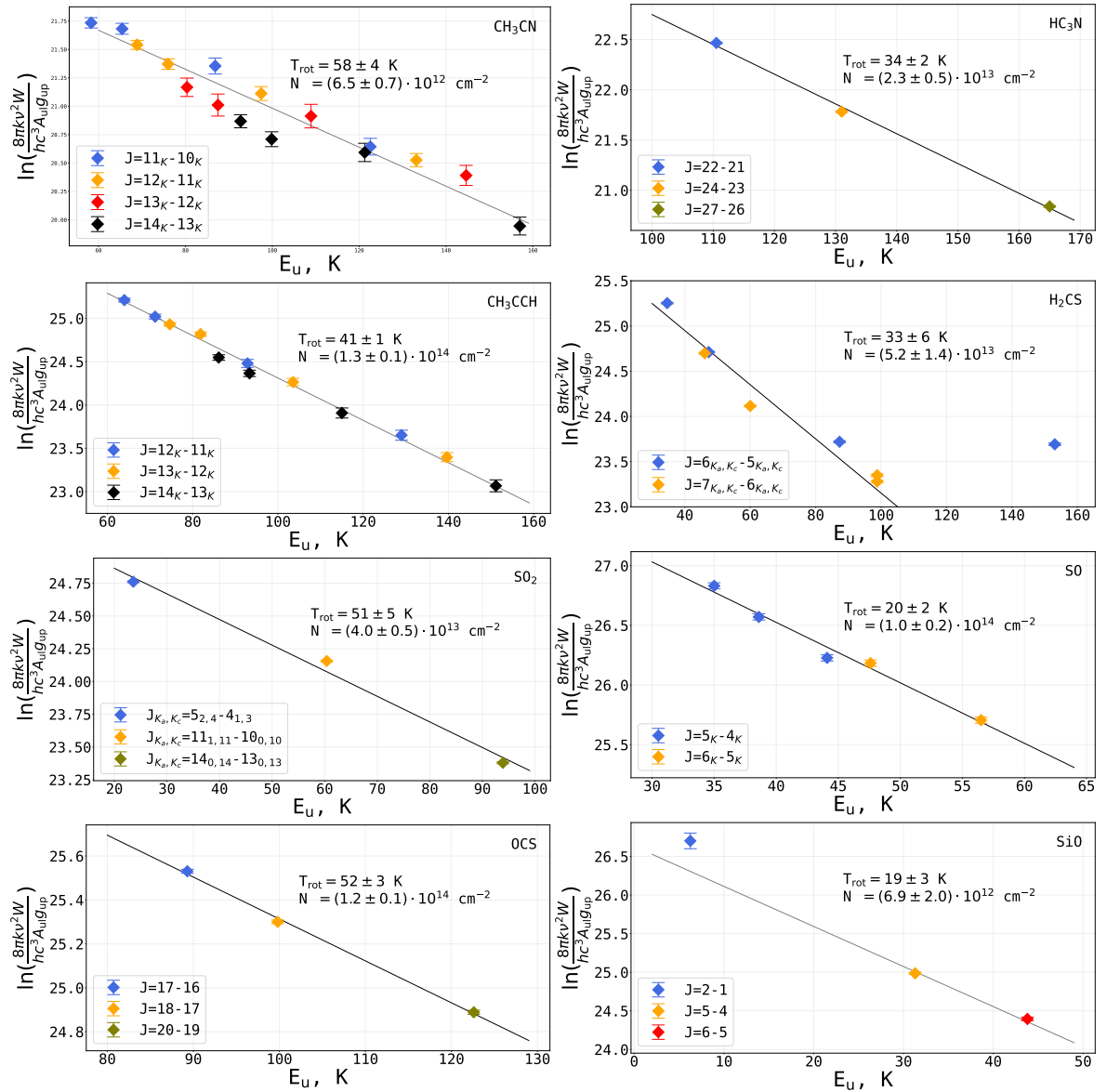


Рис. 15: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул  $CH_3CN$ ,  $CH_3CCH$ ,  $SO_2$ ,  $OCS$ ,  $HC_3N$ ,  $H_2CS$ ,  $SO$  и  $SiO$  в МЗО S2.

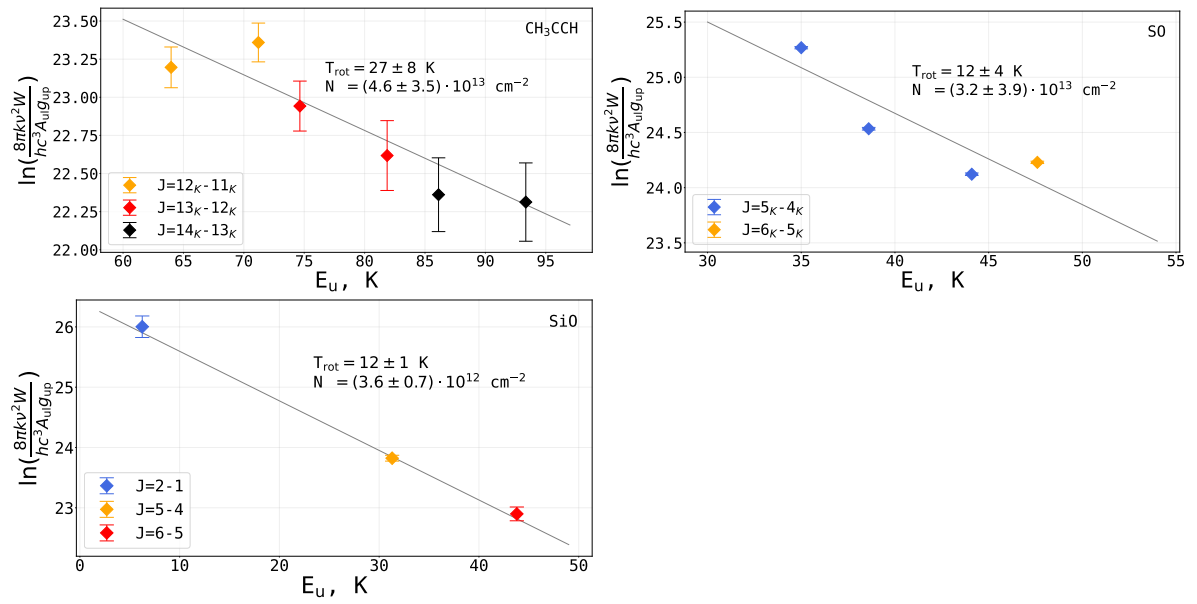


Рис. 16: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул CH<sub>3</sub>CCH, SO и SiO в МЗО S9.

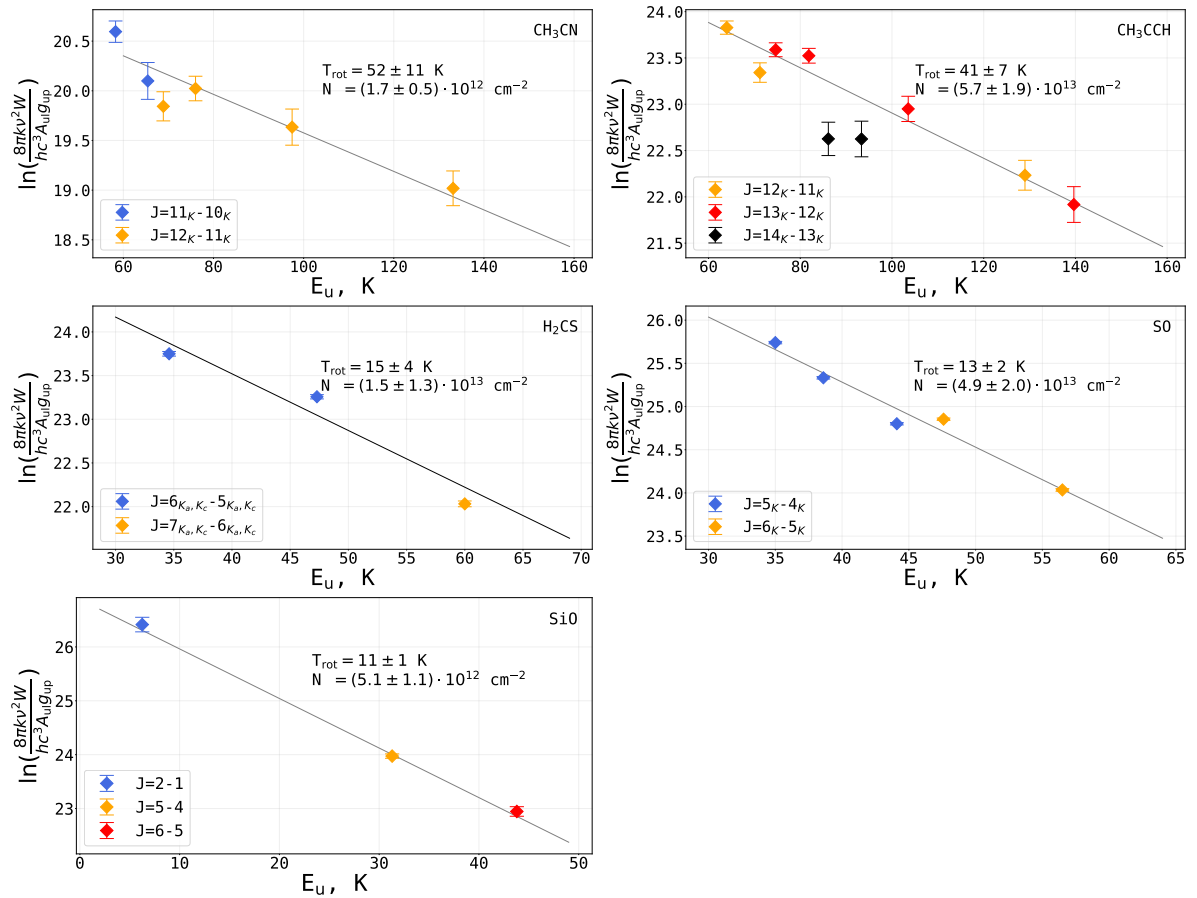


Рис. 17: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул CH<sub>3</sub>CN, CH<sub>3</sub>CCH, H<sub>2</sub>CS, SO и SiO в МЗО S10.

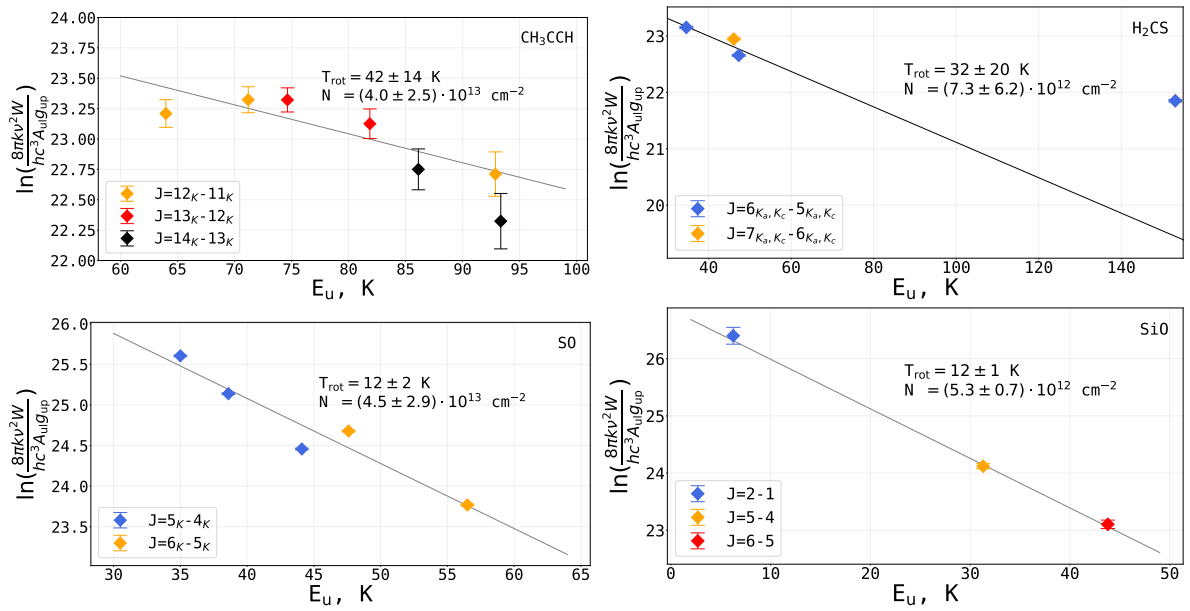


Рис. 18: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул CH<sub>3</sub>CCH, H<sub>2</sub>CS, SO и SiO в МЗО S39.

Некоторые параметры линий  $\text{CH}_3\text{CCN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  
 $\text{SO}$  и  $\text{SiO}$  в направлении молодых звездных объектов (M30) S1, S2, S9, S10, S39.

Молекула	Частота, МГц	Переход	$E_{\text{up}}$ , К	$\lg A_{\text{ul}}$	$g_{\text{up}}$	$\int T_{\text{mb}} dV$ , К км с <sup>-1</sup>					
						S1	S2	S9	S10	S39	
$\text{CH}_3\text{CCN}$	205045.500	12 <sub>3</sub> -11 <sub>3</sub>	129.0	-4.557	100	0.14±0.03	0.63±0.04	-	0.15±0.02	-	
	205065.070	12 <sub>2</sub> -11 <sub>2</sub>	92.88	-4.541	50	0.18±0.03	0.75±0.03	-	-	0.13±0.02	
	205076.816	12 <sub>1</sub> -11 <sub>1</sub>	71.20	-4.532	50	0.37±0.03	1.32±0.04	0.25±0.03	0.25±0.03	0.24±0.03	
	205080.732	12 <sub>0</sub> -11 <sub>0</sub>	63.98	-4.529	50	0.40±0.03	1.61±0.04	0.22±0.03	0.40±0.03	0.22±0.02	
	222128.815	13 <sub>3</sub> -12 <sub>3</sub>	139.7	-4.447	108	0.13±0.02	0.58±0.03	-	0.13±0.03	-	
	222150.010	13 <sub>2</sub> -12 <sub>2</sub>	103.5	-4.433	54	0.16±0.02	0.72±0.03	-	0.19±0.03	-	
	222162.730	13 <sub>1</sub> -12 <sub>1</sub>	81.9	-4.426	54	0.29±0.02	1.27±0.03	0.14±0.03	0.35±0.03	0.23±0.03	
	222166.971	13 <sub>0</sub> -12 <sub>0</sub>	74.6	-4.423	54	0.30±0.02	1.43±0.03	0.20±0.03	0.37±0.03	0.29±0.03	
	239211.215	14 <sub>3</sub> -13 <sub>3</sub>	151.14	-4.346	116	0.13±0.03	0.49±0.03	-	-	-	
	239234.034	14 <sub>2</sub> -13 <sub>2</sub>	115.02	-4.334	58	-	0.58±0.03	-	-	-	
	239247.728	14 <sub>1</sub> -13 <sub>1</sub>	93.35	-4.327	58	0.21±0.03	0.94±0.03	0.12±0.03	0.16±0.03	0.12±0.03	
	239252.294	14 <sub>0</sub> -13 <sub>0</sub>	86.12	-4.325	58	0.30±0.03	1.13±0.04	0.13±0.03	0.17±0.03	0.19±0.03	
	$\text{CH}_3\text{CN}$	202320.443	11 <sub>3</sub> -10 <sub>3</sub>	122.57	-3.183	92	-	0.70±0.05	-	-	-
		202339.922	11 <sub>2</sub> -10 <sub>2</sub>	86.85	-3.164	46	0.18±0.03	0.75±0.05	-	-	-
202351.612		11 <sub>1</sub> -10 <sub>1</sub>	65.42	-3.153	46	0.29±0.03	1.06±0.05	-	0.22±0.04	-	
202355.510		11 <sub>0</sub> -10 <sub>0</sub>	58.27	-3.149	46	0.24±0.03	1.13±0.05	-	0.36±0.04	-	
220709.017		12 <sub>3</sub> -11 <sub>3</sub>	133.16	-3.062	100	0.17±0.02	0.75±0.04	-	0.17±0.03	-	
220730.261		12 <sub>2</sub> -11 <sub>2</sub>	97.44	-3.047	50	0.13±0.02	0.70±0.04	-	0.16±0.03	-	
220743.011	12 <sub>1</sub> -11 <sub>1</sub>	76.01	-3.037	50	0.15±0.03	0.93±0.04	-	0.24±0.03	-		

(Продолжение)

Молекула	Частота, МГц	Переход	$E_{\text{ур}},$ К	$\lg A_{\text{ul}}$	$g_{\text{ур}}$	$\int T_{\text{mb}} dV, \text{ К км с}^{-1}$				
						S1	S2	S9	S10	S39
	220747.262	$12_0-11_0$	68.87	-3.034	50	0.17±0.03	1.11±0.04	-	0.20±0.03	-
	239096.497	$13_3-12_3$	144.63	-2.952	108	-	0.78±0.07	-	-	-
	239119.505	$13_2-12_2$	108.92	-2.939	54	-	0.68±0.07	-	-	-
	239133.313	$13_1-12_1$	87.49	-2.931	54	-	0.76±0.07	-	-	-
	239137.917	$13_0-12_0$	80.34	-2.929	54	-	0.89±0.07	-	-	-
	257482.792	$14_3-13_3$	156.99	-2.852	116	-	0.58±0.05	-	-	-
	257507.562	$14_2-13_2$	121.28	-2.840	58	-	0.57±0.05	-	-	-
	257522.428	$14_1-13_1$	99.85	-2.833	58	-	0.65±0.04	-	-	-
	257527.384	$14_0-13_0$	92.7	-2.831	58	-	0.77±0.04	-	-	-
CH <sub>3</sub> OH	205791.270	$1_1-2_0A^+$	16.84	-4.473	3	0.56±0.02	1.55±0.02	0.29±0.02	0.30±0.02	0.07±0.01
	216945.521	$5_{-1}-4_{-2}E$	55.87	-4.916	11	0.29±0.02	0.97±0.03	0.12±0.02	0.18±0.02	0.03±0.01
	218440.063	$4_{-2}-3_{-1}E$	45.46	-4.329	9	2.86±0.03	7.11±0.04	1.51±0.04	1.38±0.03	0.36±0.05
	220078.561	$8_0-7_{-1}E$	96.61	-4.599	17	0.25±0.02	1.05±0.03	0.09±0.02	0.15±0.02	0.03±0.01
	239746.219	$5_1-4_1A^+$	49.06	-4.246	11	1.36±0.03	3.74±0.02	0.67±0.02	0.60±0.03	0.15±0.03
	241700.219	$5_0-4_0E$	47.93	-4.219	11	2.86±0.04	6.49±0.06	1.44±0.05	1.20±0.04	0.34±0.05
	241767.224	$5_{-1}-4_{-1}E$	40.39	-4.236	11	10.15±0.30	14.03±0.24	5.78±0.30	4.26±0.18	1.39±0.20
	241791.431	$5_0-4_0A^+$	34.82	-4.218	11	12.37±0.30	16.19±0.18	6.99±0.40	5.17±0.23	1.68±0.25
	241806.508	$5_4-4_4A^+A^-$	115.16	-4.662	11	-	0.23±0.03	-	-	-
	241813.257	$5_{-4}-4_{-4}E$	122.72	-4.662	11	-	0.10±0.03	-	-	-
	241829.646	$5_4-4_4E$	130.82	-4.660	11	-	-	-	-	-

(Продолжение)

Молекула	Частота, МГц	Переход	$E_{\text{up}}$ , К	$\lg A_{\text{ul}}$	$g_{\text{up}}$	$\int T_{\text{mb}} dV$ , К км с <sup>-1</sup>				
						S1	S2	S9	S10	S39
SO <sub>2</sub>	241832.910 <sup>a</sup>	5 <sub>3</sub> -4 <sub>3</sub> A <sup>+</sup>	84.61	-4.413	11	0.24±0.04	1.09±0.15	-	-	-
	241833.104 <sup>a</sup>	5 <sub>3</sub> -4 <sub>3</sub> A <sup>-</sup>	84.61	-4.413	11	0.24±0.04	1.09±0.15	-	-	-
	241842.324 <sup>b</sup>	5 <sub>2</sub> -4 <sub>2</sub> A <sup>-</sup>	72.53	-4.291	11	0.21±0.04	1.21±0.02	-	0.12±0.02	-
	241843.646 <sup>b</sup>	5 <sub>3</sub> -4 <sub>3</sub> E	82.53	-4.411	11	0.21±0.04	1.21±0.02	-	0.12±0.02	-
	241852.352	5 <sub>-3</sub> -4 <sub>-3</sub> E	97.53	-4.409	11	-	0.29±0.03	-	-	-
	241879.073	5 <sub>1</sub> -4 <sub>1</sub> E	55.87	-4.224	11	1.06±0.04	3.52±0.10	0.55±0.03	0.52±0.02	0.13±0.02
	241887.704	5 <sub>2</sub> -4 <sub>2</sub> A <sup>+</sup>	72.53	-4.290	11	0.19±0.03	0.88±0.07	-	-	-
	241904.147 <sup>c</sup>	5 <sub>-2</sub> -4 <sub>-2</sub> E	60.72	-4.293	11	1.53±0.03	4.53±0.12	0.76±0.05	0.73±0.02	0.18±0.03
	241904.645 <sup>c</sup>	5 <sub>2</sub> -4 <sub>2</sub> E	57.07	-4.298	11	1.53±0.03	4.53±0.12	0.76±0.05	0.73±0.02	0.18±0.03
	243915.788	5 <sub>1</sub> -4 <sub>1</sub> A <sup>+</sup>	49.66	-4.224	11	1.88±0.03	4.62±0.03	0.91±0.05	0.74±0.04	0.20±0.04
261805.675	2 <sub>-1</sub> -1 <sub>0</sub> E	28.01	-4.254	5	1.88±0.03	3.38±0.03	0.92±0.03	0.77±0.04	0.24±0.04	
SO <sub>2</sub>	221965.220	11 <sub>1,11</sub> -10 <sub>0,10</sub>	60.4	-3.943	23	261±2	848±6	-	159±2	240±1
	241615.797	5 <sub>2,4</sub> -4 <sub>1,3</sub>	23.6	-4.073	11	195±2	465±3	-	151±2	-
	244254.218	14 <sub>0,14</sub> -13 <sub>0,13</sub>	93.9	-3.785	29	157±1	584±4	-	-	-
OCS	206745.156	17-16	89.3	-4.592	35	389±4	1320±12	209±2	263±3	254±2
	218903.356	18-17	99.8	-4.517	37	270±3	1174±10	195±2	190±2	204±1
	243218.036	20-19	122.6	-4.517	41	206±2	960±9	-	-	-
HC <sub>3</sub> N	200135.392	22-21	110.5	-3.197	35	194±3	1631±13	440±3	353±4	204±1
	218324.723	24-23	131.0	-3.083	49	102±2	1260±10	-	222±2	196±1
	245606.320	27-26	165.0	-2.928	55	115±3	622±5	-	-	-

(Продолжение)

Молекула	Частота, МГц	Переход	$E_{\text{ур}},$ К	$\lg A_{\text{ul}}$	$g_{\text{ур}}$	$\int T_{\text{mb}} dV, \text{ K km s}^{-1}$				
						S1	S2	S9	S10	S39
H <sub>2</sub> CS	202924.054	6 <sub>1,6</sub> -5 <sub>1,5</sub>	47.3	-3.924	39	850±7	3128±38	362±4	731±6	401±6
	205987.858	6 <sub>0,6</sub> -5 <sub>0,5</sub>	34.6	-3.893	13	464±4	1871±23	217±3	416±4	229±4
	206052.602	6 <sub>3,4</sub> -5 <sub>3,3</sub>	153.1	-4.018	39	215±2	882±11	-	-	140±3
	206158.602	6 <sub>2,4</sub> -5 <sub>2,3</sub>	87.3	-3.943	13	-	359±5	-	-	-
	240266.872	7 <sub>0,7</sub> -6 <sub>0,6</sub>	46.1	-3.688	15	276±3	1460±18	-	-	253±4
	240382.051	7 <sub>2,6</sub> -6 <sub>2,5</sub>	60.0	-3.678	45	-	347±5	-	-	-
	240549.066	7 <sub>2,5</sub> -6 <sub>2,4</sub>	60.0	-3.678	45	-	325±5	-	-	-
	244048.504	7 <sub>1,6</sub> -6 <sub>1,5</sub>	98.8	-3.724	15	624±5	2426±30	-	302±3	-
	SO	206176.005	5 <sub>4</sub> -4 <sub>3</sub>	38.6	-3.996	9	1152±11	3809±99	497±6	1105±16
	215220.653	5 <sub>5</sub> -4 <sub>4</sub>	44.1	-3.924	11	3571±93	435±5	858±12	930±50	609±6
	219949.442	5 <sub>6</sub> -4 <sub>5</sub>	35.0	-3.873	13	3229±29	8325±214	1744±18	2796±39	2442±24
	258255.826	6 <sub>6</sub> -5 <sub>5</sub>	56.5	-3.996	13	744±7	3100±82	-	583±9	447±5
	261843.722	6 <sub>7</sub> -5 <sub>6</sub>	47.6	-3.642	15	1973±18	6033±156	855±9	1596±22	1340±13
SiO	86847.008 <sup>d</sup>	2-1	6.3	-4.534	5	3220±396	3941±426	1960±354	2961±401	2929±432
	217104.919	5-4	31.3	-3.284	11	2354±45	4429±59	1384±67	1610±66	1864±84
	260518.009	6-5	43.8	-3.040	13	1442±49	3534±78	792±91	829±74	971±72

<sup>a, b, c</sup> Блендированные линии, которые были аппроксимированы одной гауссианой. Линии CH<sub>3</sub>OH были аппроксимированы пакетом CLASS из программного обеспечения GILDAS (<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>) с помощью аппроксимации одной гауссианой с фиксированным значением  $FWHM = 5 \text{ km s}^{-1}$  для S1 и  $4 \text{ km s}^{-1}$  для остальных M3O. Кроме того, значения  $V_{\text{lsr}}$  совпадающие с максимумами излучения, были зафиксированы (-6.59, -7.14, -6.94, -6.80, -7.05  $\text{km s}^{-1}$  для S1, S2, S9, S10 и S39, соответственно).

<sup>d</sup> Данные из обзора MALT90 [29].

## 2.2 Метод определения лучевой концентрации водорода и температуры пыли

Для оценки лучевых концентраций ядер водорода  $N(\text{HI} + \text{H}_2)$  и температуры пыли  $T_{\text{dust}}$  использовались данные Hi-GAL [101] на длинах волн 70, 160, 250, 350 и 500 мкм, загруженные с SSDC веб-сайта<sup>3</sup>, а также данные ATLASGAL [102] на длине волны 870 мкм<sup>4</sup>.

Все данные об излучении пыли в дальнем ИК диапазоне были сглажены с разрешением карты Herschel SPIRE при 500 мкм и перестроены на изображение ATLASGAL. Затем в каждый пиксель вписывалась модель абсолютно черного тела для получения плотностей и температур пыли, в предположении, что наблюдаемая интенсивность задается уравнением

$$I_\lambda = B_\lambda(T)(1 - e^{-\tau_\lambda}) \approx B_\lambda(T)\tau_\lambda = B_\lambda(T)\Sigma\kappa_\lambda, \quad (2.7)$$

где  $B_\lambda(T)$  — функция Планка,  $\tau_\lambda$  — оптическая толщина,  $\Sigma$  — поверхностная плотность пыли,  $T$  — температура пыли и  $\kappa_\lambda$  — непрозрачность пыли. Было сделано общепринятое предположение о том, что

$$\kappa_\lambda = \kappa_0 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\beta, \quad (2.8)$$

где  $\kappa_0 = 7 \text{ см}^2\text{г}^{-1}$ ,  $\lambda_0 = 450 \text{ }\mu\text{м}$ ,  $\beta = 2.2$ , в соответствии с оценками, представленными [103]. Полученная поверхностная плотность была преобразована в лучевую концентрацию ядер водорода, предполагая расстояние до RCW 120 равным 1.34 кпк (расстояние до ионизирующей звезды [57]). Наконец,  $N_{\text{HI}+\text{H}_2} = 100\Sigma/(1.4 m_{\text{H}})$ , где 100 — предполагаемое отношение массы газа к массе пыли [104, 105]. Причем это значение используется в качестве предположительного отношения массы газа к массе пыли, которое может меняться в различных областях Н II из-за воздействия излучения (см., например, [106, 107, 108, 109]). В данном случае, поскольку объектом исследования являются молекулярные облака, для оценки лучевой концентрации водорода используется значение 100.

### 2.2.1 Результаты. Содержания молекул

Для расчёта содержаний молекул карта лучевой концентрации каждой молекулы делилась попиксельно на карту лучевой концентрации атомов водорода  $N_{\text{HI}+\text{H}_2}$  (показана на рис. 19), полученную из анализа дальнего ИК-излучения пыли. Таким образом были оценены относительные содержания молекул CCH, c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO, HDCO, H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>, DCO<sup>+</sup>, CH<sub>3</sub>OH, H<sup>13</sup>CN, CH<sub>3</sub>CN, DCN, CH<sub>3</sub>CCH, CS, H<sub>2</sub>CS, HC<sub>3</sub>N, OCS, SO, SO<sub>2</sub> в наблюдаемой области. Соответствующие карты

<sup>3</sup><https://tools.ssdc.asi.it/HiGAL.jsp>

<sup>4</sup>[https://atlasgal.mpifr-bonn.mpg.de/cgi-bin/ATLASGAL\\_DATABASE.cgi](https://atlasgal.mpifr-bonn.mpg.de/cgi-bin/ATLASGAL_DATABASE.cgi)

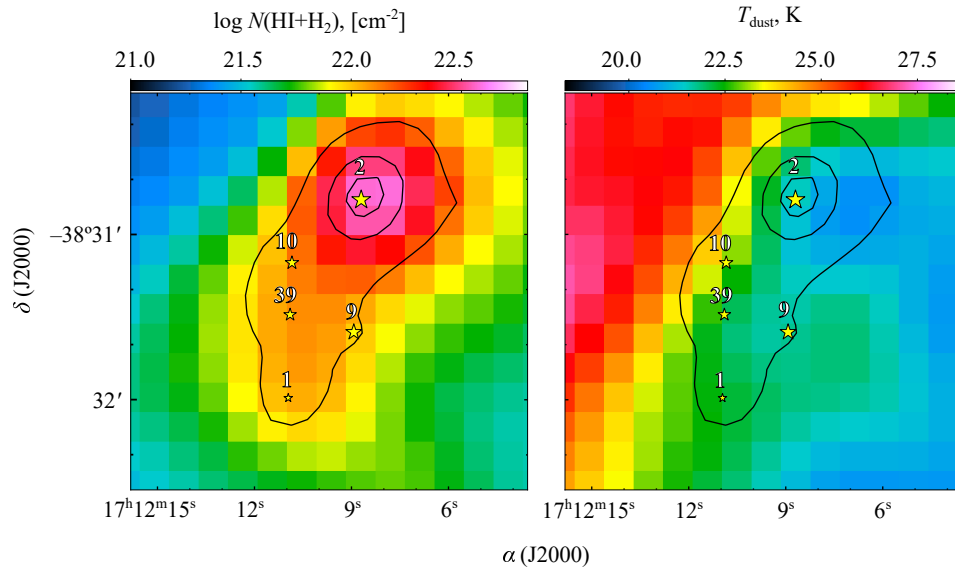


Рис. 19: Лучевая концентрация атомов водорода и температура пыли, полученные из анализа дальнего инфракрасного излучения пыли по данным Herschel и ATLASGAL.

показаны на рис. 20, 21, а значения содержаний для некоторых молекул в направлении МЗО приведены в табл. 3. Видно, что содержания серосодержащих молекул в МЗО S1 выше, чем в МЗО S2; максимальное превышение достигается для молекул SO и OCS — в 2 и 3 раза соответственно. Содержание  $\text{HC}_3\text{N}$ , напротив, в 2 раза выше в МЗО S2, чем в МЗО S1.

Содержания малоатомных углеводородов, в отличие от всех других наблюдаемых молекул, достигают максимальных значений за пределами плотного молекулярного сгустка. Видно, что область наивысшего содержания малоатомных углеводородов  $\text{CCH}$  и  $\text{c-C}_3\text{H}_2$  совпадает с пиком излучения пыли на длине волны 70 мкм, отмечающим положение ФДО RCW 120. В этой области содержания  $\text{CCH}$  и  $\text{c-C}_3\text{H}_2$  возрастают примерно до  $2.5 \times 10^{-8}$  и  $1.5 \times 10^{-10}$  соответственно.

Содержания таких молекул, как  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{HDCO}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{DCO}^+$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$ , достигают максимальных значений в направлении МЗО S1. Максимум  $\text{H}_2\text{CO}$ , около  $7.5 \times 10^{-9}$ , наблюдается к югу от МЗО S1. Аналогичное распределение показывает  $\text{HDCO}$ : максимум содержания около  $2 \times 10^{-10}$  также достигается к югу от МЗО S1. Для  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  отмечается постепенное увеличение содержания от МЗО S2 к югу с максимумом около  $0.8 \times 10^{-10}$  в направлении МЗО S1. Стоит отметить, что содержания  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ , умноженные на отношение  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ , могут рассматриваться только как нижняя граница содержания  $\text{HCO}^+$ , поскольку нет возможности учесть эффекты оптической толщи. Любопытно, что по мере удаления на юг от МЗО S1 содержание  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  увеличивается вдвое по сравнению со значением в МЗО S2. Содержание  $\text{DCO}^+$  относительно низкое, примерно  $1.2 \times 10^{-11}$ , вблизи МЗО S2, затем увеличивается почти вдвое в направлении МЗО S10 и S9 и достигает максимума около  $4.3 \times 10^{-11}$  к югу от МЗО S1. Распределение  $\text{CH}_3\text{OH}$

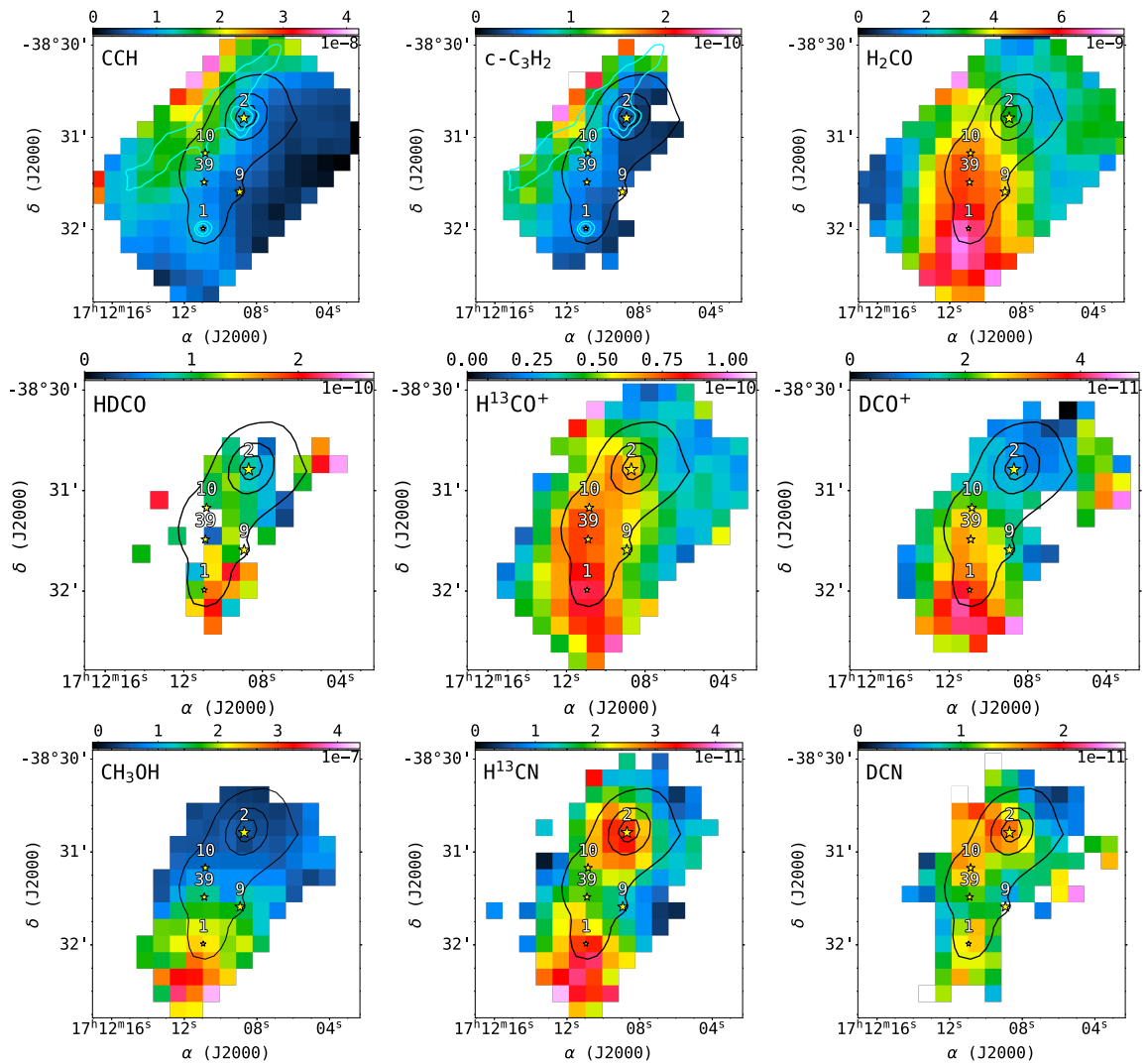


Рис. 20: Содержание молекул. Массивные молодые звёздные объекты (МЗО) обозначены желтыми звездами, размер маркера-звезды пропорционален массе МЗО. Чёрные контуры показывают излучение пыли на длине волны 870 мкм, уровни контуров составляют 2.0, 6.0, 10.0 Ян/луч. Синие контуры показывают излучение пыли на длине волны 70 мкм, уровни контуров составляют 0.47, 1.0 Ян/пиксель.

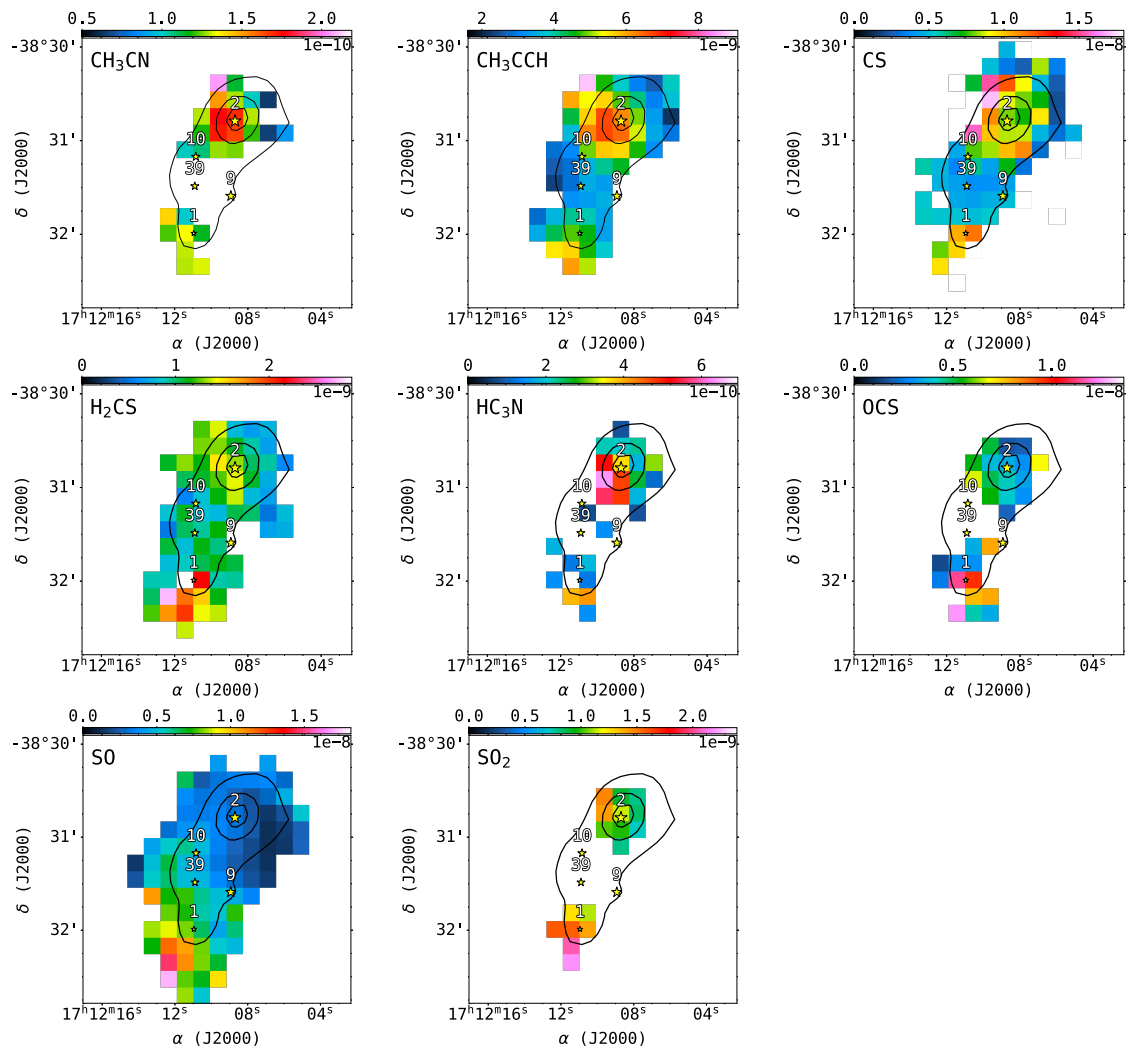


Рис. 21: Содержание молекул. Продолжение рис. 20

сходно с распределением  $\text{DCO}^+$ : низкие значения содержания наблюдаются вблизи МЗО S2, а затем отмечается постепенное увеличение по направлению к югу. Наибольшее значение, примерно  $4.1 \times 10^{-7}$ , достигается к югу от МЗО S1 и более чем в 6 раз превышает значение вблизи МЗО S2.

Содержания  $\text{CH}_3\text{CCH}$ , а также азотсодержащих молекул  $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{DCN}$  и  $\text{CH}_3\text{CN}$ , в отличие от всех остальных молекул, показывают два пика, связанные с МЗО S1 и S2. Максимальное содержание  $\text{H}^{13}\text{CN}$ , около  $1.5 \times 10^{-11}$ , наблюдается к югу от МЗО S1; второй максимум в направлении МЗО S2 ниже в 1.5 раза. Стоит отметить, что  $\text{H}^{13}\text{CN}$  может дать только нижнюю границу для основного изотополога  $\text{HCN}$  из-за неучтённого эффекта оптической толщи.  $\text{DCN}$  достигает наибольшего содержания около  $1.8 \times 10^{-11}$  вблизи МЗО S2 и показывает относительно постоянный уровень содержания к востоку от него; ещё один пик на том же уровне наблюдается вблизи МЗО S1. Для  $\text{CH}_3\text{CN}$  наивысшие значения  $1.8 \times 10^{-10}$  отмечены в направлении МЗО S2, а в направлении МЗО S1 содержание немного ниже —  $1.4 \times 10^{-10}$ ; по мере движения на юг от S1 содержание практически не меняется.  $\text{CH}_3\text{CCH}$  также достигает максимума  $6.5 \times 10^{-9}$  в направлении МЗО S2, а в направлении МЗО S1 его содержание примерно в 1.5 раза ниже. В отличие от  $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{DCN}$  и  $\text{CH}_3\text{CN}$ , по мере движения на юг содержание  $\text{CH}_3\text{CCH}$  увеличивается, в конечном итоге достигая значений, сопоставимых с наблюдаемыми в направлении МЗО S2.

Содержание  $\text{CS}$  составляет примерно  $0.5 \times 10^{-8}$  к западу от МЗО S2, немного увеличивается до  $1.1 \times 10^{-8}$  к югу и достигает значений около  $1.5 \times 10^{-8}$  к северо-востоку от МЗО S2. Вблизи МЗО S1 содержание  $\text{CS}$  составляет около  $1.0 \times 10^{-8}$  и остаётся практически постоянным к юго-западу. Важно отметить, что излучение между МЗО S1 и S2, по-видимому, оптически тонкое, и это не даёт возможности определить температуру возбуждения в этой области, поэтому использовалось среднее значение  $T_{\text{ex}} = 9$  К.

Среди всех отношений D/H, полученных в данной работе, отношение  $\text{HDCO}/\text{H}_2\text{CO}$  выделяется наибольшим содержанием дейтерия, лежащим в пределах 0.02–0.04. Отношение  $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$  даёт самое низкое содержание дейтерия, не превышающее 0.01: минимальное значение около 0.005 обнаружено вблизи МЗО S2, а максимальное — 0.01 — наблюдается к югу от МЗО S1. Для отношения  $\text{DCN}/\text{HCN}$  содержание дейтерия составляет около 0.005 на протяжении всего рассматриваемого молекулярного сгустка.

В завершение раздела о содержаниях молекул стоит отметить, что кислородсодержащие молекулы ( $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{HDCO}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{DCO}^+$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) достигают наибольших значений содержания к югу от МЗО S1. Молекулы, не содержащие кислорода ( $\text{DCN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и  $\text{CS}$ ), имеют основные пики содержания в районе МЗО S2 и вторичные максимумы в районе МЗО S1. Простые углеводороды ( $\text{CCH}$

Таблица 3: Температура пыли ( $T_{\text{dust}}$ ), вращательные температуры ( $T_{\text{rot}}$ ), лучевые концентрации ( $N_{\text{tot}}$ ) и содержания ( $X$ ) для  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{SO}$  в направлении на МЗО в RCW 120. Содержания молекул  $X$  представлены в виде отношения лучевых концентраций молекулы к лучевой концентрации ядер водорода  $N_{\text{HI}+\text{H}_2}$ .

Молекула	Параметр	МЗО 1	МЗО 2	МЗО 9	МЗО 10	МЗО 39
—	$T_{\text{dust}}$ , К	22.20	21.49	21.74	23.04	22.02
	$N_{\text{HI}+\text{H}_2}$ , $10^{22} \text{ cm}^{-2}$	1.11	3.71	0.98	1.42	1.26
$\text{CH}_3\text{CCH}$	$T_{\text{rot}}$ , К	$39 \pm 2$	$41 \pm 1$	$27 \pm 8$	$41 \pm 7$	$42 \pm 14$
	$N_{\text{tot}}$ , $10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$3.2 \pm 0.4$	$13 \pm 1$	$4.6 \pm 3.5$	$5.7 \pm 1.9$	$4.0 \pm 2.5$
	$X$ , $10^{-9}$	2.9	3.5	4.7	4.0	3.2
$\text{CH}_3\text{CN}$	$T_{\text{rot}}$ , К	$61 \pm 16$	$58 \pm 4$	—	$52 \pm 11$	—
	$N_{\text{tot}}$ , $10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$1.5 \pm 0.6$	$6.5 \pm 0.7$	—	$1.7 \pm 0.5$	—
	$X$ , $10^{-10}$	1.4	1.8	—	1.2	—
$\text{SiO}$	$T_{\text{rot}}$ , К	$14 \pm 1$	$19 \pm 3$	$12 \pm 1$	$11 \pm 1$	$12 \pm 1$
	$N_{\text{tot}}$ , $10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$5.1 \pm 1.3$	$6.9 \pm 2$	$3.6 \pm 0.7$	$5.1 \pm 1.1$	$5.3 \pm 0.7$
	$X$ , $10^{-11}$	4.6	1.9	3.7	3.6	4.2
$\text{SO}_2$	$T_{\text{rot}}$ , К	$30 \pm 5$	$51 \pm 5$	—	—	—
	$N_{\text{tot}}$ , $10^{13}$	$1.4 \pm 0.4$	$4.0 \pm 0.5$	—	—	—
	$X$ , $10^{-9}$	1.4	1.1	—	—	—
$\text{OCS}$	$T_{\text{rot}}$ , К	$36 \pm 7$	$52 \pm 3$	—	—	—
	$N_{\text{tot}}$ , $10^{13}$	$4.9 \pm 2.8$	$12 \pm 1$	—	—	—
	$X$ , $10^{-9}$	9.7	3.4	—	—	—
$\text{HC}_3\text{N}$	$T_{\text{rot}}$ , К	$41 \pm 23$	$34 \pm 2$	—	—	—
	$N_{\text{tot}}$ , $10^{12}$	$1.6 \pm 2.8$	$23 \pm 5$	—	—	—
	$X$ , $10^{-10}$	1.3	3.7	—	—	—
$\text{H}_2\text{CS}$	$T_{\text{rot}}$ , К	$23 \pm 8$	$33 \pm 6$	—	$15 \pm 4$	$32 \pm 20$
	$N_{\text{tot}}$ , $10^{13}$	$1.2 \pm 0.9$	$5.2 \pm 1.4$	—	$1.5 \pm 1.3$	$0.7 \pm 0.6$
	$X$ , $10^{-10}$	21.6	13.3	—	8.3	9.3
$\text{SO}$	$T_{\text{rot}}$ , К	$15 \pm 2$	$20 \pm 2$	$12 \pm 4$	$13 \pm 2$	$12 \pm 2$
	$N_{\text{tot}}$ , $10^{13}$	$4.8 \pm 2.4$	$10 \pm 2$	$3.2 \pm 3.9$	$4.9 \pm 2.0$	$4.5 \pm 2.9$
	$X$ , $10^{-9}$	6.4	3.1	4.6	5.0	4.9

и  $\text{c-C}_3\text{H}_2$ ) наиболее обильны у границы области фотодиссоциации (ФДО). Возможно, наблюдаемая химическая структура связана не только с температурой пыли и термической десорбцией, но и с другими процессами, такими как ударные волны и нетермическая десорбция.

### 2.2.2 Результаты. Корреляции лучевых концентраций молекул

Были проанализированы корреляции лучевых концентраций  $N$  различных молекул в наблюдаемой области и определены коэффициенты корреляции Пирсона  $r$  для каждой пары. Кроме того, проведён анализ корреляции величин  $N$  для наблюдавшихся молекул с лучевой концентрацией водорода  $N_{\text{HI}+\text{H}_2}$ . Результаты показаны на рис. 23.

В большинстве пар молекул наблюдается положительная линейная корреляция. Значения  $p > 0.95$  получены для пар  $\text{CH}_3\text{CCH}-\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}-\text{DCN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}-\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}-\text{SO}$ ,  $^{13}\text{CO}-\text{C}^{18}\text{O}$ ,  $\text{DCN}-\text{SO}$ ,  $\text{DCN}-\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CN}-\text{SO}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CN}-\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+-\text{H}_2\text{CO}$ . Высокие значения  $p$  для пар молекул свидетельствуют, что они образуются сходным образом — в газофазных реакциях либо на поверхности пыли. При этом корреляции в парах  $\text{DCN}-\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $^{13}\text{CO}-\text{C}^{18}\text{O}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+-\text{DCO}^+$ ,  $\text{CS}-\text{C}^{34}\text{S}$  ожидаемы, поскольку это пары изотопологов. Интересно отметить, что при коэффициенте корреляции 0.94 молекулы  $\text{CS}$  и  $\text{C}^{34}\text{S}$  попали в разные пространственные группы (см. Главу 1), хотя следует признать, что разделение молекул на группы довольно субъективно.

Обращает на себя внимание слабая корреляция лучевых концентраций метанола и изотопологов  $\text{CS}$  с лучевой концентрацией водорода. Это, возможно, указывает на то, что их эмиссия генерируется в локальных областях, протяжённость которых вдоль луча зрения мало зависит от общего количества вещества в данном направлении. Значения коэффициентов корреляции Пирсона также близки к нулю для пар  $\text{CH}_3\text{OH}-\text{CCH}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}-\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}-\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $^{13}\text{CO}-\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $^{13}\text{CO}-\text{CS}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}-\text{CS}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}-\text{CS}$ . Это может означать, что образование молекул в паре независимо. Отрицательные корреляции, наблюдаемые для некоторых пар, формально указывают на то, что образование одной молекулы сопровождается разрушением другой или, в более широком смысле, физические условия, благоприятные для формирования одной из молекул, неблагоприятны для формирования другой.

Однако реальная ситуация несколько сложнее. Для более подробного исследования корреляций и выяснения, в каких именно участках наблюдавшейся области корреляция лучевых концентраций молекул наиболее сильна, проводилось попиксельное сравнение карт и построены графики зависимостей лучевых концентраций  $N$  для различных пар молекул. Избранные графики представлены на рис. 22. Каждый пиксель на графиках окрашен в соответствии с цветовой шкалой от красного к синему, которая показывает расстояние от склонения  $\delta = -38^\circ 31' 11''$ . Синие пиксели соответствуют северной части карты, в которой расположен МЗО S2, красные — южной, содержащей МЗО S1. Чем насыщеннее оттенок красного или синего, тем южнее или севернее находится пиксель. Отметим, что при выбранном разделении на северную и южную части в северной оказывается только МЗО S2, а все остальные МЗО — в южной.

На верхних панелях рис. 22 показаны пары молекул с  $p \geq 0.75$ . Пиксели южной и северной частей карт укладываются в общую корреляцию: южная часть даёт вклад в нижнюю область графика, северная — в верхнюю. К таким парам относятся, например,  $\text{CH}_3\text{CN}-\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{CCH}-\text{c}-\text{C}_3\text{H}_2$ ,  $\text{CCH}-\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{SO}-\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{SO}-\text{OCS}$ . На средних панелях показаны пары молекул, у которых коэффициент корреляции Пирсона близок к нулю. Из графиков следует, что в ряде случаев наблюдается не

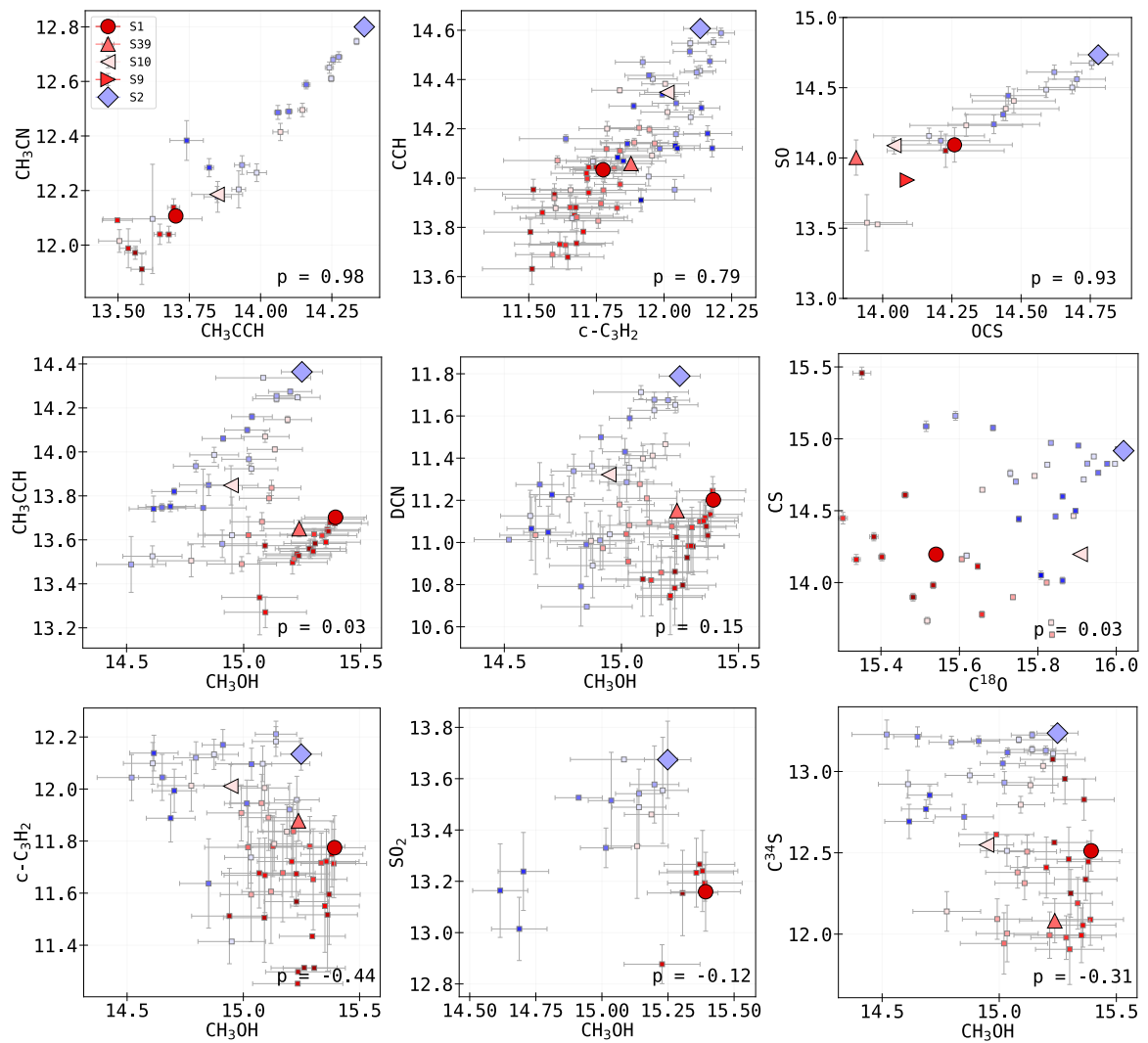


Рис. 22: Попиксельное сравнение лучевых концентраций молекул. Чем насыщеннее оттенок красного или синего, тем южнее или севернее находится пиксель. Пиксели, соответствующие пяти МЗО, отмечены маркерами на легенде. В правом нижнем углу каждой панели указан коэффициент корреляции Пирсона  $p$ .



значение  $p$ , распределения интенсивностей этих молекул по картам существенно различаются. Иными словами, значительная корреляция лучевых концентраций не обязательно означает сходство пространственного распределения яркости излучения, но может указывать на сходство путей образования молекул в наблюдаемых областях, что обсуждается ниже.

## 2.3 Моделирование содержаний молекул с помощью программного комплекса Presta

Астрохимическое моделирование содержаний молекул выполнялось с помощью программного комплекса Presta [110], разработанного в Институте астрономии РАН [111, 112]. Presta — одномерная модель, предназначенная для расчёта химической эволюции объектов, находящихся на различных стадиях формирования протозвёзд. Комплекс позволяет рассчитывать химическую эволюцию как в двухфазном (газовая фаза + поверхность пылинок), так и в трёхфазном режиме с учётом химии в толще ледяных мантий [113], а также производить расчёт в концентрических слоях с различными заданными параметрами плотности, температуры пыли и газа на разных расстояниях от центрального источника. В настоящей работе использовался двухфазный режим и рассматривалась только центральная область. Набор компонентов и реакций основан на химической сетке ALCHEMIC [114] с существенными дополнениями, частично описанными в [115]. Начальные содержания химических компонентов приведены в табл. 4. В модели Presta учитывается широкий набор физико-химических процессов, включая двухчастичные реакции и реакции с космическими лучами, в том числе инициированные вторичным излучением, возникающим под действием космических лучей. Скорости химических реакций рассчитываются на основе астрохимической базы данных UMIST [116]. При моделировании учитывается квантовое туннелирование реагентов через энергетические барьеры. Продукты поверхностных реакций не остаются в мантии, а непосредственно высвобождаются в газовую фазу за счёт реактивной десорбции, которая в настоящей работе принималась на уровне 5%. Помимо реактивной десорбции, в модель включены механизмы тепловой десорбции, фотодесорбции и десорбции космическими лучами [110].

Химическая эволюция моделировалась на интервале до  $10^6$  лет при фиксированных физических условиях в каждом расчёте. Значения начальных содержаний приведены в табл. 4. Скорость ионизации космическими лучами принималась равной  $\zeta_{\text{CR}} = 1.3 \times 10^{-17} \text{ с}^{-1}$ . Проведено несколько расчётов с варьированием концентрации ядер водорода  $n_{\text{H}}$  в модельном облаке от  $10^3$  до  $10^5 \text{ см}^{-3}$ , температуры газа  $T_{\text{gas}}$  — от 10 до 100 К с шагом 10 К и оптического поглощения  $A_V$  — от 3 до  $10^6$  звёздных величин.

Таблица 4: Начальные содержания химических компонентов относительно числа ядер водорода в модели Presta. Формат записи  $a(b)$  означает  $a \cdot 10^b$ .

Компонент	Начальное содержание
H <sub>2</sub>	4.99995(-1)
H	1.0(-5)
He	9.0(-2)
C	7.3(-5)
Cl	1.0(-9)
N	2.14(-5)
O	1.76(-4)
S	8.0(-8)
Si	8.0(-9)
Fe	3.0(-9)
Mg	7.0(-9)
Na	2.0(-9)
P	2.0(-10)

## 2.4 Результаты моделирования

Для выявления возможных причин повышенного содержания метанола в южной части облака было проведено моделирование исследуемого объекта с помощью астрохимической модели Presta. При варьировании модельных параметров в пределах, указанных в разделе 2.3, обнаружено, что наблюдаемые в объекте типичные содержания молекул CH<sub>3</sub>CCH, CH<sub>3</sub>CN и CH<sub>3</sub>OH в пределах порядка величины лучше всего соответствуют модельному времени  $t_{\text{model}} = 10^5$  лет при концентрации водорода  $n_{\text{H}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$  и оптическом поглощении  $A_V \sim 3\text{--}5$  звёздных величин. На рис. 24 представлены модельные содержания пар молекул CCH–с-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> (левая панель) и CH<sub>3</sub>CCH–CH<sub>3</sub>OH (правая панель) при различных значениях температуры газа и оптического поглощения  $A_V = 3^{\text{m}}, 4^{\text{m}}, 5^{\text{m}}$ .

На рис. 24 видно чёткое различие между последовательностями содержаний CH<sub>3</sub>CCH и CH<sub>3</sub>OH для  $A_V = 3^{\text{m}}, 4^{\text{m}}$  и  $5^{\text{m}}$ . Представленные последовательности согласуются с наблюдаемым разделением на две ветви на рис. 22, где при сопоставимых содержаниях CH<sub>3</sub>CCH содержание метанола в южной части облака превышает его содержание в северной части вплоть до порядка величины. Такая теоретическая закономерность может быть связана с тем, что молекула CH<sub>3</sub>CCH образуется в газовой фазе, а молекула CH<sub>3</sub>OH — на поверхности пыли. В среде с  $A_V \lesssim 4^{\text{m}}$  фотодесорбция становится более эффективной, чем при больших значениях экстинкции, и содержание метанола в газовой фазе повышается. Дальнейшее понижение экстинкции до  $A_V \sim 2^{\text{m}}$  приводит к тому, что метанол после десорбции эффективно разрушается вследствие фотодиссоциации, и его газофазное содержание снижается. Таким образом, вероятной причиной повышенного содержания метанола в южной части молекулярного облака является фотодесорбция, связанная с несколько меньшим средним значением  $A_V$ . Из распределения  $N_{\text{H}+\text{H}_2}$

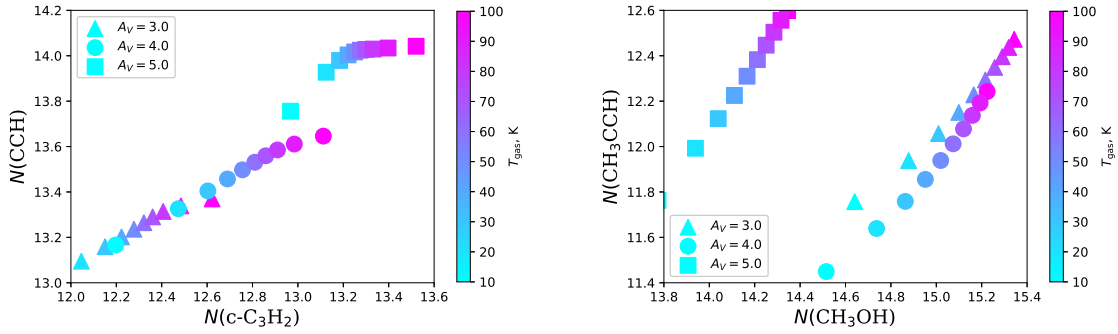


Рис. 24: Результаты моделирования для наилучшей модели и момента времени  $10^5$  лет. Модельные расчёты представлены треугольниками для модели с  $A_V = 3^m$ , кругами для  $A_V = 4^m$ , квадратами для  $A_V = 5^m$ . Цветовая шкала маркеров соответствует различным значениям  $T_{\text{gas}}$ .

в окрестности МЗО S1 и S2 (см. работу [117]) видно, что разница между лучевыми концентрациями водорода в этих объектах превышает  $1.81 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$  (что эквивалентно  $A_V = 1^m$ ), поэтому предположение о меньшем значении  $A_V$  вблизи МЗО S1 оправдано. Фотодиссоциация затрагивает также и молекулы, подобные  $\text{CH}_3\text{CCH}$ , однако их содержание в значительной степени восстанавливается газофазными реакциями.

## 2.5 Обсуждение

### 2.5.1 Признаки наличия горячего газа в МЗО

Несмотря на практически одинаковую температуру пыли во всех МЗО,  $T_{\text{dust}} \approx 21\text{--}23 \text{ K}$ , в плотном молекулярном сгустке существует отчётливая химическая дифференциация. Очевидно, эти различия не вызваны испарением вещества мантий с поверхности пыли: молекулы  $\text{CO}$ , наблюдаемые в газовой фазе на уровне около  $10^{-4}$ , испаряются с пыли уже при температурах ниже  $20 \text{ K}$  (при плотностях, характерных для рассматриваемых МЗО; см. [118]).

Сравнение температур возбуждения  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и  $\text{CH}_3\text{CN}$  позволяет предположить, что метанол присутствует в более холодной и более обширной области вокруг МЗО, чем  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и  $\text{CH}_3\text{CN}$ , а возбуждение  $\text{CH}_3\text{CN}$  происходит в более тёплых и плотных областях по сравнению с  $\text{CH}_3\text{CCH}$ .  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{CH}_3\text{CCH}$  также имеют повышенное содержание в области высокой плотности вокруг МЗО S2. Таким образом, можно говорить о слоистой химико-физической структуре вокруг МЗО S1 и S2, напоминающей строение луковицы: последовательное появление  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и  $\text{CH}_3\text{CN}$  в газовой фазе при движении к МЗО означает переход к более тёплому газу.

Полученные результаты свидетельствуют, что наблюдаемые молекулы образуются при различных условиях и, соответственно, трассируют различные этапы процесса звездообразования. Возникает вопрос, насколько полученные содержания могут указывать на наличие в исследованных МЗО газа, нагретого прото-звёздами.

Чтобы оценить эту возможность, содержания молекул в направлении МЗО, полученные в данной работе, были сопоставлены с результатами химико-динамического моделирования коллапса протозвезды. Сопоставление пространственного масштаба модельного коллапсирующего облака и наблюдательных карт на рис. 20 и 21 показывает, что вся расчётная область модели попадает в один пиксель карт. Модель позволяет проследить момент формирования протозвезды, который приводит к нагреву газа и пыли в её непосредственных окрестностях. Нагрев сопровождается повышением содержаний молекул вблизи внутренней границы расчётной области. Однако область прогрета невелика, 100–200 а.е. от протозвезды. Таким образом, полученные содержания отражают содержание молекул в оболочке МЗО S2 размером до 40000 а.е., не отражая повышения содержаний молекул в ближайших окрестностях протозвезды.

Признаком наличия горячего газа в направлении МЗО S2, а также, по-видимому, в направлении МЗО S1 и S39 служит линия  $\text{H}_2\text{CS}$  ( $6_{3,4}-5_{3,3}$ ) с энергией верхнего уровня  $E_u = 153.1$  К, наблюдаемая интенсивность которой не согласуется с вращательными диаграммами при  $T_{\text{rot}} \approx 20-30$  К, полученными по линиям с более низкими уровнями энергии, и на несколько порядков величины превышает значение, ожидаемое из этих диаграмм.

Анализ возбуждения таких сложных органических молекул, как  $\text{CH}_3\text{CCN}$  и  $\text{CH}_3\text{CN}$ , по излучению их линий показывает, что  $T_{\text{rot}}$  превышает  $T_{\text{dust}}$ . Анализ излучения метанола также указывает на то, что возбуждение линий может происходить при кинетических температурах  $T_{\text{kin}} \geq T_{\text{dust}}$ . Следовательно, возбуждение этих сложных органических молекул происходит не в холодной среде, наблюдаемой в дальнем инфракрасном диапазоне с помощью *Herschel* [101], а в более тёплых и компактных областях вокруг МЗО. Авторы работы [64] с помощью интерферометра ALMA выделили в направлении МЗО S2 пять фрагментов, что подтверждает существование там более компактных компонентов. Полученные в настоящей работе значения  $T_{\text{rot}}$  для  $\text{CH}_3\text{CN}$  в МЗО S2 согласуются с ранее найденными в [20], где использовалась только серия линий  $J_K = 12_K-11_K$ . Авторы работы [20] также предположили существование горячего газа по крайней мере вокруг S2 и заключили, что линии  $\text{CH}_3\text{CN}$  появляются благодаря наличию на луче зрения не только протяжённого молекулярного облака, но и компактного горячего ядра на ранней стадии формирования. Обнаружение относительно яркой линии  $\text{H}_2\text{CS}$  ( $6_{3,4}-5_{3,3}$ ) согласуется с этими результатами. Впервые о наличии компактного излучения в

линиях молекулы  $\text{CH}_3\text{CN}$  в МЗО S2 сообщалось в работе [64], хотя её авторы не проводили анализа физических условий в молекулярном газе.

С наличием компактного горячего ядра в МЗО S2 связано и обнаружение линии метилформиата  $\text{HCOOCH}_3$  ( $20_{0,20}$ – $19_{0,19}$ ), см. табл. 1 в Главе 1. Как показано в работе [119], метилформиат образуется на поверхности пыли ещё на стадии тёмного облака, а в газовой фазе появляется при формировании протозвезды на стадии горячего ядра. Эта линия обнаружена только в МЗО S2 благодаря нагреву пыли в компактном источнике, отсутствующем в направлении других МЗО.

## 2.5.2 Особенности разрушения мантий пылинок вблизи МЗО

Южная и северная части облака имеют различные молекулярные содержания: азотсодержащие молекулы ( $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{DCN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ) обильнее в северной части, тогда как кислородсодержащие ( $\text{DCO}^+$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) сильнее концентрированы в южной. Малоатомные углеводороды ( $\text{CCH}$  и  $\text{c-C}_3\text{H}_2$ ) концентрируются в направлении ФДО. Этот эффект может быть объяснён газофазным образованием  $\text{c-C}_3\text{H}_2$ , который, как считается, формируется из  $\text{CH}_4$  в химических реакциях, происходящих при нагреве окружающей среды протозвёздами и приводящих к образованию молекул с углеродными цепочками (механизм WCCC, см., например, [120, 121]). УФ-излучение вызывает диссоциацию молекул  $\text{CO}$ , что приводит к образованию атомов углерода и тем самым способствует увеличению их содержания.

Ранее было высказано предположение, что повышенное содержание метанола в южной части объекта может быть связано с более эффективной фотодесорбцией. Другие виды десорбции этому различию объяснения не дают. Скорость тепловой десорбции, зависящая от температуры пыли  $T_{\text{dust}}$ , в МЗО S1 и S2 должна быть сравнима, так как температура пыли в этих объектах совпадает в пределах 1 К [117]; более того, в обоих МЗО  $T_{\text{dust}}$  существенно меньше температуры сублимации метанола, которая составляет около 80 К (см. [115]). Скорость десорбции космическими лучами также должна быть одинакова, поскольку оба МЗО лежат в пределах одного молекулярного сгустка на границе области II размером  $\sim 1$  пк. Важным фактором, не учтённым в представленном моделировании, являются ударные волны и высокоскоростные истечения, сопровождающие рождение звёзд [122, 123, 124]. На наличие истечений в окрестности МЗО S1 указывают широкие крылья линий метанола [20, 117] и обнаружение мазерного излучения метанола I класса [125], которое образуется в областях, охваченных истечениями [126]. В модели Presta ударные волны не моделируются явно, однако их действие фактически сводится к появлению дополнительного механизма десорбции. При включении такого механизма в модель на качественном уровне можно бы-

ло бы получить результат, сходный с представленным на рис. 24. Следовательно, нельзя исключить вклад разрушения мантий пылинок при столкновениях в повышение содержания метанола в газовой фазе.

Авторы работы [127] на основе результатов астрохимического моделирования и наблюдений областей образования звёзд показали, что структура ледяных мантий пылинок неоднородна: толща льда, в которой преобладает вода, покрыта слоем, богатым такими молекулами, как CO, CO<sub>2</sub> и метанол. При этом «водяной» слой образуется раньше «CO»-слоя, поскольку последний формируется на поздней стадии плотного холодного молекулярного облака, когда CO начинает вымораживаться из газа на пыль. Образование обильного метанола в верхней части мантии связано с последовательным гидрированием CO в реакциях с атомарным водородом [81, 82, 83]. Авторы работы [128] на основе анализа наблюдений линий молекул CO<sub>2</sub>, OCS и метанола в направлении массивных протозвёзд показали, что SO, CO<sub>2</sub> и OCS образуются раньше метанола, на той стадии развития молекулярного облака, когда лёд преимущественно «водяной». Образование же метанола на пылинках происходит позже и преимущественно в верхнем «CO»-слое.

Полученные в настоящей работе результаты согласуются с представлением о наличии «водяного» и «CO»-слоёв в мантиях пылинок. На рис. 22 в левой колонке видна высокая ( $p = 0.93$ ) корреляция между концентрациями SO и OCS. Южная часть облака не выделяется повышенным содержанием какой-либо из этих молекул. Напротив, корреляция между метанолом и SO<sub>2</sub> отсутствует ( $p = -0.12$ , см. рис. 23), хотя обе молекулы образуются на пылинках. Корреляция между OCS и метанолом положительная, но слабая ( $p = 0.33$ ). Это можно объяснить тем, что в первую очередь разрушаются внешние слои мантии, богатые метанолом, что согласуется с трёхфазными астрохимическими моделями, в которых химические реакции протекают преимущественно в приповерхностных слоях [113].

Таким образом, к повышенному содержанию метанола в газовой фазе в южной части облака приводит разрушение верхних слоёв пылевых мантий за счёт фотодесорбции или, возможно, ударных волн. Этот процесс в меньшей степени затрагивает содержание молекул, образующихся в газовой фазе, например CH<sub>3</sub>CCH, CH<sub>3</sub>CN и др. Именно этим объясняются вилкообразные распределения на диаграммах корреляций (рис. 22).

## 2.6 Резюме Главы 2

Физические условия были изучены в предположении ЛТР с использованием ряда переходов CH<sub>3</sub>CN, CH<sub>3</sub>CCH, CH<sub>3</sub>OH, SiO, SO<sub>2</sub>, OCS, HC<sub>3</sub>N, H<sub>2</sub>CS и SO. По данным CH<sub>3</sub>CCH обнаружено, что вращательная температура для МЗО S1, S2 и S10 составляет около 40 К. Анализ CH<sub>3</sub>CN показывает более высокие значения вращательных температур в направлении МЗО S1, S2 и S10 — до 61 К. МЗО S2 ока-

зывается самой плотной областью. По убыванию вращательных температур молекулы выстраиваются в последовательность  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{SiO}$ , образуя структуру, напоминающую луковицу.

Наибольшая доля дейтерированных молекул с пиковым значением около 3% была получена для пары  $\text{HDCO}/\text{H}_2\text{CO}$  в МЗО S2, что подчёркивает влияние известного кинетического изотопного эффекта. Самая низкая доля дейтерированных молекул, ниже 0.5%, выявлена для пары  $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$  в МЗО S2.

Повышенное содержание простых углеводов в направлении ФДО — единственное проявление воздействия массивной звезды на молекулярные содержания в плотном сгустке. Локальные явления, такие как ударные волны и истечения, изменяют молекулярный состав в двух частях сгустка, связанных с МЗО S1 и S2.

Обнаружено, что в южной части плотного сгустка содержание метанола превышает содержание в северной при сравнимых содержаниях других органических молекул, таких как  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{CH}_3\text{CCH}$ . Кроме того, содержание метанола повышено и относительно других кислородсодержащих молекул, например  $\text{SO}$  и  $\text{OCS}$ .

Для интерпретации результатов наблюдений была использована астрохимическая модель Presta. Модель качественно воспроизводит наблюдаемое соотношение содержаний  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$  и показывает, что возможным механизмом, ответственным за повышенное содержание метанола в газовой фазе, является фотодесорбция из мантий пылинок. При понижении величины поглощения  $A_V$  с  $5^m$  до  $3^m$  десорбция метанола ускоряется, причём молекулы, попадая в газ, не разрушаются УФ-излучением, в отличие от ситуации при  $A_V \sim 2^m$ , когда диссоциация становится эффективной.

Сильная линейная корреляция между лучевыми концентрациями указывает, что молекулы образуются в одной фазе — либо в газе, либо на пыли. Корреляция отсутствует, если молекулы образуются в разных фазах: одна в газе, другая в пылевых мантиях, например  $\text{CCH}$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Слабая корреляция между метанолом и другими кислородсодержащими молекулами ( $\text{SO}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{SO}_2$ ), которые также образуются на пыли, свидетельствует, что в южной части облака разрушается только верхняя часть мантий пылевых частиц, богатая «CO»-льдом.

Результаты настоящей главы представлены в работах А 1 и А 2.

## Глава 3

# Классификация молекулярных облаков с помощью методов машинного обучения

Методы машинного обучения стали одним из ключевых инструментов анализа астрономических данных: они позволяют обрабатывать большие объёмы информации и находить неочевидные связи между параметрами наблюдений [129, 130]. Так, в работе [131] с помощью методов машинного обучения построены детальные карты областей звездообразования в пределах 1,5 кпк от Солнца на основе объединения астрометрических и фотометрических данных. Отдельное направление — улучшение качества изображений: в работе [132] для восстановления детализации размытых изображений галактик использована генеративно-сопоставительная сеть (GAN), что позволило выделить ранее неразличимые области активного звездообразования. Машинное обучение применяется и к задачам, связанным непосредственно с физикой звездообразования. В работе [133] алгоритмы машинного обучения были применены к миллиметровым спектрам массивных молодых звёздных объектов и позволили выделить общие спектральные характеристики, связанные с физическими условиями в областях звездообразования.

Вместе с тем применение методов машинного обучения в астрофизике имеет ряд ограничений. Сложные модели часто работают как «чёрный ящик»: они дают высокую точность предсказаний, но не позволяют напрямую проследить, какие именно физические закономерности лежат в основе полученного результата. Это затрудняет интерпретацию выводов с точки зрения физических процессов и, в ряде случаев, ограничивает возможность обобщения результатов на объекты, отсутствовавшие в обучающей выборке. Кроме того, качество работы алгоритмов существенно зависит от полноты и репрезентативности исходных данных: систематические отборы и наблюдательные эффекты могут приводить к смещениям в предсказаниях. По этим причинам методы машинного обучения не заменяют традиционные подходы, основанные на физическом моделировании и детальном анализе излучения, а служат их дополнением — инструментом для предварительной

классификации, поиска закономерностей и выделения объектов, заслуживающих дальнейшего углублённого изучения.

В этой главе исследуется возможность применения методов машинного обучения для автоматического выявления и классификации молекулярных облаков на разных стадиях эволюции. Используются данные в миллиметровом и инфракрасном диапазонах; рассматриваются два подхода — обучение без учителя и с учителем. Алгоритмы кластеризации (обучение без учителя) позволяют выделять группы объектов непосредственно по их характеристикам, без априорной информации о типах. Алгоритмы классификации, обученные на выборках объектов с известными свойствами, позволяют предсказывать стадию эволюции молекулярного облака.

### 3.1 Данные каталогов

Данные об излучении в молекулярных линиях и о плотности потока на длине волны 870 мкм были получены из обзора MALT90 [28], охватывающего область галактической плоскости ( $0^\circ < l < 20^\circ$ ,  $248^\circ < l < 360^\circ$  и  $|b| < 1.4^\circ$ ) в окрестности 90 ГГц. Фотометрические данные в инфракрасном диапазоне на длинах волн 3.6, 4.5 и 24 мкм получены из архива Spitzer Heritage<sup>1</sup>. Для анализа также использовались сведения о мазерах  $\text{CH}_3\text{OH}$  второго класса в радиусе  $5''$  от источников из базы данных maser.db [31] и значения температуры пыли, рассчитанные в работе [134]. Краткая сводка о полноте данных приведена в табл. 5 и на рис. 25.

Анализ данных проводился с использованием библиотеки машинного обучения Scikit-learn для Python [135].

---

<sup>1</sup>[https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/?\\_\\_action=layout.showDropDown&](https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/?__action=layout.showDropDown&)

Таблица 5: Полнота признаков из каталога MALT90, данных *Spitzer* и мазеров  $\text{CH}_3\text{OH}$  второго класса.

Признак	Количество	Доля (%)
Поток на 870 мкм	3556	100.0
8.0 мкм	3542	99.61
3.6 мкм	3535	99.41
4.5 мкм	3209	90.24
24 мкм	3208	90.21
$\text{HCO}^+$	3125	87.88
$\text{HNC}$	2993	84.17
$\text{HCN}$	2678	75.31
$\text{N}_2\text{H}^+$	2543	71.51
$\text{C}_2\text{H}$	1673	47.05
$\text{H}^{13}\text{CO}^+$	915	25.73
$\text{HC}_3\text{N}$	798	22.44
$\text{HN}^{13}\text{C}$	547	15.38
Мазер $\text{CH}_3\text{OH}$	505	14.2
$\text{SiO}$	341	9.59
$\text{HNCO}_{404}$	296	8.32
$^{13}\text{CS}$	171	4.81
$\text{CH}_3\text{CN}$	103	2.9
$\text{H}41_a$	22	0.62
$\text{HC}^{13}\text{CCN}$	10	0.28
$^{13}\text{C}^{34}\text{S}$	9	0.25

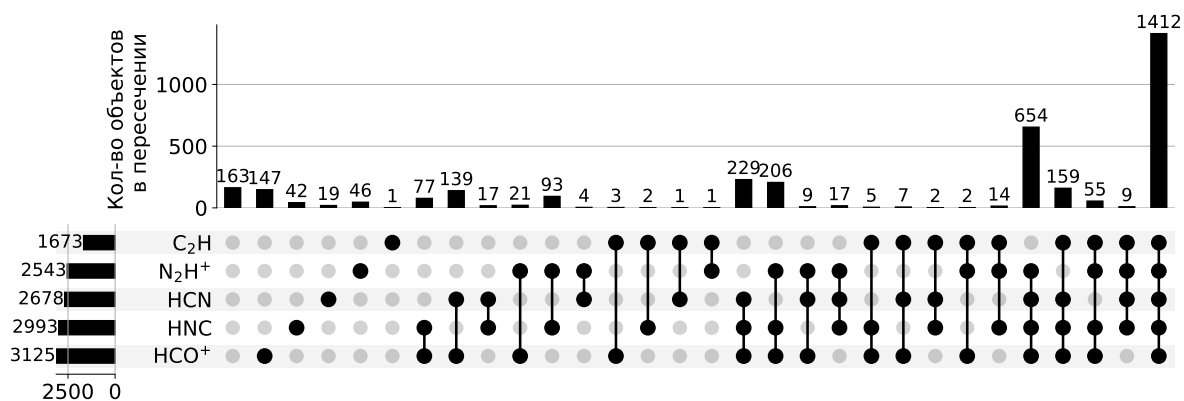


Рис. 25: Полнота обнаружения пяти наиболее распространённых молекулярных линий в каталоге MALT90. Каждая строка соответствует отдельной молекулярной линии, каждый столбец — определённой комбинации обнаруженных молекул. Серые точки обозначают отсутствие детектирования, чёрные — зарегистрированные линии. Объединённые чёрные точки внутри столбца указывают на совместное обнаружение соответствующих молекул. Горизонтальные столбцы слева показывают число источников, в которых зарегистрирована каждая молекула; вертикальные столбцы сверху отражают число источников для каждой конкретной комбинации молекул (размер пересечения).

## 3.2 Предварительная обработка данных

В исходном наборе данных каждому сгустку соответствует одна из нескольких категорий, основанных на инфракрасных характеристиках: Q — тёмные ИК-области, A — протозвёздные, C — компактные области II, H — протяжённые области II, P — области фотодиссоциации, U — объекты с неопределённой классификацией. Эта схема классификации основана исключительно на инфракрасном излучении.

Обзор MALT90 содержит 269 параметров для 3556 источников. В рамках настоящего анализа рассматривались интегральные интенсивности 16 молекулярных линий и плотность потока на длине волны 870 мкм. Хотя инфракрасная классификация молекулярных облаков не использовалась на этапе кластеризации, она привлекалась на последующих этапах — для анализа состава кластеров и для обучения алгоритмов, применяемых для идентификации объектов неопределённой классификации (U). Следует отметить, что не все линии излучения были обнаружены в молекулярных облаках. На первом этапе кластеризации не учитывались параметры, для которых излучение было зарегистрировано менее чем у 40% источников. В результате были отобраны интегральные интенсивности пяти молекулярных линий ( $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{HCN}$  и  $\text{C}_2\text{H}$ ) и плотность потока на длине волны 870 мкм. На втором этапе кластеризации и при решении задачи классификации использовались все доступные значения интегральных интенсивностей молекул из каталога MALT90, к которым были добавлены ИК-потоки *Spitzer* и индикаторы наличия мазеров метанола.



Рис. 26: Схема предварительной обработки данных

Для подготовки данных к кластеризации применялся метод *QuantileTransformer*, стандартизирующий признаки. Для каждого значения признака *QuantileTransformer* определяет его квантиль — долю данных, которые меньше или равны этому значению, — после чего квантиль преобразуется в число из нового распределения (в настоящей работе использовалось нормальное распределение). В ре-

зультате все признаки приобретают одинаковую форму распределения, становятся сравнимыми по масштабу и менее чувствительны к выбросам. Далее для снижения размерности данных использовался метод стохастического вложения соседей с  $t$ -распределением (см. раздел 3.3.2), преобразующий многомерные данные в двумерное пространство. Схема основных шагов предварительной обработки данных представлена на рис. 26.

### 3.3 Методы машинного обучения

Кластеризация — мощный метод выявления закономерностей в многомерных данных, позволяющий выделять значимые подгруппы без предварительной разметки. Однако при работе с большим количеством признаков нерелевантная или избыточная информация может исказить структуру кластеризации и затруднять её интерпретацию. Кроме того, не все признаки вносят одинаковый вклад в формирование отдельных подгрупп, а некоторые приносят шум вместо полезной информации. Для решения этих задач перед кластеризацией часто применяются методы снижения размерности.

#### 3.3.1 Метод главных компонент

Метод главных компонент (principal component analysis, PCA) [136, 137] — один из наиболее популярных методов снижения размерности. Он преобразует исходные данные в новый набор переменных, называемых главными компонентами, которые представляют собой линейные комбинации исходных признаков и ранжируются по величине объясняемой дисперсии: первая главная компонента соответствует наибольшей дисперсии, вторая — следующей по величине, и так далее. Сокращение набора данных до меньшего числа компонент помогает устранить шум и избыточность, упрощая выявление значимых кластеров и снижая вычислительную сложность алгоритмов кластеризации.

Вместе с тем PCA имеет существенное ограничение: метод предполагает, что структура данных описывается линейными комбинациями признаков. При наличии в данных нелинейных связей PCA может не учесть их, что приводит к потере важной информации при кластеризации. Для данных каталога MALT90 применение PCA систематически давало худший результат кластеризации по сравнению с методом стохастического вложения соседей с  $t$ -распределением, поэтому от него пришлось отказаться.

### 3.3.2 Метод стохастических вложений соседей с $t$ -распределением (t-SNE)

Другим методом снижения размерности является стохастическое вложение соседей с  $t$ -распределением (t-distributed stochastic neighbor embedding, t-SNE) [138]. Это нелинейный метод, разработанный для сохранения локальных взаимосвязей между точками данных. t-SNE преобразует попарные расстояния между точками в условные вероятности, отражающие сходство, после чего отображает данные в пространстве меньшей размерности так, чтобы схожие точки оставались близко друг к другу, а различные — дальше друг от друга. Такой подход часто позволяет выявить естественные группировки данных.

Ключевое ограничение t-SNE состоит в том, что результирующие оси в пространстве меньшей размерности не соответствуют каким-либо конкретным признакам или их комбинациям из исходного набора данных. Расстояния между точками отражают степень их сходства, однако направление осей, размер и расположение графика в целом не несут содержательной информации.

Для более подробной интерпретации результатов применялся классификатор случайного леса. Он обучался на исходных данных предсказывать, к какому кластеру на карте t-SNE относится каждая точка. Такой подход позволил оценить, какие признаки вносят наибольший вклад в разделение кластеров.

Для выделения кластеров на карте t-SNE использовался алгоритм HDBSCAN [139]. В отличие от традиционных методов кластеризации (например,  $k$ -средних), HDBSCAN не требует заранее заданного числа кластеров: он выделяет группы на основе локальных вариаций плотности. Точки, не попавшие ни в один кластер, алгоритм относит к «шуму», что предотвращает образование искусственных групп из выбросов.

### 3.3.3 Классификатор случайного леса (Random Forest)

Случайный лес (random forest, RF) [140] — метод машинного обучения, применяемый для задач классификации и регрессии. Он строит большое количество деревьев решений в процессе обучения и формирует прогнозы на основе большинства голосов (при классификации) или усреднения (при регрессии) отдельных деревьев. Каждое дерево строится с использованием случайного подмножества обучающих данных и случайного подмножества признаков, что снижает переобучение и улучшает обобщающую способность.

Метод особенно эффективен при работе со сложными многомерными наборами данных, поскольку позволяет улавливать нелинейные взаимосвязи и взаимодействия между признаками. Кроме того, случайный лес предоставляет оценки важности признаков, показывающие вклад каждой переменной в принятие решений моделью. Эти оценки позволяют выявить признаки, играющие ключевую роль в

разделении кластеров.

В настоящей работе классификатор случайного леса использовался для двух основных целей. Во-первых, с его помощью выявлялись наиболее важные признаки, вносящие вклад в разделение кластеров. Во-вторых, классификатор применялся для предсказания вероятной принадлежности к определённому типу сгустков ранее не классифицированных объектов: они исключались из обучающей выборки, модель обучалась на уже классифицированных сгустках, после чего применялась для оценки вероятности принадлежности каждого неопределённого объекта к тому или иному типу молекулярного облака.

### 3.3.4 Классификатор градиентного бустинга

Градиентный бустинг (gradient boosting, GB) [141] — ещё один метод машинного обучения с учителем, применяемый как для задач классификации, так и для задач регрессии. В отличие от случайного леса, строящего множество независимых деревьев, градиентный бустинг строит деревья последовательно: каждое новое дерево исправляет ошибки, допущенные предыдущими. Это достигается подгонкой каждого дерева к градиенту функции потерь, с акцентом на остатках, не учтённых предыдущими деревьями.

Модель постепенно улучшается при добавлении новых деревьев, результаты которых объединяются для получения итогового предсказания. Такой последовательный процесс обучения позволяет градиентному бустингу улавливать сложные закономерности и взаимодействия в данных. Кроме того, метод обеспечивает гибкость в выборе функций потерь и способов регуляризации, что помогает уменьшить переобучение и улучшить обобщающую способность.

Градиентный бустинг из библиотеки Scikit-learn [135] применялся для классификации ранее не классифицированных объектов: они исключались из обучающей выборки, классификатор обучался на известных кластерах, после чего для каждого неопределённого объекта оценивалась вероятность принадлежности к определённому типу.

## 3.4 Фотометрия для объектов каталога MALT90 по данным *Spitzer*

Как указано в работе [28], инфракрасные фотометрические данные для объектов каталога MALT90 на длинах волн 3–8 мкм и 24 мкм были взяты из обзоров GLIMPSE и MIPS GAL [142, 143]. Однако, хотя результаты фотометрии [142] доступны в базе данных VizieR<sup>2</sup>, они покрывают лишь часть объектов в диапазоне галактических долгот  $|l| = 10^\circ - 65^\circ$ . В работе [143] получены мозаичные изоб-

<sup>2</sup><https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR?-source=II/293>

ражения галактической плоскости, однако фотометрия на 24 мкм для рассматриваемых источников не проводилась. Поэтому фотометрические измерения на длинах волн 3.6, 4.5 и 8 мкм были выполнены самостоятельно на основе архивных данных *Spitzer Space Telescope* IRAC (Infrared Array Camera) в каналах 1, 2 и 4 соответственно. Методика обработки следовала рекомендациям IRAC Instrument Handbook<sup>3</sup>. Для каждого объекта из каталога MALT90 проводилась апертурная фотометрия мозаичных изображений с последующей коррекцией фонового излучения. Измерения выполнялись с использованием круговой апертуры радиусом 2.4'', а фоновое излучение оценивалось в кольцевой области с внутренним радиусом 2.4'' и внешним радиусом 7.2''. Для учёта потерь потока за пределами апертуры применялась поправка апертуры, соответствующая каналу IRAC. Фон оценивался с помощью алгоритма МММ (mean-mode-mean), обеспечивающего устойчивую оценку фона неба даже при наличии слабых источников в кольцевой области. Измеренный поток в апертуре корректировался вычитанием фонового излучения. Преобразование единиц из МЯн/стер в мЯн учитывало угловой размер пикселя и площадь апертуры:

$$F_{\text{мЯн}} = F_{\text{ап,corr}} \times 10^9 \times A_{\text{pixel}} \times \left( \frac{\pi}{180 \times 3600} \right)^2$$

где  $F_{\text{мЯн}}$  – поток в мЯн,  $F_{\text{ап,corr}}$  – скорректированный поток в апертуре (в единицах изображения, МЯн/ср),  $A_{\text{pixel}}$  – площадь пикселя в квадратных угловых секундах,  $A_{\text{pixel}} = \theta_x \times \theta_y \times (3600)^2$  (где  $\theta_x, \theta_y$  – угловые размеры пикселя в градусах)

Фотометрия на длине волны 24 мкм выполнялась иначе из-за большего размера диаграммы направленности и специфики чувствительности камеры MIPS (Multiband Imaging Photometer for *Spitzer*). Как и для IRAC, обработка данных MIPS проводилась в соответствии с руководством инструмента<sup>4</sup>. Для каждого объекта апертурная фотометрия выполнялась с радиусом апертуры 7'', фоновое излучение оценивалось в кольцевой области с внутренним радиусом 7'' и внешним радиусом 20''. В остальном процедура обработки данных и вычисления потоков не отличалась от применявшейся для каналов IRAC.

Следует отметить, что при таком подходе точность полученных результатов фотометрии составляет 10–20%. В контексте решаемой задачи такая точность приемлема, поскольку при кластеризации и сравнительном анализе важны не абсолютные потоки, а относительные различия между объектами. Даже при 20%-ной неопределённости общие закономерности в распределении сохраняются.

<sup>3</sup>[https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irac/iracinstrumenthandbook/IRAC\\_Instrument\\_Handbook.pdf](https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irac/iracinstrumenthandbook/IRAC_Instrument_Handbook.pdf)

<sup>4</sup>[https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/mips/mipsinstrumenthandbook/MIPS\\_Instrument\\_Handbook.pdf](https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/mips/mipsinstrumenthandbook/MIPS_Instrument_Handbook.pdf)

## 3.5 Результаты кластеризации

Параметры кластеризации оптимизировались систематическим перебором. Были протестированы различные методы масштабирования данных: `StandardScaler`, `RobustScaler`, `MinMaxScaler`, `PowerTransformer`, `MaxAbsScaler`, `Normalizer` и `QuantileTransformer` из библиотеки `Scikit-learn` [135]. Для `t-SNE` параметр перплексии варьировался от 30 до 100 с шагом 10. В алгоритме `HDBSCAN` значения минимального размера кластера варьировались от 30 до 150, а минимальный размер выборки — от половины размера кластера до значения, превышающего размер кластера на одном следующем шаге, с шагом 10. Также варьировалось число компонент `t-SNE`: поскольку этот метод может генерировать не более трёх компонент, тестировались два варианта — с двумя и с тремя компонентами.

Каждая комбинация параметров оценивалась с помощью коэффициента силуэта — стандартной метрики качества кластеризации [144]. Коэффициент силуэта основан на попарных расстояниях между объектами: для каждого объекта сравнивается среднее расстояние до других объектов своего кластера со средним расстоянием до объектов ближайшего соседнего кластера. Значение варьируется от  $-1$  до  $1$ ; чем ближе к  $1$ , тем объект лучше соответствует своему кластеру и сильнее отделён от соседних. В качестве оптимальной выбиралась комбинация параметров, дающая наивысший коэффициент силуэта при минимальном числе точек, отнесённых к шуму, что обеспечивало хорошее разделение полученных кластеров.

Для рассматриваемых данных масштабирование `QuantileTransformer` в сочетании с `t-SNE` на двух компонентах систематически давало лучшие значения коэффициента силуэта по сравнению с другими методами масштабирования и с использованием трёх компонент. Если не указано иное, представленные ниже результаты кластеризации получены в этой конфигурации.

### 3.5.1 Кластеризация молекулярных облаков по интегральным интенсивностям молекулярных линий

На основе интегральных интенсивностей молекул  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{HCN}$  и  $\text{C}_2\text{H}$  алгоритм `HDBSCAN` выделил одиннадцать кластеров, представленных на рис. 27, где каждая точка соответствует объекту из каталога `MALT90`. Наивысший коэффициент силуэта  $0.68$  был достигнут при минимальном размере кластера  $75$  и минимальном размере выборки  $45$ . Наиболее многочисленными оказались кластеры  $0$  и  $2$ ; они же сохраняли устойчивость при варьировании параметров. Как видно из рис. 27, между этими двумя кластерами наблюдается некоторое перекрытие типов объектов. Однако на рис. 28 проявляется чёткое различие в их составе: кластер  $0$  («Протозвёзды») преимущественно содержит протозвёздные объекты (A) и протяжённые области  $\text{H II(H)}$ , тогда как кластер  $1$  («Тёмные в ИК») состоит в основном из тёмных ИК-источников (Q) и объектов с неопределённой класси-

фикацией (U).

Поскольку t-SNE — нелинейный метод, вклад отдельных признаков в результат кластеризации не может быть определён напрямую. Для решения этой задачи был обучен классификатор случайного леса, использующий метки кластеров в качестве целевых переменных; это позволило оценить важность признаков по их вкладу в предсказание принадлежности объекта к кластеру. Как показано на рис. 29, наибольший вклад вносят интегральные интенсивности  $C_2H$  и  $N_2H^+$ .

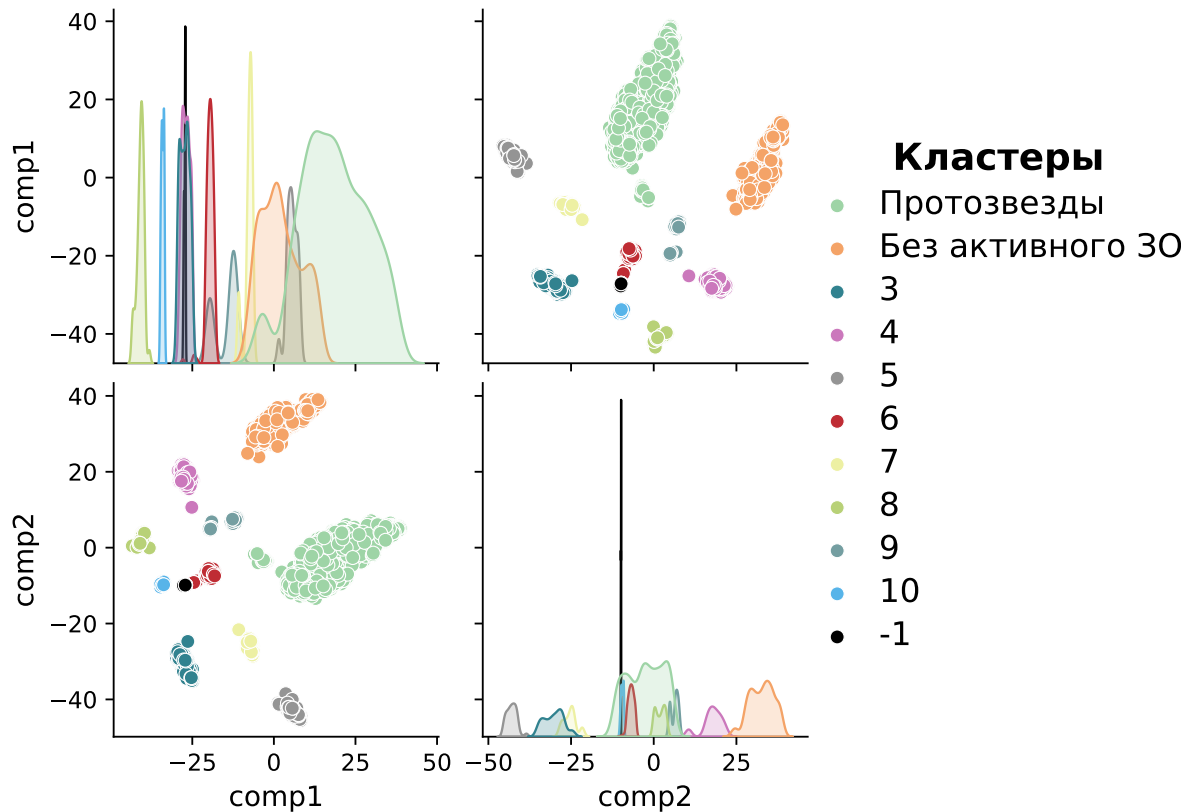


Рис. 27: Результат кластеризации HDBSCAN с использованием метода уменьшения размерности t-SNE на основе интегральных значений интенсивности пяти молекул:  $HCO^+$ ,  $HNC$ ,  $N_2H^+$ ,  $HCN$  и  $C_2H$ . Каждая точка представляет собой объект из каталога MALT90. Кластеры показаны разными цветами, а стабильные кластеры помечены в соответствии с наиболее распространенным типом сгустка внутри каждого кластера. Оси t-SNE (comp1 и comp2) представляют собой абстрактные измерения, которые сохраняют локальные взаимосвязи в данных, но не могут быть напрямую интерпретированы в терминах исходных характеристик. Оценка силуэта 0,68 была достигнута с использованием QuantileTransformer для масштабирования, перплексии t-SNE 100, минимального размера кластера 75 и минимального количества соседей — 45. Подписи кластеров отображены в порядке убывания количества объектов в каждом из них, а кластер, обозначенный как -1, представляет шум.

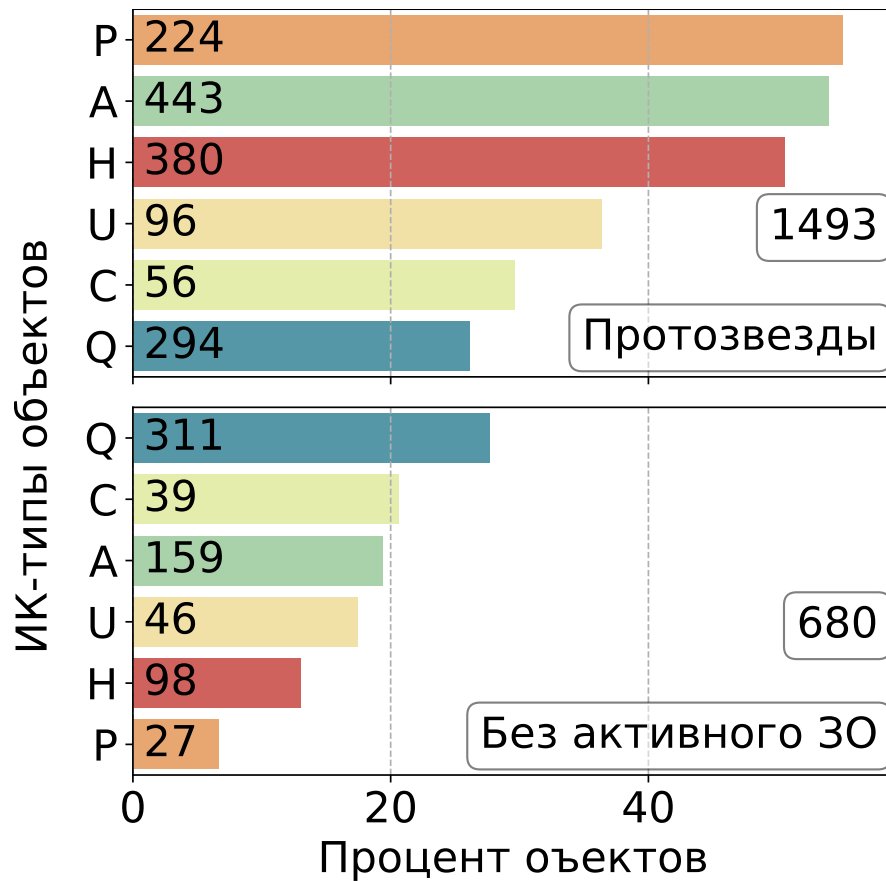


Рис. 28: Распределение типов объектов в двух устойчивых и наиболее населённых кластерах, выявленных с помощью HDBSCAN и t-SNE по интегральным интенсивностям пяти молекулярных линий:  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{HCN}$  и  $\text{C}_2\text{H}$ . Эти кластеры интерпретируются как содержащие преимущественно протозвёздные объекты (верхняя панель) и тёмные в ИК объекты (нижняя панель). Каждый столбец соответствует определённому типу объектов из каталога MALT90: Q — тёмные в ИК сгустки, A — протозвёздные, C — компактные области H II, H — протяжённые области H II, P — ФДО, U — объекты с неопределённой классификацией. Проценты указывают долю объектов данного типа в кластере, фактическое число объектов приведено по оси абсцисс.

Таблица 6: Распределение средних и медианных значений признаков по кластерам для модели классификации на основе интегральных значений интенсивности пяти молекул. Нулевые значения интегральных интенсивностей указывают на то, что излучение соответствующей молекулы ниже порога ее обнаружения.

Кластер	Признак	Среднее	Медиана
Протозвёзды	$\text{HCO}^+$	7.26	4.54
	HNC	5.14	3.15
	$\text{N}_2\text{H}^+$	6.19	4.10
	HCN	8.36	4.72
	$\text{C}_2\text{H}$	2.59	1.72
Без активного 30	$\text{HCO}^+$	5.73	2.83
	HNC	3.60	2.07
	$\text{N}_2\text{H}^+$	3.30	2.31
	HCN	7.27	2.63
	$\text{C}_2\text{H}$	0.00	0.00

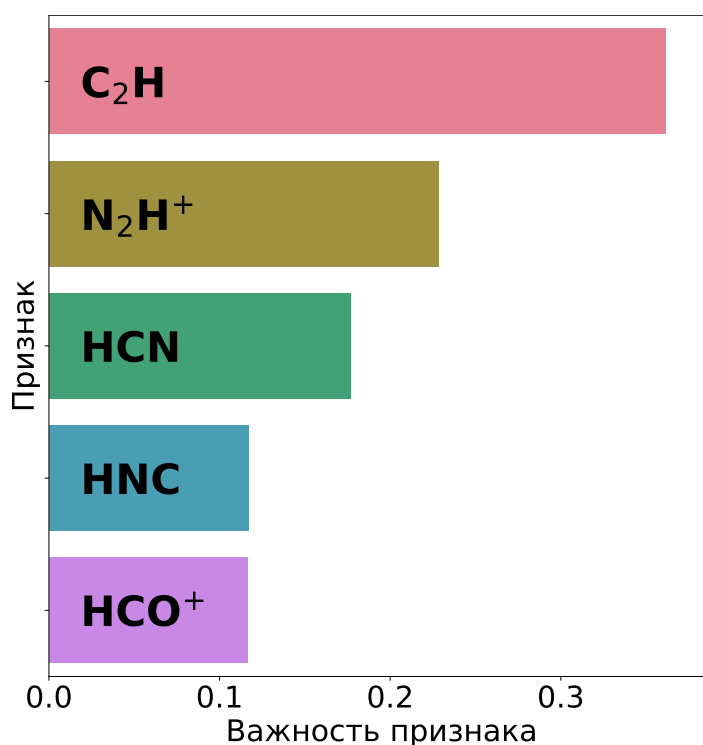


Рис. 29: Важность признаков, полученная методом случайного леса для модели классификации на основе интегральных интенсивностей пяти молекул:  $\text{HCO}^+$ , HNC,  $\text{N}_2\text{H}^+$ , HCN и  $\text{C}_2\text{H}$ .

### 3.5.2 Кластеризация молекулярных облаков по интегральным интенсивностям молекулярных линий, пиковому потоку пылевого континуума на 870 мкм и температуре пыли

На следующем шаге в качестве дополнительного признака был добавлен поток на длине волны 870 мкм. Его влияние на выделение кластеров оказалось незна-

чительным — общая структура кластеризации практически не изменилась, что указывает на несущественную роль этого признака в различении рассматриваемых типов объектов.

Аналогичный результат был получен и при включении в анализ температуры пыли: её вклад в кластеризацию также оказался незначительным. Поэтому результаты с учётом температуры пыли в направлении объектов каталога MALT90 отдельно не приводятся; возможные причины столь слабого влияния этого признака обсуждаются в разделе 3.7.2. В дальнейших экспериментах поток на длине волны 870 мкм и температура пыли были исключены из анализа, чтобы избежать искажения результатов.

### 3.5.3 Кластеризация молекулярных облаков по интегральным интенсивностям молекулярных линий, инфракрасным потокам по данным *Spitzer* и наличию метанольных мазеров

Поскольку наблюдения в окрестности 90 ГГц проводились на телескопе MOPRA в направлении плотных сгустков каталога ATLASGAL с целью поиска спектральных линий, само отсутствие зарегистрированного излучения также несёт полезную информацию. Поэтому на следующем шаге в анализ были включены интегральные интенсивности всех наблюдавшихся линий — в том числе тех, значения для которых у большинства объектов оказались ниже порога обнаружения телескопа. Всего рассматривалось 16 линий:  $\text{HCO}^+$  (1–0),  $\text{HNC}$  (1–0),  $\text{N}_2\text{H}^+$  (1–0),  $\text{HCN}$  (1–0),  $\text{C}_2\text{H}$  (1–0, 3/2–1/2),  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  (1–0),  $\text{HN}^{13}\text{C}$  (1–0),  $^{13}\text{CS}$  (2–1),  $^{13}\text{C}^{34}\text{S}$  (2–1),  $\text{HC}^{13}\text{CCN}$  (10–9),  $\text{HNCO}$   $4_{0,4}-3_{0,3}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$   $5_1-4_1$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$  (10–9),  $\text{HNCO}$   $4_{1,3}-3_{1,2}$ ,  $\text{SiO}$  (2–1),  $\text{H41}\alpha$ .

Как указано в работе [28], классификация объектов каталога MALT90 основывалась на данных *Spitzer* на длинах волн 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм. Поэтому к имеющемуся набору признаков были добавлены ИК-потоки соответствующих объектов на этих длинах волн, чтобы оценить их влияние на результаты кластеризации и выяснить, обеспечивают ли они лучшее разделение кластеров по типам.

На следующих этапах к инфракрасным потокам *Spitzer* постепенно добавлялись интегральные интенсивности всех имеющихся линий. Было обнаружено, что добавление интегральной интенсивности  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  приводит к появлению отдельного кластера, состоящего преимущественно из областей II и ФДО.

На рис. 30 представлены результаты кластеризации, полученные с использованием интегральных интенсивностей шести линий молекулярного излучения в сочетании с ИК-потоками *Spitzer*. Наилучшее значение коэффициента силуэта, равное 0.71, достигнуто при персплексии t-SNE, равной 90, минимальном размере кластера 70 и минимальном размере выборки 55. В легенде кластеры приведены

в порядке убывания их размера; кластер с меткой  $-1$  соответствует шуму (247 объектов).

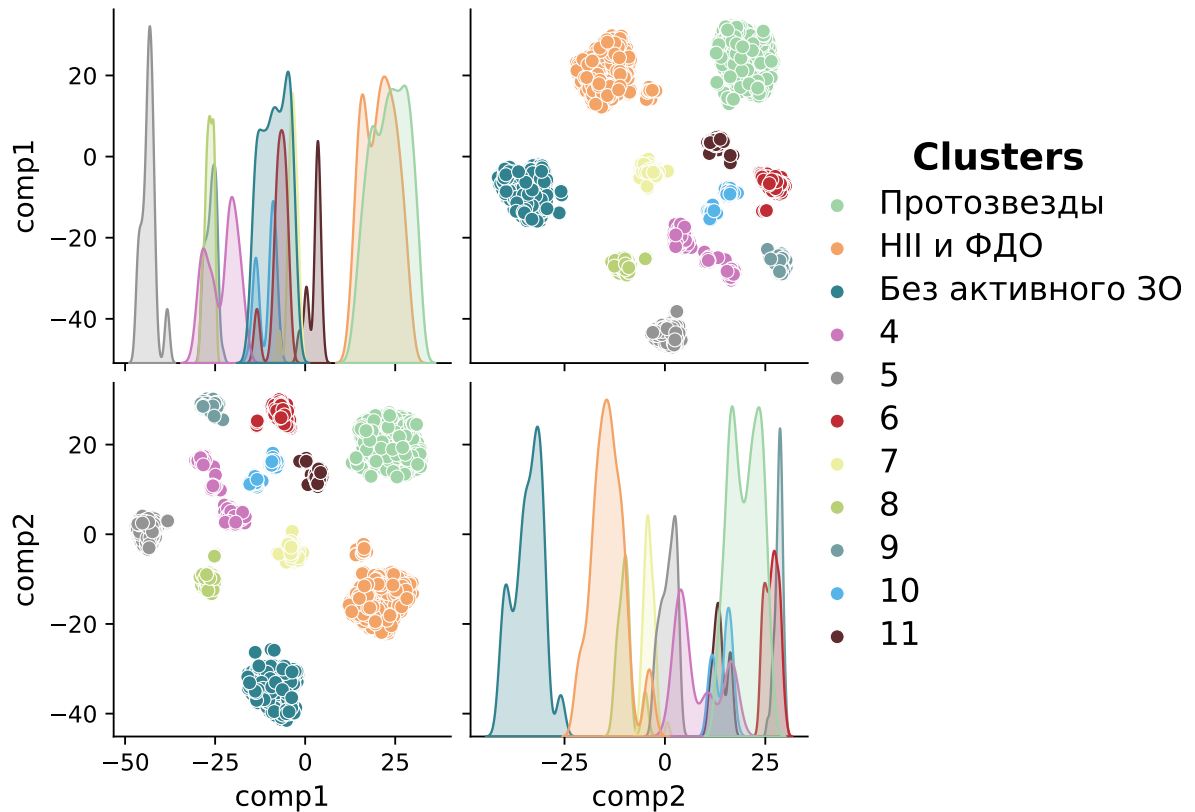


Рис. 30: Результат кластеризации HDBSCAN с использованием метода уменьшения размерности t-SNE на основе интегральных значений интенсивности шести молекул ( $\text{HCO}^+$  (1-0),  $\text{HNC}$ (1-0),  $\text{N}_2\text{H}^+$ (1-0),  $\text{HCN}$ (1-0),  $\text{C}_2\text{H}$ (1-0)  $3/2-1/2$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ (1-0)) и потоках *Spitzer* на 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм. Каждая точка представляет собой объект из каталога MALT90. Кластеры показаны разными цветами, а стабильные кластеры помечены в соответствии с наиболее распространенным типом сгустка внутри каждого кластера. Подписи кластеров отображены в порядке убывания количества объектов в каждом из них, а кластер, обозначенный как -1, представляет шум.

Подробное распределение ИК-типов объектов внутри каждого кластера показано на рис. 31. Наиболее населённый кластер, обозначенный как «Протозвёзды», содержит 787 источников, из которых 501 — протозвёздные объекты и области H II. Такой состав указывает на то, что кластер в основном соответствует промежуточным и более поздним стадиям звездообразования.

Кластер «H II и ФДО» менее населён (около 10% выборки) и включает 718 объектов. В него попадает значительная доля более эволюционировавших источников: примерно 34.5% всех ФДО и 24% всех областей H II из каталога MALT90. Такое распределение указывает на то, что этот кластер, вероятно, соответствует областям, в которых процесс звездообразования продвинулся дальше.

Третий кластер, обозначенный как «Без активного ЗО», содержит 592 сгустка и состоит преимущественно из источников без явных признаков активного звездо-

образования. В него входят 23.5% всех ИК-тёмных сгустков (Q) и 21% объектов с неопределённой эволюционной стадией (U).

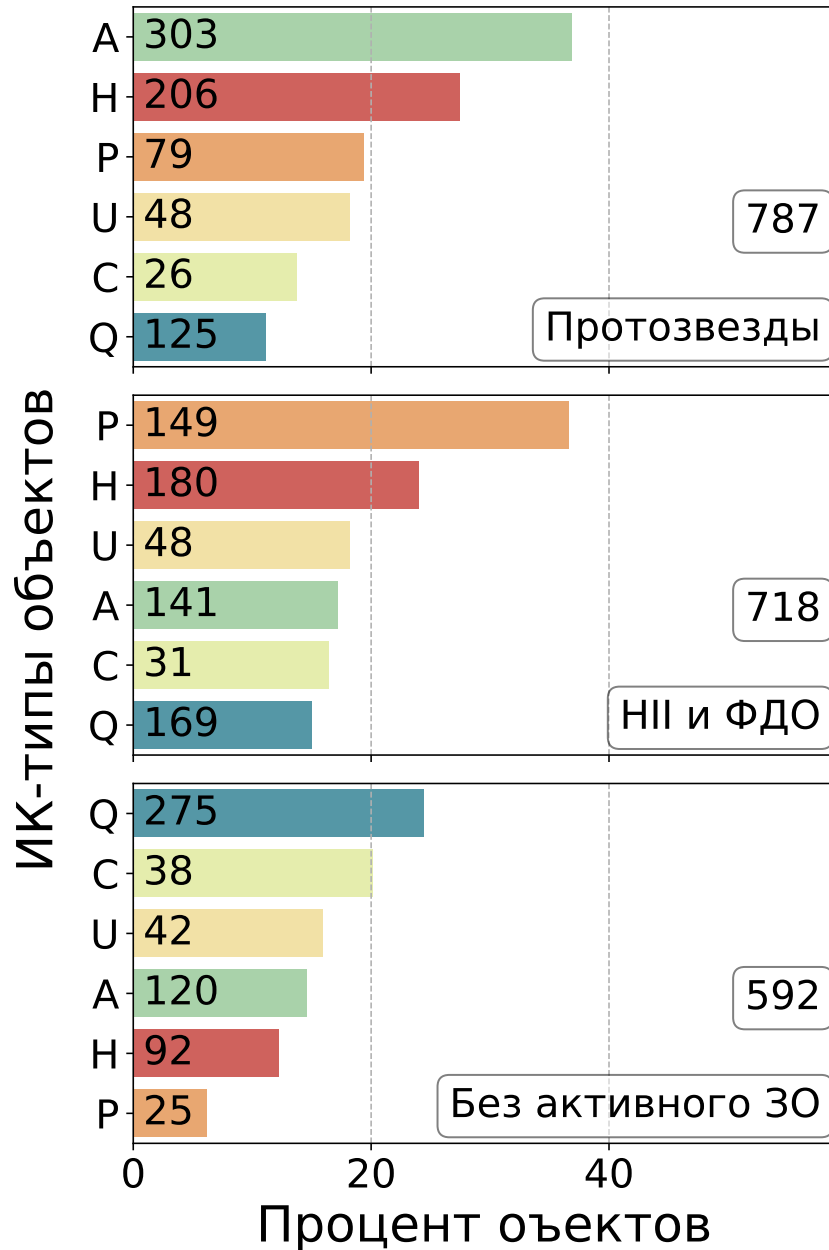


Рис. 31: Распределение типов объектов в трёх устойчивых и наиболее населённых кластерах, выявленных с помощью HDBSCAN и t-SNE по интегральным интенсивностям шести молекулярных линий ( $\text{HCO}^+$  (1-0),  $\text{HNC}$  (1-0),  $\text{N}_2\text{H}^+$  (1-0),  $\text{HCN}$  (1-0),  $\text{C}_2\text{H}$  (1-0, 3/2-1/2),  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  (1-0)) и потокам *Spitzer* на длинах волн 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм. Каждый столбец соответствует определённому типу объектов из каталога MALT90: Q — тёмные в ИК молекулярные облака, A — протозвёздные, C — компактные области НII, H — протяжённые области НII, P — ФДО, U — объекты с неопределённой классификацией. Значение напротив каждого типа указывает число объектов этого типа в соответствующем кластере.

Наиболее важными признаками для полученной классификации являются интегральные интенсивности молекул  $\text{C}_2\text{H}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  и  $\text{N}_2\text{H}^+$  (см. рисунок 32). Важность ИК-потоков *Spitzer* не оказалась достаточной, чтобы отделить НII и ФДО

кластер от остальной выборки. Вместо этого одним из ключевых признаков стала интегральная интенсивность линии  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ .

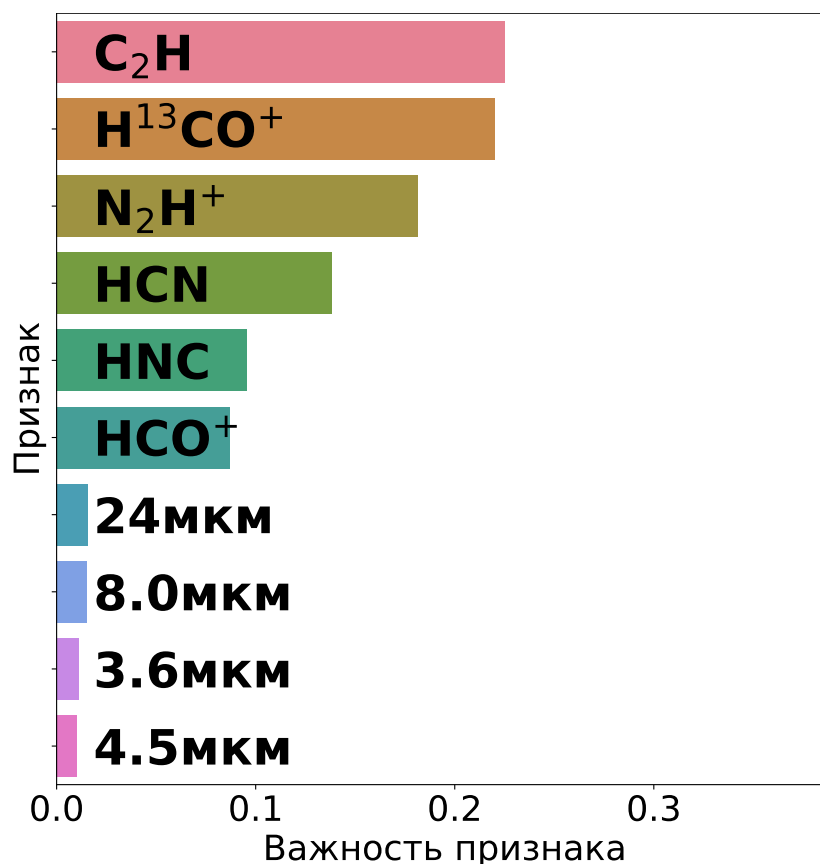


Рис. 32: Важность признаков, полученная методом случайного леса для модели классификации на основе интегральных значений интенсивности шести молекул ( $\text{HCO}^+$  (1-0),  $\text{HNC}$ (1-0),  $\text{N}_2\text{H}^+$ (1-0),  $\text{HCN}$ (1-0),  $\text{C}_2\text{H}$ (1-0, 3/2-1/2),  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ (1-0)) и потоках *Spitzer* на 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм.

Добавление интегральных интенсивностей других молекул не привело к появлению новых устойчивых кластеров: формирующиеся кластеры стабильно содержали преобладание объектов типов  $\text{H II}$ +протозвёзды,  $\text{H II}$ +ФДО и тёмные в ИК + объекты без определённого ИК-типа в различных пропорциях. Включение индикаторов наличия метанольных мазеров II класса привело к разделению кластера «Протозвёзды» (преимущественно состоящего из протозвёздных объектов и областей  $\text{H II}$  — ИК-типы А и Н соответственно) на две группы: связанную с мазерным излучением и без него, что являлось ожидаемым результатом.

В целом, комбинация химического состава и инфракрасного излучения позволяет различать стадии эволюции объектов: от холодного молекулярного газа к протозвёздам и областям  $\text{H II}$ .

Таблица 7: Распределение средних и медианных значений признаков по кластерам для модели классификации на основе значений интегральных интенсивностей ( $K^*_{\text{км/с}}$ ) шести молекул и потоках *Spitzer* (мЯн). Нулевые значения интегральных интенсивностей указывают на то, что излучение соответствующей молекулы ниже порога ее обнаружения.

Кластер	Признак	Среднее	Медиана
Протозвёзды	$C_2H$	3.21	2.25
	$H^{13}CO^+$	1.22	0.91
	$N_2H^+$	8.41	6.05
	HCN	10.2	6.14
	HNC	6.43	4.21
	$HCO^+$	9.12	5.98
	8.0мкм	457.59	28.06
	24мкм	180.1	45.21
	4.5мкм	11.26	0.7
	3.6мкм	38.7	4.02
Области II	$C_2H$	1.9	1.43
	$H^{13}CO^+$	0.0	0.0
	$N_2H^+$	3.64	2.52
	HCN	6.29	3.82
	HNC	3.69	2.37
	$HCO^+$	5.17	3.5
	8.0мкм	179.47	16.06
	24мкм	150.16	18.07
	4.5мкм	6.57	0.48
	3.6мкм	20.37	2.74
Без активного 30	$C_2H$	0.0	0.0
	$H^{13}CO^+$	0.0	0.0
	$N_2H^+$	3.3	2.25
	HCN	7.84	2.65
	HNC	3.73	2.02
	$HCO^+$	6.03	2.82
	8.0мкм	54.62	3.07
	24мкм	76.63	1.97
	4.5мкм	3.79	0.41
	3.6мкм	12.56	2.05

### 3.5.4 Влияние полноты признаков на результаты кластеризации

Обзор MALT90 представляет собой слепой обзор объектов, и отсутствие зарегистрированного излучения в каком-либо молекулярном переходе также несёт полезную информацию о физическом состоянии среды. Для проверки устойчивости результатов кластеризации к вариациям полноты признаков был проведён дополнительный анализ на ограниченной подвыборке каталога, для которой доступна более полная информация.

Эта подвыборка включает 2066 молекулярных облаков, в которых зарегистрировано излучение в четырёх наиболее часто наблюдаемых переходах обзора MALT90 ( $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ) и имеются полные измерения инфракрасных потоков *Spitzer* на длинах волн 3.6, 4.5, 8 и 24 мкм. Для этих источников использовался набор из 20 признаков: четыре потока в среднем ИК-диапазоне и 16 интегральных интенсивностей молекулярных линий. Кластеризация выполнялась по той же методике, что и для полного каталога.

Полученные кластеры качественно согласуются с результатами для полной выборки: выделяются три доминирующих кластера, соответствующих эволюционным группам «Н II+ФДО», «Протозвёзды» и «Без активного звездообразования». Относительная численность кластеров отличается из-за более жёсткого отбора источников, однако общий характер кластеризации и её физическая интерпретация сохраняются. Анализ значимости признаков показывает, что в этой подвыборке разделение на кластеры определяется главным образом интегральными интенсивностями молекулярных линий: на их долю приходится около 75% суммарной значимости.

## 3.6 Результаты применения алгоритмов машинного обучения для классификации молекулярных облаков из каталога MALT90

Предварительная обработка данных включала масштабирование с помощью *QuantileTransformer*, показавшего наилучшие результаты для данных по молекулярному излучению и ИК-потокам. Поскольку при кластеризации использование интегральных интенсивностей линий  $\text{HCO}^+$  (1–0),  $\text{HNC}$  (1–0),  $\text{N}_2\text{H}^+$  (1–0),  $\text{HCN}$  (1–0),  $\text{C}_2\text{H}$  (1–0, 3/2–1/2) и  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  (1–0) привело к разделению молекулярных облаков на три устойчивых кластера, тот же набор линий использовался и при уточнении классификации объектов неопределённого типа, дополненный ИК-потоками в среднем инфракрасном диапазоне по данным *Spitzer*.

Для выявления скрытых закономерностей в данных применялся классификатор случайного леса из 1000 деревьев. Объекты были разделены на две группы: с

Таблица 8: Сводка предсказанного типа объектов для неопределенных молекулярных облаков с использованием классификаторов Случайного Леса (RF) и Градиентного Бустинга (GB). Статистика для предсказаний с вероятностью  $> 0.5$ .

Предсказанный тип	Количество объектов		Процентов от общего кол-ва(%)		Средняя вероятность	
	RF	GB	RF	GB	RF	GB
Q	457	476	83.1	77.9	0.75	0.77
P	49	73	8.9	11.9	0.67	0.72
A	39	57	7.1	9.3	0.60	0.61
H	5	5	0.9	0.8	0.61	0.60
C	–	–	–	–	–	–

известной классификацией и без классификации. Для обучения модели использовались только объекты с известной классификацией; при этом исключались молекулярные облака, для которых отсутствовали данные по ИК-потокам. Качество модели оценивалось с помощью 4-кратной кросс-валидации: набор данных разделялся на четыре равные части, три из которых служили для обучения алгоритма, а на оставшейся четвёртой обученный алгоритм предсказывал типы объектов. Далее предсказанные метки сравнивались с экспертными, что позволяло оценить точность. После обучения классификатор применялся для предсказания типов объектов без классификации и оценки вероятностей их принадлежности к каждому типу.

Средняя точность кросс-валидации составила 0.6. Для повышения надёжности предсказаний был установлен порог вероятности 50%: объект относился к предсказанному типу только при превышении этого порога, в противном случае он сохранял статус не классифицированного. С помощью этого подхода удалось классифицировать 550 из 774 объектов неопределённого типа (см. табл. 8).

Для повышения точности предсказаний для объектов без классификации дополнительно применялся классификатор градиентного бустинга со следующими параметрами: количество деревьев — 1000, скорость обучения — 0.01, максимальная глубина — 3. Для повышения обобщающей способности модели и снижения переобучения на каждой итерации при построении нового дерева использовалось только 80% от общего объёма обучающей выборки. Кроме того, было включено раннее прекращение обучения (early stopping) с валидационной долей 10%, что позволяло автоматически завершать обучение при отсутствии улучшений в течение 10 итераций подряд. Модель обучалась на подмножестве объектов с известными типами, для которых имелись значения ИК-потоков во всех четырёх диапазонах, а оценка качества проводилась методом 4-кратной кросс-валидации — аналогично подходу, описанному выше.

Классификатор градиентного бустинга определил типы 611 молекулярных облаков с вероятностью принадлежности к предсказанному типу выше 50% (см.

табл. 8). Средняя точность кросс-валидации составила 0.61, что сопоставимо с результатом случайного леса. Для повышения надёжности итоговой классификации предсказания обоих классификаторов были объединены. В результате установлена классификация 522 молекулярных облаков, причём 512 из них отнесены к одной и той же эволюционной стадии обоими методами.

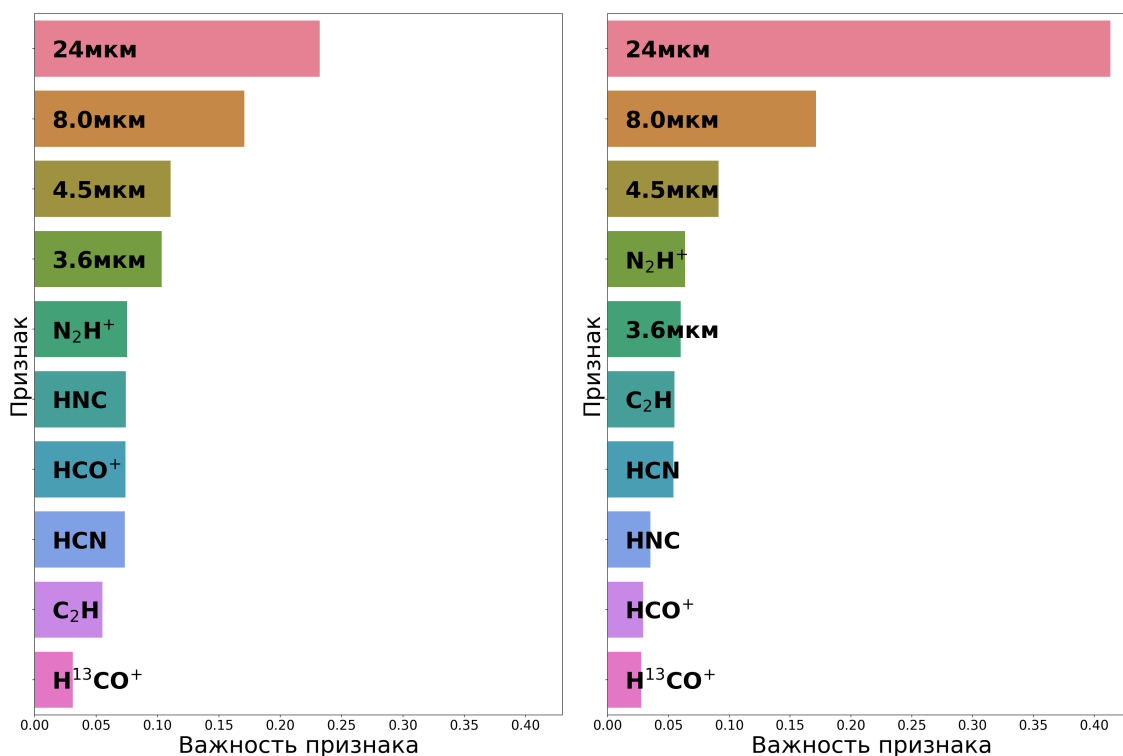


Рис. 33: Важность признаков при использовании классификаторов Случайного Леса (левая панель) и Градиентного Бустинга (правая панель)

Стоит отметить, что основными признаками при классификации объектов типа U оказались ИК-потoki *Spitzer* (см. рис. 33). Это объясняется тем, что модель обучается находить границы между заранее определёнными типами молекулярных облаков, а в подходе, принятом в работе [28], ИК-потoki служили основным критерием классификации.

Сравнение результатов двух классификаторов представлено на рис. 35. На правой панели приведена матрица несоответствий: каждая ячейка содержит число объектов, для которых случайный лес (строки) и градиентный бустинг (столбцы) предсказали определённый тип молекулярного облака. Совпадения и расхождения выделены цветовой шкалой, а числа указывают количество облаков, отнесённых к соответствующей паре типов. Анализ матрицы показывает, что лишь десять объектов получили различные классификации у двух алгоритмов, причём максимальное число несоответствий (пять) наблюдается между классами «Протозвёзды» и «Без активного звездообразования». В табл. 9 приведены результаты классификации молекулярных облаков, типы которых были определены описан-

ным методом; названия объектов, отмеченные символом «\*», получили различные классификации у двух алгоритмов.

На следующем этапе ранее не присвоенные типы молекулярных облаков были заменены наиболее вероятными, полученными с помощью классификаторов случайного леса и градиентного бустинга. После этого кластеризация проводилась повторно с параметрами, описанными в разделах 3.5.1 и 3.5.3, что позволило оценить влияние такой замены на состав кластеров. Результаты представлены на рис. 34.

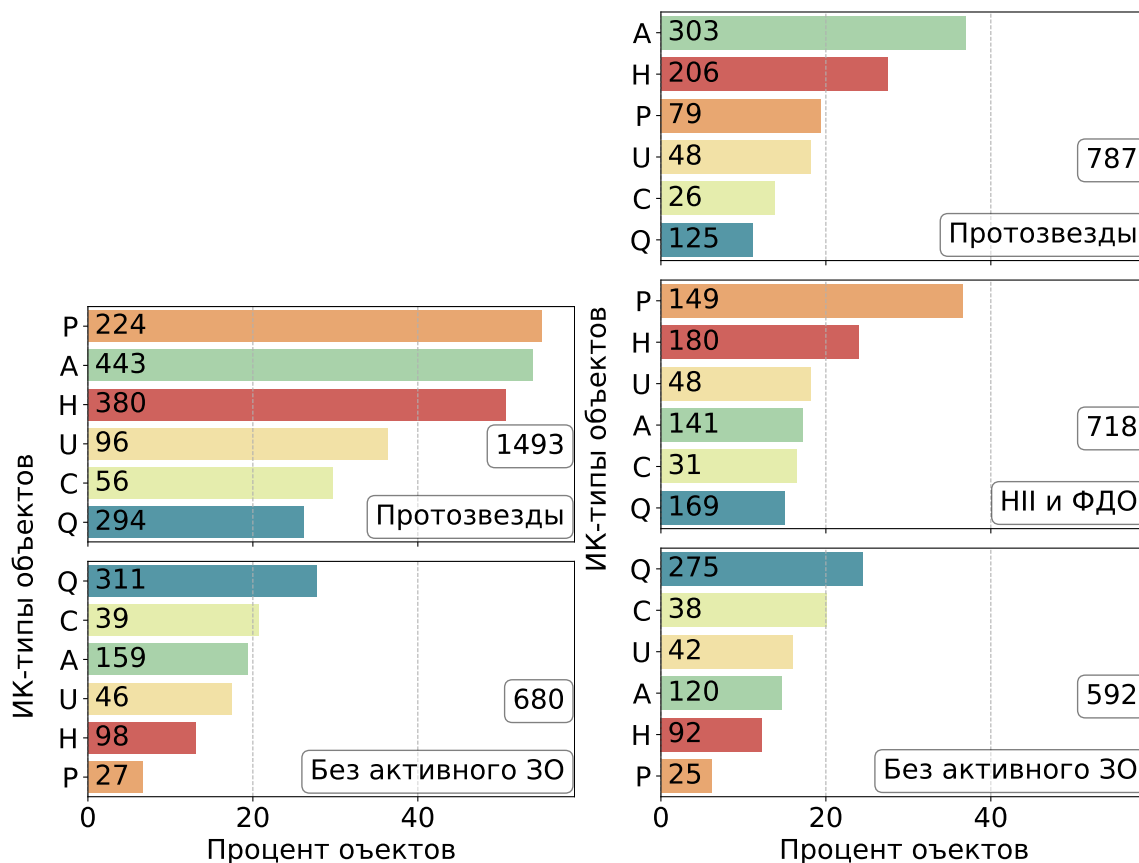


Рис. 34: Распределение типов объектов в кластерах после замены неопределенных молекулярных облаков найденным наиболее вероятным типом. Использовалась кластеризация HDBSCAN с методом уменьшения размерности t-SNE. **Левая панель:** по значениям интегральных интенсивностей пяти линий молекул (сравните с рис. 28). **Правая панель:** по значениям интегральных интенсивностей шести линий молекул и потокам *Spitzer* (сравните с рис. 30).

Анализ кластеризации по пяти молекулярным линиям показывает, что кластер, ранее включавший как объекты без активного звездообразования, так и объекты типа U, теперь демонстрирует явное преобладание первых. При этом состав кластера «Протозвёзды» остался практически неизменным.

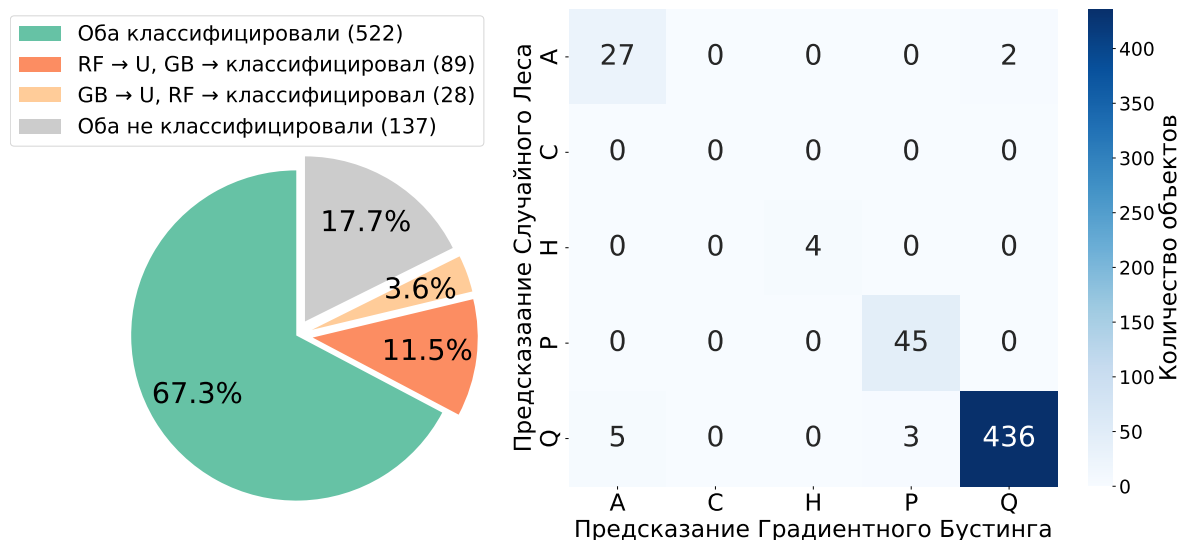


Рис. 35: Сравнение результатов классификации ранее неопределенных типов молекулярных облаков (U) с использованием классификаторов Случайного Леса (RF) и Градиентного Бустинга (GB) для объектов с вероятностью предсказания превышающей 50%. **Левая панель:** На диаграмме выделены три категории: совпадения (зеленый сегмент), расхождения (оранжевый и желтый сегменты) и случаи неуверенной классификации (обозначен серым цветом). Каждый сегмент отображает процент молекулярных облаков от общего числа неопределенных объектов, попадающих в соответствующую категорию. В подписи к рисунку в скобках указаны абсолютные значения количества объектов. **Правая панель:** Матрица несоответствий отображает расхождения в классификации между методами Случайного Леса и Градиентного Бустинга. На диагонали матрицы отображено количество объектов, получивших одинаковую классификацию от обоих алгоритмов. Буквенные обозначения по осям соответствуют типу молекулярного облака из каталога MALT90: Q — темные в ИК молекулярные облака, A — протозвёздные, C — компактные области II, H — протяженные области II, P — ФДО и U — неопределенные молекулярные облака.

Схожая картина наблюдается при кластеризации по шести молекулярным линиям и потокам *Spitzer*. Замена ранее не присвоенных типов молекулярных облаков на наиболее вероятную эволюционную стадию позволила более чётко выделить кластеры с преобладанием объектов без активного звездообразования и областей ФДО, тогда как состав кластера с преобладанием протозвёзд практически не изменился. Таким образом, уточнение типов объектов повышает однородность кластеров и статистическую значимость выделенных групп, не влияя при этом на кластеры с устойчивыми и хорошо различимыми свойствами.

В целом, применение методов машинного обучения для определения типов молекулярных облаков и последующая кластеризация позволяют более надёжно выявлять закономерности в распределении объектов по стадиям звездообразования. Полученные результаты создают основу для дальнейшего анализа связей между физико-химическими свойствами облаков и их эволюционными стадиями.

Таблица 9: Результаты классификации ранее неопределенных объектов с достоверностью для обоих методов  $> 0,5$ . Столбцы следующие: номер объекта; название объекта, как указано в обзоре MALT90); галактическая долгота (l) и широта (b); классификация, присвоенная моделью случайного леса (RF Класс.) вместе с соответствующей вероятностью (RF Вероят.); и классификация, присвоенная моделью градиентного бустинга (GB Класс.) вместе с ее вероятностью (GB Вероят.).

№	Объект	l	b	RF Класс.	RF Вероят.	GB Класс.	GB Вероят.
1	AGAL000.021-00.051_A	0.02	-0.05	Q	0.60	Q	0.93
2	AGAL000.084+00.164_S	0.08	0.16	Q	0.80	Q	0.74
3	AGAL000.273-00.064_A	0.27	-0.06	Q	0.57	Q	0.94
4	AGAL000.293-00.112_B	0.29	-0.11	P	0.55	P	0.77
5	AGAL000.314-00.099_A	0.31	-0.10	Q	0.54	Q	0.93
6	AGAL000.314-00.099_B	0.31	-0.10	P	0.52	P	0.62
7	AGAL000.428-00.184_A	0.43	-0.18	Q	0.86	Q	0.77
8	AGAL000.469+00.026_S	0.47	0.03	Q	0.97	Q	0.95
9	AGAL000.478-00.729_S	0.48	-0.73	Q	0.63	Q	0.79
10	AGAL000.494-00.664_S	0.49	-0.66	A	0.78	A	0.88
11	AGAL000.504+00.141_S	0.50	0.14	Q	0.58	Q	0.70
12	AGAL000.541+00.117_A	0.54	0.12	Q	0.69	Q	0.67
13	AGAL000.541+00.117_B	0.54	0.12	Q	0.76	Q	0.77
14	AGAL000.553-00.679_S	0.55	-0.68	Q	0.79	Q	0.69
15	AGAL000.569-00.889_S	0.57	-0.89	Q	0.73	Q	0.78
16	AGAL000.646+00.029_A	0.65	0.03	Q	0.98	Q	0.95
17	AGAL000.646+00.029_B	0.65	0.03	Q	0.91	Q	0.92
18	AGAL000.704-00.181_S	0.70	-0.18	Q	0.95	Q	0.95
19	AGAL000.756-00.074_S	0.76	-0.07	Q	0.98	Q	0.97
20	AGAL000.771-00.186_S	0.77	-0.19	Q	0.98	Q	0.97
21	AGAL000.784-00.206_A	0.78	-0.21	Q	0.98	Q	0.96
22	AGAL000.784-00.206_B	0.78	-0.21	Q	0.88	Q	0.92
23	AGAL000.844-00.204_A	0.84	-0.20	Q	0.87	Q	0.94
24	AGAL000.844-00.204_B	0.84	-0.20	Q	0.66	Q	0.82
25	AGAL000.848-00.029_A	0.85	-0.03	Q	0.88	Q	0.96
26	AGAL000.848-00.029_B	0.85	-0.03	Q	0.85	Q	0.89
27	AGAL000.866-00.036_S	0.87	-0.04	Q	0.82	Q	0.87
28	AGAL000.874-00.012_A	0.87	-0.01	Q	0.76	Q	0.90
29	AGAL000.874-00.012_B	0.87	-0.01	Q	0.79	Q	0.92
30	AGAL000.883+00.166_S	0.88	0.17	Q	0.98	Q	0.96
31	AGAL000.891+00.142_S	0.89	0.14	Q	0.98	Q	0.96

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
32	AGAL000.918-00.326_S	0.92	-0.33	Q	0.58	Q	0.77
33	AGAL000.928-00.337_S	0.93	-0.34	Q	0.76	Q	0.83
34	AGAL000.934-00.327_S	0.93	-0.33	Q	0.69	Q	0.75
35	AGAL000.969-00.336_S	0.97	-0.34	Q	0.80	Q	0.79
36	AGAL001.036-00.076_A	1.04	-0.08	Q	0.95	Q	0.94
37	AGAL001.036-00.076_B	1.04	-0.08	Q	0.51	Q	0.53
38	AGAL001.063-00.077_A	1.06	-0.08	Q	0.59	Q	0.60
39	AGAL001.063-00.077_B	1.06	-0.08	Q	0.81	Q	0.86
40	AGAL001.199+00.076_S	1.20	0.08	Q	0.98	Q	0.94
41	AGAL001.266+00.056_A	1.27	0.06	Q	0.97	Q	0.95
42	AGAL001.266+00.056_B	1.27	0.06	Q	0.70	Q	0.77
43	AGAL001.278-00.151_A	1.28	-0.15	Q	0.99	Q	0.95
44	AGAL001.278-00.151_B	1.28	-0.15	Q	0.70	Q	0.74
45	AGAL001.303-00.062_A	1.30	-0.06	Q	0.97	Q	0.96
46	AGAL001.303-00.062_B	1.30	-0.06	Q	0.74	Q	0.82
47	AGAL001.318+00.266_S	1.32	0.27	Q	0.96	Q	0.95
48	AGAL001.321-00.071_S	1.32	-0.07	Q	0.94	Q	0.93
49	AGAL001.343-00.082_A	1.34	-0.08	Q	0.96	Q	0.95
50	AGAL001.343-00.082_B	1.34	-0.08	Q	0.64	Q	0.73
51	AGAL001.359+00.101_S	1.36	0.10	Q	0.89	Q	0.94
52	AGAL001.359+00.127_A	1.36	0.13	Q	0.65	Q	0.92
53	AGAL001.361+00.216_S	1.36	0.22	Q	0.93	Q	0.95
54	AGAL001.381+00.199_S	1.38	0.20	Q	0.99	Q	0.97
55	AGAL001.419-00.237_S	1.42	-0.24	Q	0.86	Q	0.92
56	AGAL001.446+00.067_S	1.45	0.07	Q	0.94	Q	0.95
57	AGAL001.508-00.247_A	1.51	-0.25	Q	0.79	Q	0.78
58	AGAL001.508-00.247_B	1.51	-0.25	Q	0.72	Q	0.75
59	AGAL001.539-00.206_A	1.54	-0.21	Q	0.93	Q	0.90
60	AGAL001.539-00.206_B	1.54	-0.21	Q	0.83	Q	0.79
61	AGAL001.544-00.274_A	1.54	-0.27	Q	0.87	Q	0.95
62	AGAL001.544-00.274_B	1.54	-0.27	Q	0.66	Q	0.83
63	AGAL001.642-00.034_A	1.64	-0.03	Q	0.86	Q	0.92
64	AGAL001.642-00.034_B	1.64	-0.03	Q	0.83	Q	0.80
65	AGAL001.662-00.174_S	1.66	-0.17	Q	0.86	Q	0.96
66	AGAL001.674-00.127_S	1.67	-0.13	Q	0.90	Q	0.93
67	AGAL001.684-00.379_A	1.68	-0.38	Q	0.81	Q	0.95

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
68	AGAL001.684-00.379_B	1.68	-0.38	Q	0.84	Q	0.89
69	AGAL001.716-00.056_S	1.72	-0.06	Q	0.98	Q	0.96
70	AGAL001.717-00.336_A	1.72	-0.34	Q	0.89	Q	0.94
71	AGAL001.717-00.336_B	1.72	-0.34	Q	0.79	Q	0.79
72	AGAL001.749-00.102_S	1.75	-0.10	Q	0.94	Q	0.94
73	AGAL001.796-00.126_S	1.80	-0.13	Q	0.86	Q	0.96
74	AGAL001.891-00.071_S	1.89	-0.07	Q	0.90	Q	0.95
75	AGAL001.907-00.059_S	1.91	-0.06	Q	0.88	Q	0.90
76	AGAL002.866+00.067_S	2.87	0.07	Q	0.94	Q	0.93
77	AGAL002.899+00.066_S	2.90	0.07	Q	0.90	Q	0.97
78	AGAL003.021-00.067_A	3.02	-0.07	Q	0.97	Q	0.97
79	AGAL003.021-00.067_B	3.02	-0.07	Q	0.96	Q	0.94
80	AGAL003.029-00.072_A	3.03	-0.07	Q	0.85	Q	0.80
81	AGAL003.029-00.072_B	3.03	-0.07	Q	0.79	Q	0.87
82	AGAL003.038-00.057_A	3.04	-0.06	Q	0.94	Q	0.93
83	AGAL003.038-00.057_B	3.04	-0.06	Q	0.85	Q	0.86
84	AGAL003.039+00.144_A	3.04	0.14	Q	0.87	Q	0.93
85	AGAL003.039+00.144_B	3.04	0.14	Q	0.88	Q	0.88
86	AGAL003.049+00.392_S	3.05	0.39	Q	0.89	Q	0.81
87	AGAL003.056+00.151_A	3.06	0.15	Q	0.86	Q	0.87
88	AGAL003.056+00.151_B	3.06	0.15	Q	0.91	Q	0.91
89	AGAL003.059-00.077_A	3.06	-0.08	Q	0.94	Q	0.95
90	AGAL003.059-00.077_B	3.06	-0.08	Q	0.76	Q	0.71
91	AGAL003.093+00.422_S	3.09	0.42	Q	0.92	Q	0.94
92	AGAL003.101+00.294_A	3.10	0.29	Q	0.85	Q	0.92
93	AGAL003.101+00.294_B	3.10	0.29	Q	0.70	Q	0.72
94	AGAL003.121+00.306_S	3.12	0.31	Q	0.74	Q	0.86
95	AGAL003.121+00.416_S	3.12	0.42	Q	0.94	Q	0.96
96	AGAL003.131+00.426_S	3.13	0.43	Q	0.85	Q	0.90
97	AGAL003.141+00.427_A	3.14	0.43	Q	0.85	Q	0.87
98	AGAL003.141+00.427_B	3.14	0.43	Q	0.92	Q	0.94
99	AGAL003.158+00.391_A	3.16	0.39	Q	0.84	Q	0.89
100	AGAL003.158+00.391_B	3.16	0.39	Q	0.81	Q	0.85
101	AGAL003.163+00.559_A	3.16	0.56	Q	0.95	Q	0.94
102	AGAL003.163+00.559_B	3.16	0.56	Q	0.82	Q	0.87
103	AGAL003.179+00.542_A	3.18	0.54	Q	0.94	Q	0.95

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
104	AGAL003.179+00.542_B	3.18	0.54	Q	0.81	Q	0.88
105	AGAL003.199+00.639_S	3.20	0.64	Q	0.95	Q	0.93
106	AGAL003.203+00.502_S	3.20	0.50	Q	0.92	Q	0.92
107	AGAL003.213+00.646_S	3.21	0.65	Q	0.90	Q	0.93
108	AGAL003.219+00.264_S	3.22	0.26	Q	0.84	Q	0.92
109	AGAL003.219+00.619_S	3.22	0.62	Q	0.88	Q	0.92
110	AGAL003.228+00.491_A	3.23	0.49	Q	0.94	Q	0.92
111	AGAL003.228+00.491_B	3.23	0.49	Q	0.81	Q	0.90
112	AGAL003.233+00.264_A	3.23	0.26	Q	0.94	Q	0.92
113	AGAL003.233+00.264_B	3.23	0.26	Q	0.88	Q	0.87
114	AGAL003.264+00.482_S	3.26	0.48	Q	0.92	Q	0.97
115	AGAL003.271+00.444_A	3.27	0.44	Q	0.98	Q	0.97
116	AGAL003.271+00.444_B	3.27	0.44	Q	0.75	Q	0.86
117	AGAL003.274+00.581_S	3.27	0.58	Q	0.91	Q	0.91
118	AGAL003.283+00.591_S	3.28	0.59	Q	0.82	Q	0.83
119	AGAL003.288+00.454_S	3.29	0.45	Q	0.95	Q	0.97
120	AGAL003.289+00.574_S	3.29	0.57	Q	0.86	Q	0.80
121	AGAL003.306+00.346_S	3.31	0.35	Q	0.65	Q	0.67
122	AGAL003.326+00.441_A	3.33	0.44	Q	0.93	Q	0.94
123	AGAL003.326+00.441_B	3.33	0.44	Q	0.77	Q	0.83
124	AGAL003.348+00.436_A	3.35	0.44	Q	0.97	Q	0.95
125	AGAL003.348+00.436_B	3.35	0.44	Q	0.74	Q	0.77
126	AGAL003.386+00.307_S	3.39	0.31	Q	0.86	Q	0.89
127	AGAL004.091+00.047_S	4.09	0.05	Q	0.72	Q	0.73
128	AGAL004.498-00.811_S	4.50	-0.81	Q	0.70	Q	0.79
129	AGAL006.221-00.116_S	6.22	-0.12	Q	0.66	Q	0.79
130	AGAL006.498-00.322_S	6.50	-0.32	Q	0.74	Q	0.71
131	AGAL006.556-00.259_S	6.56	-0.26	Q	0.89	Q	0.86
132	AGAL006.581-00.306_S	6.58	-0.31	Q	0.75	Q	0.86
133	AGAL007.346-00.001_S	7.35	-0.00	Q	0.78	Q	0.60
134	AGAL007.436-00.281_S	7.44	-0.28	Q	0.77	Q	0.83
135	AGAL008.384-00.267_S	8.38	-0.27	Q	0.55	Q	0.60
136	AGAL008.965-00.536_S	8.96	-0.54	Q	0.75	Q	0.82
137	AGAL009.858-00.102_S	9.86	-0.10	Q	0.67	Q	0.68
138	*AGAL010.051-00.211_S	10.05	-0.21	A	0.59	Q	0.63
139	AGAL010.198-00.372_S	10.20	-0.37	A	0.56	A	0.65

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
140	AGAL010.219-00.366_S	10.22	-0.37	Q	0.53	Q	0.51
141	AGAL010.224-00.186_S	10.22	-0.19	Q	0.76	Q	0.75
142	AGAL010.579-00.349_S	10.58	-0.35	Q	0.84	Q	0.84
143	AGAL010.659-00.326_S	10.66	-0.33	Q	0.53	Q	0.66
144	AGAL010.982-00.367_S	10.98	-0.37	Q	0.66	Q	0.69
145	AGAL011.001-00.372_S	11.00	-0.37	Q	0.91	Q	0.86
146	AGAL012.661-00.166_A	12.66	-0.17	Q	0.76	Q	0.81
147	AGAL012.661-00.166_B	12.66	-0.17	Q	0.77	Q	0.84
148	AGAL012.776-00.337_A	12.78	-0.34	Q	0.86	Q	0.83
149	AGAL012.776-00.337_B	12.78	-0.34	Q	0.90	Q	0.81
150	AGAL012.899-00.241_S	12.90	-0.24	A	0.58	A	0.71
151	AGAL012.929-00.319_S	12.93	-0.32	Q	0.51	Q	0.54
152	AGAL013.891-00.121_A	13.89	-0.12	Q	0.60	Q	0.72
153	AGAL013.891-00.121_B	13.89	-0.12	Q	0.58	Q	0.69
154	AGAL014.192-00.166_S	14.19	-0.17	A	0.52	A	0.64
155	AGAL014.776-00.457_S	14.78	-0.46	Q	0.86	Q	0.88
156	AGAL018.898-00.499_S	18.90	-0.50	A	0.56	A	0.65
157	AGAL284.252-00.337_S	284.25	-0.34	Q	0.51	Q	0.56
158	AGAL301.081+00.936_S	301.08	0.94	Q	0.70	Q	0.58
159	AGAL301.668-00.246_S	301.67	-0.25	Q	0.92	Q	0.82
160	AGAL301.724+01.099_S	301.72	1.10	Q	0.74	Q	0.68
161	AGAL304.712+00.601_S	304.71	0.60	Q	0.70	Q	0.54
162	AGAL305.174+00.221_S	305.17	0.22	Q	0.64	Q	0.73
163	AGAL305.259+00.326_S	305.26	0.33	Q	0.50	Q	0.51
164	AGAL305.271-00.029_S	305.27	-0.03	P	0.54	P	0.68
165	AGAL305.346+00.212_S	305.35	0.21	P	0.65	P	0.75
166	AGAL305.589+00.462_S	305.59	0.46	Q	0.58	Q	0.65
167	AGAL306.339-00.309_S	306.34	-0.31	Q	0.60	Q	0.63
168	AGAL309.146-00.389_S	309.15	-0.39	Q	0.74	Q	0.78
169	AGAL309.169-00.344_S	309.17	-0.34	Q	0.57	Q	0.62
170	AGAL311.449+00.379_A	311.45	0.38	Q	0.86	Q	0.81
171	AGAL311.449+00.379_B	311.45	0.38	Q	0.75	Q	0.79
172	AGAL311.834+00.074_S	311.83	0.07	Q	0.76	Q	0.67
173	AGAL311.924+00.224_S	311.92	0.22	P	0.62	P	0.72
174	AGAL314.296+00.101_S	314.30	0.10	A	0.69	A	0.77
175	AGAL316.786-00.037_S	316.79	-0.04	A	0.59	A	0.52

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF Класс.	RF Вероят.	GB Класс.	GB Вероят.
176	AGAL317.339+00.106_S	317.34	0.11	Q	0.57	Q	0.61
177	*AGAL317.441-00.374_S	317.44	-0.37	Q	0.50	A	0.58
178	AGAL320.249+00.444_S	320.25	0.44	H	0.66	H	0.59
179	AGAL320.322-00.194_S	320.32	-0.19	P	0.58	P	0.89
180	AGAL321.069-00.514_S	321.07	-0.51	P	0.77	P	0.90
181	AGAL323.801+00.004_S	323.80	0.00	Q	0.85	Q	0.86
182	AGAL326.282-00.592_S	326.28	-0.59	Q	0.72	Q	0.78
183	AGAL326.491+00.882_S	326.49	0.88	Q	0.59	Q	0.75
184	AGAL326.632+00.532_S	326.63	0.53	P	0.80	P	0.86
185	AGAL326.762+00.542_S	326.76	0.54	Q	0.81	Q	0.83
186	AGAL326.789-00.127_S	326.79	-0.13	Q	0.68	Q	0.77
187	AGAL326.932-00.312_S	326.93	-0.31	Q	0.62	Q	0.79
188	AGAL326.954-00.012_S	326.95	-0.01	A	0.86	A	0.75
189	AGAL327.129+00.526_S	327.13	0.53	Q	0.88	Q	0.80
190	*AGAL327.216-00.494_S	327.22	-0.49	Q	0.57	A	0.51
191	AGAL327.231-00.504_S	327.23	-0.50	P	0.53	P	0.59
192	AGAL327.746-00.409_S	327.75	-0.41	Q	0.59	Q	0.59
193	AGAL327.804-00.661_S	327.80	-0.66	Q	0.84	Q	0.79
194	AGAL328.136+00.564_S	328.14	0.56	Q	0.60	Q	0.66
195	AGAL328.208-00.586_S	328.21	-0.59	P	0.76	P	0.79
196	AGAL328.296-00.549_S	328.30	-0.55	A	0.74	A	0.75
197	AGAL328.316-00.564_S	328.32	-0.56	Q	0.55	Q	0.67
198	AGAL328.368-00.559_S	328.37	-0.56	A	0.55	A	0.61
199	AGAL328.371-00.536_S	328.37	-0.54	Q	0.63	Q	0.64
200	AGAL330.001+01.037_A	330.00	1.04	Q	0.80	Q	0.85
201	AGAL330.001+01.037_B	330.00	1.04	Q	0.84	Q	0.84
202	AGAL330.043+00.920_S	330.04	0.92	Q	0.64	Q	0.54
203	AGAL330.369+00.524_S	330.37	0.52	Q	0.52	Q	0.63
204	AGAL330.588+00.006_S	330.59	0.01	Q	0.59	Q	0.64
205	AGAL330.646-00.176_S	330.65	-0.18	Q	0.65	Q	0.74
206	AGAL330.929-00.287_S	330.93	-0.29	A	0.74	A	0.72
207	AGAL330.966-00.207_S	330.97	-0.21	Q	0.86	Q	0.86
208	AGAL330.971-00.154_S	330.97	-0.15	Q	0.56	Q	0.55
209	AGAL330.979-00.192_S	330.98	-0.19	Q	0.63	Q	0.55
210	AGAL331.051-00.419_S	331.05	-0.42	Q	0.68	Q	0.85
211	AGAL331.076-00.179_S	331.08	-0.18	Q	0.58	Q	0.51

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
212	AGAL331.104-00.227_S	331.10	-0.23	Q	0.82	Q	0.78
213	AGAL331.188-00.462_S	331.19	-0.46	Q	0.57	Q	0.66
214	AGAL331.229-00.226_A	331.23	-0.23	Q	0.65	Q	0.64
215	AGAL331.229-00.226_B	331.23	-0.23	Q	0.60	Q	0.58
216	AGAL331.392-00.114_S	331.39	-0.11	Q	0.77	Q	0.75
217	AGAL331.394-00.394_S	331.39	-0.39	Q	0.79	Q	0.70
218	AGAL331.396-00.001_S	331.40	-0.00	Q	0.80	Q	0.80
219	AGAL331.418-00.262_S	331.42	-0.26	Q	0.65	Q	0.74
220	AGAL331.419-00.161_S	331.42	-0.16	Q	0.69	Q	0.69
221	AGAL331.419-00.156_S	331.42	-0.16	Q	0.86	Q	0.81
222	AGAL331.422-00.279_S	331.42	-0.28	Q	0.65	Q	0.68
223	AGAL331.429-00.137_S	331.43	-0.14	Q	0.76	Q	0.72
224	AGAL331.472-00.102_S	331.47	-0.10	Q	0.67	Q	0.81
225	AGAL331.524-00.289_A	331.52	-0.29	Q	0.70	Q	0.70
226	AGAL331.524-00.289_B	331.52	-0.29	Q	0.77	Q	0.74
227	AGAL331.989-00.126_S	331.99	-0.13	Q	0.94	Q	0.89
228	*AGAL332.112+00.926_S	332.11	0.93	Q	0.59	A	0.52
229	AGAL332.129+00.102_A	332.13	0.10	Q	0.73	Q	0.79
230	AGAL332.129+00.102_B	332.13	0.10	Q	0.66	Q	0.78
231	AGAL332.199+00.597_S	332.20	0.60	Q	0.66	Q	0.62
232	AGAL332.571-00.581_S	332.57	-0.58	Q	0.82	Q	0.73
233	AGAL332.751-00.597_S	332.75	-0.60	P	0.77	P	0.93
234	AGAL332.751-00.562_S	332.75	-0.56	P	0.63	P	0.81
235	AGAL332.757-00.466_S	332.76	-0.47	Q	0.80	Q	0.84
236	AGAL332.957-00.011_S	332.96	-0.01	Q	0.85	Q	0.71
237	AGAL332.974-00.411_S	332.97	-0.41	P	0.64	P	0.62
238	AGAL332.976-00.032_S	332.98	-0.03	Q	0.76	Q	0.85
239	AGAL332.980-00.031_S	332.98	-0.03	Q	0.85	Q	0.72
240	AGAL332.989-00.417_S	332.99	-0.42	P	0.67	P	0.82
241	AGAL333.029-00.026_S	333.03	-0.03	P	0.65	P	0.66
242	AGAL333.069+00.056_S	333.07	0.06	Q	0.60	Q	0.61
243	AGAL333.073-00.572_S	333.07	-0.57	Q	0.79	Q	0.76
244	AGAL333.091-00.554_S	333.09	-0.55	Q	0.56	Q	0.81
245	AGAL333.103-00.502_S	333.10	-0.50	Q	0.50	Q	0.54
246	AGAL333.124+00.006_S	333.12	0.01	Q	0.94	Q	0.77
247	AGAL333.236+00.031_A	333.24	0.03	A	0.51	A	0.60

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
248	AGAL333.391+00.059_A	333.39	0.06	Q	0.92	Q	0.79
249	AGAL333.391+00.059_B	333.39	0.06	Q	0.93	Q	0.79
250	AGAL333.471-00.486_S	333.47	-0.49	A	0.73	A	0.78
251	AGAL333.568+00.029_S	333.57	0.03	A	0.54	A	0.56
252	AGAL333.583+00.089_S	333.58	0.09	Q	0.80	Q	0.79
253	AGAL333.711-00.406_S	333.71	-0.41	Q	0.71	Q	0.78
254	AGAL333.711-00.217_S	333.71	-0.22	Q	0.64	Q	0.58
255	AGAL333.991+00.086_S	333.99	0.09	Q	0.62	Q	0.51
256	AGAL334.182+00.044_S	334.18	0.04	Q	0.69	Q	0.71
257	AGAL334.666+00.454_S	334.67	0.45	Q	0.72	Q	0.73
258	AGAL334.668+00.474_S	334.67	0.47	Q	0.80	Q	0.70
259	AGAL334.669+00.441_S	334.67	0.44	Q	0.52	Q	0.68
260	AGAL334.949-00.067_S	334.95	-0.07	Q	0.64	Q	0.55
261	AGAL334.994-00.042_S	334.99	-0.04	Q	0.79	Q	0.80
262	AGAL335.331+00.391_S	335.33	0.39	Q	0.80	Q	0.82
263	AGAL335.364+00.406_S	335.36	0.41	Q	0.87	Q	0.83
264	AGAL335.702-00.819_S	335.70	-0.82	Q	0.55	Q	0.58
265	AGAL335.841-00.097_S	335.84	-0.10	Q	0.91	Q	0.80
266	AGAL336.341-00.164_S	336.34	-0.16	Q	0.84	Q	0.84
267	AGAL336.446-00.219_S	336.45	-0.22	Q	0.79	Q	0.64
268	AGAL336.743+00.107_S	336.74	0.11	P	0.63	P	0.74
269	AGAL336.771+00.047_S	336.77	0.05	P	0.54	P	0.63
270	AGAL336.791+00.062_S	336.79	0.06	H	0.51	H	0.53
271	AGAL336.831+00.131_S	336.83	0.13	Q	0.68	Q	0.61
272	AGAL336.841+00.021_S	336.84	0.02	P	0.82	P	0.79
273	AGAL336.859+00.291_S	336.86	0.29	Q	0.90	Q	0.85
274	AGAL336.958-00.224_S	336.96	-0.22	Q	0.78	Q	0.78
275	AGAL336.964-00.247_S	336.96	-0.25	Q	0.90	Q	0.85
276	AGAL336.969-00.156_S	336.97	-0.16	P	0.64	P	0.83
277	AGAL336.973+00.142_S	336.97	0.14	Q	0.59	Q	0.72
278	AGAL336.976-00.219_S	336.98	-0.22	Q	0.56	Q	0.58
279	AGAL337.141-00.152_S	337.14	-0.15	Q	0.60	Q	0.70
280	AGAL337.152-00.062_S	337.15	-0.06	Q	0.81	Q	0.82
281	AGAL337.176+00.126_S	337.18	0.13	Q	0.69	Q	0.61
282	AGAL337.192-00.037_S	337.19	-0.04	Q	0.75	Q	0.80
283	AGAL337.206-00.074_S	337.21	-0.07	Q	0.74	Q	0.87

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
284	AGAL337.272-00.071_S	337.27	-0.07	Q	0.80	Q	0.77
285	AGAL337.334-00.111_S	337.33	-0.11	Q	0.70	Q	0.57
286	AGAL337.341-00.141_S	337.34	-0.14	Q	0.82	Q	0.77
287	AGAL337.342-00.119_S	337.34	-0.12	Q	0.79	Q	0.81
288	AGAL337.348-00.159_S	337.35	-0.16	Q	0.73	Q	0.56
289	AGAL337.451-00.382_S	337.45	-0.38	A	0.75	A	0.73
290	AGAL337.511+00.091_S	337.51	0.09	Q	0.73	Q	0.76
291	AGAL337.602-00.034_S	337.60	-0.03	A	0.62	A	0.55
292	AGAL337.632+00.144_S	337.63	0.14	Q	0.68	Q	0.55
293	AGAL337.669-00.044_S	337.67	-0.04	Q	0.71	Q	0.68
294	AGAL337.739+00.092_S	337.74	0.09	Q	0.74	Q	0.79
295	*AGAL337.794-00.002_S	337.79	-0.00	Q	0.55	A	0.52
296	AGAL337.942-00.006_S	337.94	-0.01	H	0.58	H	0.59
297	AGAL337.946+00.012_S	337.95	0.01	Q	0.68	Q	0.57
298	AGAL337.987+00.024_S	337.99	0.02	Q	0.51	Q	0.51
299	AGAL338.007-00.004_A	338.01	-0.00	Q	0.51	Q	0.57
300	AGAL338.007-00.004_B	338.01	-0.00	Q	0.50	Q	0.57
301	AGAL338.024-00.019_S	338.02	-0.02	Q	0.86	Q	0.82
302	AGAL338.036-00.042_S	338.04	-0.04	Q	0.69	Q	0.79
303	AGAL338.091-00.191_S	338.09	-0.19	Q	0.65	Q	0.62
304	AGAL338.094-00.011_S	338.09	-0.01	Q	0.88	Q	0.78
305	AGAL338.114+00.006_S	338.11	0.01	Q	0.54	Q	0.61
306	AGAL338.131+00.099_S	338.13	0.10	Q	0.73	Q	0.87
307	AGAL338.147+00.109_S	338.15	0.11	Q	0.77	Q	0.87
308	AGAL338.402+00.032_S	338.40	0.03	A	0.60	A	0.52
309	AGAL338.446-00.006_A	338.45	-0.01	P	0.69	P	0.58
310	AGAL338.446+00.044_A	338.45	0.04	A	0.73	A	0.63
311	AGAL338.446+00.044_B	338.45	0.04	A	0.54	A	0.57
312	AGAL338.494+00.044_S	338.49	0.04	Q	0.57	Q	0.65
313	AGAL338.552+00.011_A	338.55	0.01	Q	0.64	Q	0.65
314	AGAL338.552+00.011_B	338.55	0.01	Q	0.58	Q	0.64
315	AGAL338.561-00.012_A	338.56	-0.01	Q	0.77	Q	0.80
316	AGAL338.561-00.012_B	338.56	-0.01	Q	0.79	Q	0.80
317	AGAL338.621+00.022_S	338.62	0.02	Q	0.70	Q	0.79
318	AGAL338.786+00.476_S	338.79	0.48	Q	0.85	Q	0.89
319	AGAL338.834+00.479_S	338.83	0.48	Q	0.80	Q	0.68

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
320	AGAL338.889+00.394_A	338.89	0.39	Q	0.86	Q	0.91
321	AGAL338.889+00.394_B	338.89	0.39	Q	0.89	Q	0.90
322	AGAL338.929-00.081_S	338.93	-0.08	P	0.72	P	0.56
323	AGAL338.949+00.531_S	338.95	0.53	Q	0.76	Q	0.86
324	AGAL339.444+00.092_S	339.44	0.09	Q	0.68	Q	0.54
325	AGAL339.548-00.129_S	339.55	-0.13	Q	0.59	Q	0.70
326	AGAL339.608-00.116_S	339.61	-0.12	Q	0.58	Q	0.70
327	AGAL340.094-00.316_S	340.09	-0.32	A	0.62	A	0.71
328	AGAL340.096-00.022_S	340.10	-0.02	Q	0.60	Q	0.70
329	AGAL340.206-00.049_S	340.21	-0.05	Q	0.68	Q	0.79
330	AGAL340.212-00.022_S	340.21	-0.02	P	0.57	P	0.52
331	AGAL340.226-00.017_S	340.23	-0.02	Q	0.64	Q	0.67
332	AGAL340.274-00.029_S	340.27	-0.03	Q	0.64	Q	0.59
333	AGAL340.284-00.072_S	340.28	-0.07	Q	0.63	Q	0.65
334	AGAL340.299-00.222_S	340.30	-0.22	A	0.56	A	0.62
335	AGAL340.311+00.557_S	340.31	0.56	Q	0.62	Q	0.64
336	AGAL340.618-00.646_S	340.62	-0.65	Q	0.91	Q	0.83
337	AGAL340.636-00.664_S	340.64	-0.66	Q	0.75	Q	0.77
338	AGAL340.719-00.976_S	340.72	-0.98	Q	0.74	Q	0.74
339	AGAL340.724-00.979_S	340.72	-0.98	Q	0.76	Q	0.81
340	AGAL340.901-00.346_S	340.90	-0.35	Q	0.72	Q	0.69
341	AGAL340.984-00.352_S	340.98	-0.35	Q	0.86	Q	0.79
342	AGAL341.009-00.361_S	341.01	-0.36	Q	0.61	Q	0.73
343	AGAL341.172-00.256_S	341.17	-0.26	Q	0.87	Q	0.85
344	AGAL341.211-00.271_S	341.21	-0.27	Q	0.68	Q	0.84
345	AGAL341.267-00.287_S	341.27	-0.29	Q	0.62	Q	0.84
346	AGAL341.721+00.059_S	341.72	0.06	Q	0.85	Q	0.80
347	AGAL342.156+00.436_S	342.16	0.44	Q	0.92	Q	0.91
348	AGAL342.273+00.489_A	342.27	0.49	Q	0.70	Q	0.73
349	AGAL342.273+00.489_B	342.27	0.49	Q	0.62	Q	0.71
350	AGAL342.916-00.141_S	342.92	-0.14	Q	0.58	Q	0.53
351	AGAL343.498+00.009_S	343.50	0.01	P	0.77	P	0.86
352	AGAL343.522-00.077_S	343.52	-0.08	Q	0.68	Q	0.65
353	AGAL343.877+00.106_S	343.88	0.11	Q	0.88	Q	0.90
354	AGAL344.112-00.637_S	344.11	-0.64	Q	0.52	Q	0.61
355	AGAL344.194-00.617_S	344.19	-0.62	Q	0.78	Q	0.76

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
356	AGAL344.224-00.674_S	344.22	-0.67	Q	0.76	Q	0.76
357	AGAL344.809-00.632_S	344.81	-0.63	Q	0.64	Q	0.79
358	AGAL345.196-00.744_S	345.20	-0.74	A	0.67	A	0.79
359	AGAL345.389-00.932_S	345.39	-0.93	P	0.58	P	0.73
360	AGAL345.439-00.941_S	345.44	-0.94	H	0.76	H	0.72
361	AGAL345.503-00.032_S	345.50	-0.03	Q	0.59	Q	0.65
362	AGAL345.639-00.006_S	345.64	-0.01	Q	0.83	Q	0.81
363	AGAL346.486+00.146_S	346.49	0.15	Q	0.86	Q	0.80
364	AGAL347.234+00.032_S	347.23	0.03	P	0.62	P	0.61
365	AGAL347.611+00.256_S	347.61	0.26	Q	0.62	Q	0.63
366	AGAL347.627+00.122_S	347.63	0.12	Q	0.58	Q	0.76
367	AGAL347.993-00.431_S	347.99	-0.43	Q	0.76	Q	0.56
368	AGAL348.121+00.271_S	348.12	0.27	Q	0.64	Q	0.54
369	AGAL348.148+00.469_S	348.15	0.47	Q	0.60	Q	0.74
370	AGAL348.156+00.506_S	348.16	0.51	Q	0.68	Q	0.70
371	AGAL348.626-00.907_S	348.63	-0.91	A	0.51	A	0.64
372	AGAL348.676-01.051_S	348.68	-1.05	P	0.53	P	0.64
373	AGAL348.749-00.986_S	348.75	-0.99	A	0.50	A	0.61
374	AGAL348.896+00.111_S	348.90	0.11	Q	0.76	Q	0.83
375	AGAL349.168+00.072_S	349.17	0.07	Q	0.78	Q	0.76
376	AGAL349.812-00.517_S	349.81	-0.52	P	0.70	P	0.69
377	AGAL350.002-00.552_S	350.00	-0.55	Q	0.79	Q	0.85
378	AGAL350.016-00.534_S	350.02	-0.53	Q	0.69	Q	0.78
379	AGAL350.126+00.112_S	350.13	0.11	Q	0.74	Q	0.79
380	AGAL350.154+00.009_S	350.15	0.01	Q	0.88	Q	0.85
381	AGAL350.176+00.036_S	350.18	0.04	Q	0.72	Q	0.79
382	AGAL350.184+00.002_S	350.18	0.00	Q	0.63	Q	0.80
383	*AGAL350.201+00.036_S	350.20	0.04	A	0.51	Q	0.52
384	AGAL350.354+00.144_S	350.35	0.14	Q	0.73	Q	0.79
385	AGAL350.367+00.189_S	350.37	0.19	Q	0.64	Q	0.83
386	AGAL350.499-00.394_S	350.50	-0.39	Q	0.77	Q	0.77
387	AGAL350.539-00.369_S	350.54	-0.37	Q	0.76	Q	0.79
388	AGAL350.544+00.957_S	350.54	0.96	Q	0.55	Q	0.80
389	AGAL350.566+00.949_S	350.57	0.95	Q	0.76	Q	0.87
390	AGAL350.581+00.367_S	350.58	0.37	Q	0.68	Q	0.83
391	AGAL350.729+00.927_S	350.73	0.93	Q	0.72	Q	0.74

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
392	AGAL350.736+00.859_S	350.74	0.86	Q	0.57	Q	0.64
393	AGAL350.961+00.552_S	350.96	0.55	A	0.58	A	0.50
394	AGAL350.961+00.741_S	350.96	0.74	Q	0.71	Q	0.66
395	AGAL350.967+00.546_S	350.97	0.55	Q	0.54	Q	0.57
396	AGAL351.141+00.776_S	351.14	0.78	P	0.63	P	0.80
397	AGAL351.159+00.749_S	351.16	0.75	P	0.62	P	0.74
398	AGAL351.173+00.661_S	351.17	0.66	P	0.65	P	0.81
399	AGAL351.308+00.684_S	351.31	0.68	P	0.89	P	0.95
400	AGAL351.353+00.696_S	351.35	0.70	P	0.60	P	0.54
401	*AGAL351.409+00.567_S	351.41	0.57	Q	0.53	P	0.50
402	AGAL351.414+00.594_S	351.41	0.59	P	0.60	P	0.86
403	*AGAL351.421+00.551_S	351.42	0.55	Q	0.57	P	0.52
404	AGAL351.456+00.666_S	351.46	0.67	Q	0.73	Q	0.90
405	AGAL351.461+00.644_S	351.46	0.64	Q	0.77	Q	0.76
406	AGAL351.466+00.591_S	351.47	0.59	Q	0.67	Q	0.80
407	AGAL351.466+00.682_S	351.47	0.68	Q	0.59	Q	0.85
408	AGAL351.469+00.672_S	351.47	0.67	Q	0.58	Q	0.74
409	*AGAL351.491+00.691_S	351.49	0.69	Q	0.52	P	0.51
410	AGAL351.498+00.646_S	351.50	0.65	Q	0.57	Q	0.71
411	AGAL351.766+00.212_S	351.77	0.21	Q	0.78	Q	0.80
412	AGAL351.784+00.212_S	351.78	0.21	Q	0.70	Q	0.57
413	AGAL351.804+00.622_S	351.80	0.62	Q	0.64	Q	0.73
414	AGAL352.113+00.191_S	352.11	0.19	Q	0.83	Q	0.82
415	AGAL352.181-00.154_S	352.18	-0.15	Q	0.86	Q	0.77
416	AGAL352.219-00.087_S	352.22	-0.09	Q	0.58	Q	0.56
417	AGAL352.442-00.182_S	352.44	-0.18	Q	0.71	Q	0.78
418	AGAL352.471+00.794_S	352.47	0.79	Q	0.83	Q	0.85
419	AGAL352.472-00.187_A	352.47	-0.19	Q	0.77	Q	0.78
420	AGAL352.472-00.187_B	352.47	-0.19	Q	0.72	Q	0.77
421	AGAL352.964+00.956_S	352.96	0.96	A	0.50	A	0.60
422	AGAL352.992+00.921_S	352.99	0.92	P	0.83	P	0.92
423	AGAL352.996+00.554_S	353.00	0.55	Q	0.64	Q	0.72
424	AGAL352.999+00.574_S	353.00	0.57	P	0.77	P	0.90
425	AGAL353.019+00.547_S	353.02	0.55	Q	0.64	Q	0.68
426	AGAL353.051+00.446_S	353.05	0.45	P	0.86	P	0.96
427	AGAL353.062+00.406_S	353.06	0.41	P	0.73	P	0.72

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
428	AGAL353.076+00.441_S	353.08	0.44	Q	0.59	Q	0.65
429	AGAL353.079+00.981_S	353.08	0.98	Q	0.53	Q	0.63
430	AGAL353.084+00.436_S	353.08	0.44	A	0.61	A	0.66
431	AGAL353.121+00.952_S	353.12	0.95	P	0.82	P	0.92
432	AGAL353.127+00.614_S	353.13	0.61	P	0.55	P	0.84
433	AGAL353.142+00.631_S	353.14	0.63	P	0.66	P	0.86
434	AGAL353.149+00.961_S	353.15	0.96	P	0.61	P	0.77
435	AGAL353.229+00.672_S	353.23	0.67	P	0.89	P	0.94
436	AGAL353.296+00.637_S	353.30	0.64	P	0.68	P	0.87
437	AGAL353.309+00.661_S	353.31	0.66	P	0.82	P	0.93
438	AGAL353.354-00.109_A	353.35	-0.11	Q	0.81	Q	0.83
439	AGAL353.354-00.109_B	353.35	-0.11	Q	0.82	Q	0.83
440	AGAL353.429-00.097_A	353.43	-0.10	Q	0.81	Q	0.77
441	AGAL353.429-00.097_B	353.43	-0.10	Q	0.77	Q	0.73
442	AGAL353.556+00.652_S	353.56	0.65	Q	0.73	Q	0.67
443	AGAL354.326+00.466_S	354.33	0.47	Q	0.83	Q	0.87
444	AGAL354.341+00.474_S	354.34	0.47	Q	0.80	Q	0.91
445	AGAL354.363+00.476_S	354.36	0.48	Q	0.83	Q	0.94
446	AGAL354.554+00.019_S	354.55	0.02	Q	0.63	Q	0.85
447	AGAL354.659+00.507_S	354.66	0.51	Q	0.77	Q	0.75
448	AGAL354.688+00.544_S	354.69	0.54	Q	0.71	Q	0.75
449	AGAL354.714+00.322_B	354.71	0.32	Q	0.67	Q	0.59
450	AGAL354.716+00.554_S	354.72	0.55	Q	0.72	Q	0.64
451	AGAL354.766+00.359_A	354.77	0.36	Q	0.62	Q	0.73
452	AGAL354.766+00.359_B	354.77	0.36	Q	0.73	Q	0.75
453	AGAL354.769+00.394_S	354.77	0.39	Q	0.73	Q	0.80
454	AGAL354.834+00.377_A	354.83	0.38	Q	0.87	Q	0.94
455	AGAL354.834+00.377_B	354.83	0.38	Q	0.85	Q	0.84
456	AGAL354.838+00.372_S	354.84	0.37	Q	0.79	Q	0.94
457	AGAL354.843+00.351_A	354.84	0.35	Q	0.63	Q	0.79
458	AGAL354.843+00.351_B	354.84	0.35	Q	0.63	Q	0.74
459	AGAL354.854+00.341_S	354.85	0.34	Q	0.63	Q	0.82
460	AGAL355.514-00.097_S	355.51	-0.10	Q	0.64	Q	0.78
461	AGAL355.606-00.054_S	355.61	-0.05	Q	0.84	Q	0.84
462	AGAL355.628-00.067_S	355.63	-0.07	Q	0.82	Q	0.85
463	AGAL355.638-00.057_S	355.64	-0.06	Q	0.78	Q	0.67

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
464	AGAL356.226+00.706_S	356.23	0.71	Q	0.60	Q	0.68
465	AGAL356.367+00.239_S	356.37	0.24	Q	0.84	Q	0.79
466	AGAL358.186-00.012_S	358.19	-0.01	Q	0.79	Q	0.75
467	AGAL358.564-00.797_S	358.56	-0.80	Q	0.79	Q	0.76
468	AGAL358.576-00.191_S	358.58	-0.19	Q	0.61	Q	0.70
469	AGAL358.704-00.101_S	358.70	-0.10	Q	0.60	Q	0.66
470	AGAL358.721-00.129_A	358.72	-0.13	Q	0.54	Q	0.61
471	AGAL358.721-00.129_B	358.72	-0.13	Q	0.70	Q	0.71
472	AGAL358.721-00.109_S	358.72	-0.11	Q	0.55	Q	0.68
473	AGAL358.734-00.116_S	358.73	-0.12	Q	0.71	Q	0.51
474	AGAL358.779-00.117_A	358.78	-0.12	Q	0.85	Q	0.84
475	AGAL358.779-00.117_B	358.78	-0.12	Q	0.90	Q	0.87
476	AGAL358.796-00.136_A	358.80	-0.14	Q	0.89	Q	0.87
477	AGAL358.796-00.136_B	358.80	-0.14	Q	0.93	Q	0.83
478	AGAL358.798-00.117_A	358.80	-0.12	Q	0.71	Q	0.70
479	AGAL358.798-00.117_B	358.80	-0.12	Q	0.87	Q	0.86
480	AGAL358.808-00.131_A	358.81	-0.13	Q	0.92	Q	0.91
481	AGAL358.808-00.131_B	358.81	-0.13	Q	0.84	Q	0.91
482	AGAL358.887-00.354_S	358.89	-0.35	Q	0.78	Q	0.82
483	AGAL359.196+00.174_A	359.20	0.17	Q	0.91	Q	0.92
484	AGAL359.196+00.174_B	359.20	0.17	Q	0.86	Q	0.87
485	AGAL359.199+00.171_S	359.20	0.17	Q	0.76	Q	0.82
486	AGAL359.201-00.076_A	359.20	-0.08	Q	0.90	Q	0.97
487	AGAL359.201-00.076_B	359.20	-0.08	Q	0.77	Q	0.90
488	AGAL359.217+00.181_A	359.22	0.18	Q	0.70	Q	0.75
489	AGAL359.217+00.181_B	359.22	0.18	Q	0.56	Q	0.72
490	AGAL359.281-00.079_A	359.28	-0.08	Q	0.83	Q	0.89
491	AGAL359.361-00.009_S	359.36	-0.01	Q	0.80	Q	0.87
492	AGAL359.369-00.029_A	359.37	-0.03	Q	0.77	Q	0.82
493	AGAL359.369-00.029_B	359.37	-0.03	Q	0.53	Q	0.64
494	AGAL359.422+00.024_S	359.42	0.02	Q	0.57	Q	0.59
495	AGAL359.424-00.171_A	359.42	-0.17	Q	0.80	Q	0.86
496	AGAL359.424-00.171_B	359.42	-0.17	Q	0.78	Q	0.84
497	AGAL359.477+00.136_S	359.48	0.14	Q	0.74	Q	0.72
498	AGAL359.482+00.132_S	359.48	0.13	Q	0.96	Q	0.95
499	AGAL359.489-00.214_A	359.49	-0.21	Q	0.88	Q	0.90

Продолжение на следующей странице

Таблица 9 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
500	AGAL359.489-00.214_B	359.49	-0.21	Q	0.80	Q	0.82
501	AGAL359.502+00.116_S	359.50	0.12	Q	0.74	Q	0.60
502	AGAL359.524+00.134_S	359.52	0.13	Q	0.81	Q	0.84
503	AGAL359.536-00.184_S	359.54	-0.18	Q	0.91	Q	0.92
504	AGAL359.566-00.161_A	359.57	-0.16	Q	0.86	Q	0.92
505	AGAL359.566-00.161_B	359.57	-0.16	Q	0.65	Q	0.71
506	AGAL359.572-00.174_A	359.57	-0.17	Q	0.78	Q	0.90
507	AGAL359.572-00.174_B	359.57	-0.17	Q	0.74	Q	0.57
508	AGAL359.597+00.016_A	359.60	0.02	Q	0.62	Q	0.80
509	AGAL359.599-00.221_A	359.60	-0.22	Q	0.52	Q	0.72
510	AGAL359.599-00.221_B	359.60	-0.22	Q	0.60	Q	0.90
511	AGAL359.704-00.036_A	359.70	-0.04	Q	0.68	Q	0.85
512	AGAL359.742+00.031_A	359.74	0.03	Q	0.66	Q	0.86
513	AGAL359.742+00.031_B	359.74	0.03	Q	0.89	Q	0.94
514	AGAL359.764-00.119_S	359.76	-0.12	Q	0.80	Q	0.93
515	AGAL359.887+00.031_A	359.89	0.03	Q	0.59	Q	0.83
516	AGAL359.912-00.129_S	359.91	-0.13	Q	0.89	Q	0.91
517	AGAL359.916-00.047_B	359.92	-0.05	P	0.70	P	0.83
518	AGAL359.962+00.129_A	359.96	0.13	Q	0.88	Q	0.89
519	*AGAL359.962+00.129_B	359.96	0.13	Q	0.60	A	0.52
520	AGAL359.972-00.072_S	359.97	-0.07	Q	0.54	Q	0.78
521	AGAL359.989+00.087_S	359.99	0.09	Q	0.87	Q	0.89
522	AGAL359.990+00.107_S	359.99	0.11	Q	0.95	Q	0.92

## 3.7 Обсуждение

### 3.7.1 Обсуждение результатов машинного обучения без учителя

Применение методов обучения без учителя к молекулярным линиям показало, что даже при использовании только интегральных интенсивностей пяти молекул возможно выделить два достаточно чётко определённых кластера, соответствующих различным эволюционным стадиям молекулярных облаков (см. рис. 27): кластер с преобладанием объектов без активного звездообразования («Без активного ЗО») и кластер, содержащий преимущественно протозвёздные объекты («Протозвёзды»). Вместе с тем этот ограниченный набор признаков не позволяет выявить более тонкую структуру групп внутри рассматриваемой выборки.

Основную роль в формировании кластерной структуры играют интегральные

интенсивности линий  $C_2H$  и  $N_2H^+$ . Эти молекулы являются индикаторами областей с различными физическими условиями. В работе [72] показано, что  $N_2H^+$  является практически единственным надёжным индикатором плотного газа в диапазоне 3 мм, устойчивым к вымораживанию на ранних дозвёздных стадиях. Излучение этой молекулы, как правило, достигает максимума в спокойных облаках до начала существенного нагрева [145, 146]. Напротив, излучение  $C_2H$  во многих холодных облаках ослаблено или отсутствует [147], однако усиливается во внешних областях и в областях, подверженных воздействию ультрафиолетового излучения [148].

В работе [149] выполнен анализ главных компонент (РСА) интегральных интенсивностей линий в диапазоне 3 мм совместно с физическими параметрами облака Orion V. Показано, что интенсивность линии  $C_2H$  вносит положительный вклад в компоненту, характеризующую уровень ультрафиолетового излучения. Таким образом, различное поведение этих молекулярных индикаторов отражает химическую и физическую эволюцию молекулярных облаков, что позволяет алгоритму обучения без учителя разделять объекты на кластеры «Без активного звездообразования» и «Протозвёзды». Это подтверждается и табл. 6: интегральная интенсивность  $C_2H$  в кластере «Без активного звездообразования» находится ниже порога обнаружения, тогда как в кластере «Протозвёзды» она уверенно регистрируется. Для всех остальных анализируемых линий интенсивности в кластере «Протозвёзды» выше на 50–80%.

Непрерывное излучение на длине волны 870 мкм практически не оказывает заметного влияния на результаты кластеризации. На этой длине волны в основном определяется лучевая концентрация холодной пыли, которая изменяется сравнительно плавно на различных эволюционных стадиях и поэтому слабо различает области без активного звездообразования и молекулярные облака, содержащие протозвёзды. В отличие от интенсивностей молекулярных линий, чувствительных к изменениям температуры и химического состава среды, излучение на 870 мкм в основном характеризует суммарную массу облака, а не его текущее физическое и химическое состояние. По этой причине данный признак обладает ограниченной информативностью при разделении кластеров.

Дальнейший анализ был расширен за счёт включения дополнительных интегральных интенсивностей линий, реже регистрируемых в обзоре MALT90, а также потоков инфракрасного излучения *Spitzer* и индикаторов обнаружения мазеров  $CH_3OH$  II класса. Первое заметное различие проявилось при добавлении интегральной интенсивности линии  $H^{13}CO^+$ : это привело к более чёткому выделению кластера, связанного с областями II и ФДО. Поэтому ниже обсуждаются результаты именно для такой комбинации признаков, поскольку включение других, реже обнаруживаемых линий приводит к качественно сходным результатам.

Проведённый анализ выявил три устойчивых кластера: «Без активного звездообразования», «Протозвёзды» и «Н II+ФДО», в которых доминируют соответственно тёмные в ИК облака, молекулярные облака с протозвёздами и области Н II с ФДО. Единственное дополнительное различие возникает при добавлении индикаторов обнаружения мазеров  $\text{CH}_3\text{OH}$  II класса: в этом случае кластер «Протозвёзды» разделяется на две подгруппы — с обнаруженным мазерным излучением и без него. Это указывает на то, что включение флагов обнаружения мазеров  $\text{CH}_3\text{OH}$  позволяет алгоритму более эффективно выделять среди протозвёздной популяции наиболее активные области звездообразования высокой массы [150, 151, 152].

Более чёткое выделение кластера «Н II+ФДО» в первую очередь связано с включением линии  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ : ИК-поток *Spitzer* существенно не изменяют характер кластеризации, тогда как добавление этой линии позволяет группе выделиться значительно более явно. Такое поведение может быть объяснено физическими условиями среды, влияющими на молекулу  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ . Известно, что эта молекула разрушается под действием ультрафиолетового излучения в областях Н II и ФДО. Поскольку  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  образуется в условиях, близких к условиям образования  $\text{HCO}^+$ , но содержит менее распространённый изотоп  $^{13}\text{C}$ , её излучение, как правило, слабее. В результате излучение  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  отсутствует как в средах, где доминирует УФ-излучение, так и в ИК-тёмных областях, тогда как максимальная интенсивность наблюдается на промежуточной стадии активного звездообразования. Таким образом, хотя в кластере «Н II+ФДО» излучение  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  само по себе не является сильным, его отсутствие в сочетании с усиленным ИК-излучением и присутствием молекул-индикаторов УФ-излучения (например,  $\text{C}_2\text{H}$ ) создаёт химический контраст, позволяющий алгоритму отчётливо выделить эту группу.

Как показано в табл. 6, кластер «Протозвёзды» характеризуется относительно высокими значениями интегральных интенсивностей молекулярных линий; ИК-поток также заметно выше, особенно на длинах волн 8.0 мкм (среднее значение 457.6, медиана 28.1 мЯн) и 24 мкм (среднее 180.1, медиана 45.2 мЯн). Существенное различие между средними и медианными значениями указывает на асимметричное распределение, при котором небольшое число особенно ярких источников увеличивает среднее значение. Это согласуется с составом кластера, содержащего как протозвёздные объекты, так и облака на более поздних стадиях эволюции. Объекты кластера «Н II+ФДО» характеризуются в целом более слабыми интенсивностями молекулярных линий и ИК-потоков; при этом различие между средними и медианными значениями меньше, что указывает на более однородную популяцию. Потоки в среднем ИК-диапазоне остаются заметными: на 8.0 мкм среднее 179.5, медиана 16.1 мЯн; на 24 мкм — среднее 150.2, медиана 18.1 мЯн.

Кластер «Без активного ЗО» демонстрирует в целом слабые интегральные ин-

тенсивности молекулярных линий, причём излучение  $C_2H$  и  $H^{13}CO^+$  находится ниже порога обнаружения. ИК-излучение в этом кластере также слабое: потоки на длине волны 8.0 мкм составляют в среднем 54.6 мЯн (медиана 3.07 мЯн), на 24 мкм — 76.6 мЯн (медиана 1.97 мЯн), что существенно ниже значений для кластеров «Протозвёзды» и «H II+ФДО». Слабое излучение в среднем ИК-диапазоне дополнительно подтверждает представление о том, что эти облака находятся на ранней дозвёздной стадии, предшествующей формированию ярких источников и существенному нагреву пыли.

Следует отметить, что кластеры включают объекты с различными ИК-типами. Вероятно, это связано с тем, что линии молекул формируются на разных временных масштабах, а в отдельных областях звездообразования может одновременно существовать газ на нескольких стадиях эволюции (см. [153, 154]). Это снижает однозначность интерпретации, основанной на отдельных признаках, и усложняет простые схемы классификации. Тем не менее три выделенных кластера — «Без активного звездообразования», «Протозвёзды» и «H II+ФДО» — по-видимому, отражают эволюционную последовательность молекулярных облаков.

Кластер «Без активного звездообразования» соответствует холодным плотным областям до начала звездообразования. Кластер «Протозвёзды» характеризуется сильным излучением плотного газа и интенсивным, но неоднородным излучением в среднем ИК-диапазоне, что указывает на наличие источников с исключительно высокой инфракрасной яркостью. Кластер «H II+ФДО», напротив, демонстрирует более слабое и однородное молекулярное излучение, а также более равномерно распределённые значения ИК-потоков. Такая картина отражает физические изменения среды по мере эволюции молекулярных облаков и влияние этого процесса на наблюдаемые линии излучения молекул.

Выделение именно трёх устойчивых кластеров отражает то, что по имеющемуся набору наблюдательных данных можно различить три основных режима среды, задаваемых тремя физическими величинами — температурой, плотностью газа и интенсивностью УФ-поля. Кластер «Без активного звездообразования» соответствует низкотемпературному режиму с высокой плотностью и слабым УФ-полем; кластер «Протозвёзды» — повышенной температуре и высокой плотности газа при умеренном УФ-излучении; кластер «H II+ФДО» — областям с интенсивным УФ-полем, где температура газа и пыли повышена, а плотность газа, напротив, ниже. По-видимому, различие эволюционных стадий именно по этим трём параметрам — предел, достижимый на имеющемся наборе признаков.

Следует подчеркнуть, что объекты внутри каждого из трёх кластеров могут принадлежать разным ИК-типам из каталога MALT90. Это не случайно: ИК-классификация молекулярных облаков в [28] выполнялась экспертом на основе визуальной интерпретации ИК-данных и опыта предыдущих исследований, что

неизбежно вносит элемент субъективности. Методы машинного обучения, напротив, оперируют исключительно количественными закономерностями в данных и не используют априорную классификацию. Тот факт, что выделенные алгоритмом кластеры не совпадают в точности с ИК-типами, а отражают более общие физические режимы среды, указывает на ограничения исходной ИК-классификации и на дополнительную информацию, содержащуюся в молекулярных линиях. С этим, по-видимому, связан и сравнительно невысокий порог вероятности (50%) при классификации объектов типа U: экспертная классификация воспроизводится моделью лишь в 60% случаев, что также отражает неполное соответствие между ИК-типами и истинными эволюционными стадиями.

Показательная закономерность проявляется в поведении отношения интегральных интенсивностей линий HCN (1–0) и HNC (1–0). В работе [155] использовались данные MALT90 для 333 объектов, надёжно классифицированных вручную как тёмные в ИК-диапазоне, протозвёздные или области H II/ФДО. Авторы показали, что отношение интегральных интенсивностей HCN/HNC постепенно возрастает по мере эволюции молекулярных облаков, принимая медианные значения 1.07, 1.19 и 1.64 для тёмных в ИК источников, облаков с протозвёздами и областей H II/ФДО соответственно. В настоящем анализе (табл. 7) медианные значения этого отношения для трёх выделенных кластеров демонстрируют сходную последовательность: 1.31, 1.46 и 1.61.

В работе [156] были проведены картирующие наблюдения 38 областей звездообразования высокой массы, находящихся на различных стадиях эволюции. Показано, что глобальное отношение интегральных интенсивностей HCN/HNC возрастает с эволюционной стадией источников (от 0.7 для спокойных источников до 2.93 для областей H II), что дополнительно подтверждает интерпретацию этого отношения как индикатора химической и физической эволюции молекулярных облаков. Систематическое увеличение отношения HCN/HNC отражает температурно-зависимый переход HNC в изомер HCN, который становится более эффективным в более тёплом газе.

Примечательно, что при включении температуры пыли [134] в качестве дополнительного признака её вклад в кластеризацию и классификацию оказался сравнительно небольшим. Это может указывать на то, что алгоритм выявляет скрытую связь между отношением интегральных интенсивностей HCN/HNC и температурой пыли. В пользу такой интерпретации говорят и результаты [157], где показана корреляция между кинетической температурой газа, определённой по отношению HCN/HNC, и температурой пыли, полученной по наблюдениям *Herschel* (см. их рис. 8с).

Таким образом, молекулы и их отношения, в частности HCN/HNC как индикатор кинетической температуры газа, эффективно отражают температурные

вариации, различающие эволюционные стадии молекулярных облаков. Следует отметить, что линии HCN и HNC сохраняют более высокую значимость в анализе по сравнению с температурой пыли. Вероятно, это связано с тем, что интенсивности молекулярных линий чувствительны как к плотности среды, так и к химической эволюции газа, существенно изменяющимся в процессе звездообразования, тогда как температура пыли отражает лишь усреднённое по объёму состояние области. Поэтому она является менее чувствительным индикатором локальных физических и химических условий внутри молекулярных облаков.

### 3.7.2 Обсуждение результатов машинного обучения с учителем

Для обоих методов обучения с учителем ИК-признаки играют ключевую роль при определении типов молекулярных облаков. Вероятно, это связано с тем, что в работе [28] именно ИК-поток использовались при первоначальном определении эволюционной стадии облака. Иначе говоря, высокая значимость ИК-поток в моделях обучения с учителем обусловлена тем, что именно эти признаки использовались при формировании исходных ИК-типов, а не их более высокой предсказательной способностью.

Такое поведение ожидаемо для методов обучения с учителем. Меньшая значимость ИК-признаков в кластеризации объясняется тем, что кластеризация выполняется полностью без использования априорной информации о типах молекулярных облаков: кластеры определяются на основе группировки источников в многомерном пространстве признаков. Интенсивности молекулярных линий создают более выраженный контраст между различными эволюционными стадиями, что способствует более эффективному разделению объектов. ИК-поток, будучи важным индикатором звездообразования, изменяется по выборке более плавно и поэтому в меньшей степени определяют границы кластеров. Их относительно меньшая значимость в кластеризации не означает, что ИК-излучение не играет важной физической роли: оно скорее отражает общие эволюционные тенденции, тогда как алгоритмы кластеризации на основе плотности данных чувствительны к локальным различиям физических условий в молекулярном газе.

При использовании только ИК-поток точность кросс-валидации составила около 0.59, что практически совпадает с результатом, полученным при использовании ИК-поток совместно с интегральными интенсивностями молекулярных линий. Модели, основанные исключительно на интегральных интенсивностях линий, показали более скромные результаты (точность около 0.4). Несмотря на различия в значениях точности, во всех вариантах классификации среди объектов, для которых удалось определить эволюционную стадию, преобладали молекулярные облака без активного звездообразования.

Следует отметить, что методы случайного леса и градиентного бустинга на тестовой выборке воспроизводят ранее определённую экспертами эволюционную стадию примерно в 60% случаев. Это может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, в используемом наборе признаков могут отсутствовать ключевые дискриминирующие параметры. Хотя интегральные интенсивности линий и ИК-поток отражают важные физические свойства молекулярных облаков, отсутствие дополнительных признаков может ограничивать предсказательную способность моделей. Для повышения точности кросс-валидации был рассмотрен широкий набор дополнительных физических и химических индикаторов, включая флаги обнаружения мазерного излучения  $\text{CH}_3\text{OH}$  II класса, температуру пыли, интегральные интенсивности всех молекулярных линий обзора MALT90, а также их отношения. Несмотря на то что эти признаки характеризуют различные аспекты физических условий в облаках, ИК-поток во всех экспериментах с обучением с учителем неизменно оставались наиболее значимыми. По-видимому, отсутствие дополнительных взаимодополняющих параметров — более детальных кинематических, химических или характеристик окружающей среды — ограничивает общую предсказательную способность моделей.

Важно учитывать, что эволюция плотных молекулярных облаков представляет собой непрерывный процесс, а не последовательность чётко выделенных стадий. Поэтому провести строгие границы между объектами на разных эволюционных стадиях невозможно: всегда будут существовать источники с промежуточными характеристиками. Некоторая степень перекрытия между типами облаков неизбежна, и в лучшем случае можно оценить наиболее вероятную эволюционную стадию каждого облака на основе доступных наблюдательных данных.

### 3.8 Резюме Главы 3

В настоящей главе проведён комплексный анализ классификации и кластеризации молекулярных облаков на различных эволюционных стадиях звездообразования, представленных в каталоге MALT90, вместе с измерениями их ИК-поток по архивным данным *Spitzer*. Методы машинного обучения применялись с двумя основными целями: (i) выяснить, могут ли алгоритмы, использующие только интегральные интенсивности молекулярных линий и не имеющие предварительной информации об источниках, выделять эволюционные стадии молекулярных облаков, и (ii) оценить, могут ли модели, обученные на молекулярных облаках с установленными ИК-типами, предсказывать эволюционные стадии облаков без классификации.

Показано, что алгоритмы кластеризации позволяют выделить молекулярные облака с протозвёздами и без активного звездообразования только по интегральным интенсивностям пяти молекулярных линий:  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{HCN}$  и  $\text{C}_2\text{H}$ .

Добавление ИК-потоков на длинах волн 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм, включение интегральных интенсивностей всех шестнадцати линий обзора MALT90 ( $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{C}_2\text{H}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{HN}^{13}\text{C}$ ,  $^{13}\text{CS}$ ,  $^{13}\text{C}^{34}\text{S}$ ,  $\text{HC}^{13}\text{CCN}$ ,  $\text{HNCO}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{SiO}$ , а также рекомбинационной линии  $\text{H}41\alpha$ ), а также двоичных индикаторов наличия мазеров  $\text{CH}_3\text{OH}$  II класса позволило выделить дополнительный кластер с преобладанием областей фотодиссоциации и областей ионизованного водорода. Во всех кластерах присутствуют все типы молекулярных облаков из каталога MALT90. Этот результат может быть объяснён двумя причинами.

Во-первых, исходная классификация объектов по типам субъективна и выполнена только по данным ИК-потоков, что отмечалось авторами каталога в работе [28]. В настоящей работе использованы алгоритмы кластеризации и метод нелинейного снижения размерности t-SNE, способные выявлять скрытые нелинейные зависимости между признаками.

Во-вторых, эволюция молекулярных облаков представляет собой не дискретный, а непрерывный процесс. Физические условия в молекулярных облаках изменяются постепенно, что приводит к плавным переходам между различными фазами звездообразования, а не к резким скачкам между чётко выделенными эволюционными стадиями. Поэтому размытость границ между типами объектов ожидаема.

Для уточнения ранее не присвоенных типов облаков применялись методы машинного обучения — случайный лес и градиентный бустинг. Для более чем пятисот молекулярных облаков впервые определены эволюционные стадии; около 80% из них отнесены к облакам без активного звездообразования. Сравнительный анализ показал высокую согласованность предсказаний двух алгоритмов: различия наблюдались лишь для десяти объектов, преимущественно между классами «Протозвёзды» и «Без активного звездообразования».

Результаты настоящей главы представлены в работе А 3.

# Заключение

В настоящей диссертационной работе представлены результаты комплексного исследования, сочетающего традиционные методы анализа астрономических данных с современными вычислительными подходами. Ниже перечислены основные результаты работы:

- Показано, что горячие ядра области RCW 120 демонстрируют богатое химическое разнообразие. Получены спектральные карты излучения 54 линий 24 молекул, впервые зарегистрированных в этом объекте. Всего в направлении горячего ядра RCW 120 S2 обнаружено 95 линий 35 молекул — как простых двухатомных, так и сложных органических:  $^{13}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CN}$ ,  $^{33}\text{SO}$ ,  $^{34}\text{SO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ ,  $\text{C}^{33}\text{S}$ ,  $\text{C}^{34}\text{S}$ ,  $\text{CCH}$ ,  $\text{CCD}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CS}$ ,  $\text{DCN}$ ,  $\text{DCO}^+$ ,  $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ,  $\text{H}_2^{13}\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{CCO}$ ,  $\text{H}_2\text{CN}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{HC}^{15}\text{N}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{HCOOCH}_3$ ,  $\text{HDCO}$ ,  $\text{HN}^{13}\text{C}$ ,  $\text{HNCO}$ ,  $\text{HSO}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SiO}$ ,  $c\text{-C}_3\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ . Построены карты распределения физических параметров молекулярного газа.
- По анализу высокоскоростных крыльев спектральных линий  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{SiO}$  построены карты излучения этих молекул в синих и красных интервалах скоростей и определены направления биполярных молекулярных истечений: в горячем ядре RCW 120 S2 истечение направлено вдоль луча зрения, тогда как вблизи МЗО RCW 120 S1 оно расположено в картинной плоскости.
- Вблизи пяти МЗО в области RCW 120 определены физические условия в предположении ЛТР с использованием ряда переходов  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$  и  $\text{SO}$ . По данным  $\text{CH}_3\text{CCH}$  обнаружено, что вращательная температура для МЗО S1, S2 и S10 составляет около 40 К. Анализ  $\text{CH}_3\text{CN}$  показывает более высокие значения вращательных температур в направлении МЗО S1, S2 и S10 — до 61 К. МЗО S2 оказывается самой плотной областью. По убыванию вращательных температур молекулы выстраиваются в последовательность  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{CCH}$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$ ,  $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{SiO}$ , образуя структуру, напоминающую луковицу. По лучевым концентрациям молекул обнаружено, что в южной части плотного сгустка содержание метанола превышает содержание в северной при сравнимых содержаниях других органических молекул, таких как  $\text{CH}_3\text{CN}$  и  $\text{CH}_3\text{CCH}$ .

Кроме того, содержание метанола повышено и относительно других кислородсодержащих молекул, например SO и OCS.

- Модель Presta качественно воспроизводит наблюдаемое соотношение содержаний  $\text{CH}_3\text{CCH}$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$  и показывает, что возможным механизмом, ответственным за повышенное содержание метанола в газовой фазе, является фотодесорбция из мантий пылинок. При понижении величины поглощения  $A_V$  с  $5^m$  до  $3^m$  десорбция метанола ускоряется, причём молекулы, попадая в газ, не разрушаются УФ-излучением, в отличие от ситуации при  $A_V \sim 2^m$ , когда диссоциация становится эффективной.
- Сильная линейная корреляция между лучевыми концентрациями указывает, что молекулы образуются в одной фазе — либо в газе, либо на пыли. Корреляция отсутствует, если молекулы образуются в разных фазах: одна в газе, другая в пылевых мантиях (например, CCH и  $\text{CH}_3\text{OH}$ ). Слабая корреляция между метанолом и другими кислородсодержащими молекулами (SO, OCS,  $\text{SO}_2$ ), которые также образуются на пыли, свидетельствует, что в южной части облака разрушается только верхняя часть мантий пылевых частиц, богатая «CO»-льдом.
- Методами машинного обучения при анализе выборки интенсивностей излучения линий CCH,  $\text{N}_2\text{H}^+$ , HCN, HNC,  $\text{HCO}^+$  и  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  в молекулярных облаках из каталога MALT90 выделены три устойчивых кластера объектов: (1) протозвёзды, (2) области H II и ФДО и (3) облака без активного звездообразования. Показано, что разделение на кластеры не зависит от потоков в дальнем ИК-диапазоне, что свидетельствует об астрохимическом сходстве молекулярных облаков разных масс.
- Для уточнения ранее не присвоенных типов облаков из каталога MALT90 применялись методы машинного обучения — классификаторы случайного леса и градиентного бустинга. Впервые определены эволюционные стадии более чем пятисот молекулярных облаков; около 80% из них отнесены к облакам без активного звездообразования.

В заключение стоит отметить перспективные направления дальнейшего развития работы. Всё больший интерес сегодня представляют мультиволновые исследования, поскольку разные диапазоны длин волн отражают различные физические и химические процессы в молекулярных облаках. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах (ALMA, NOEMA) регистрируются линии метанола, метилцианида и других органических молекул, что позволяет проследивать локальные условия в газе. В ближнем и среднем инфракрасном диапазоне (*Spitzer*, *JWST*)

регистрируются линии воды, угарного газа и углеводородов, что позволяет напрямую изучать ледяные мантии пылинок и процессы их образования и разрушения. В дальнем инфракрасном диапазоне (*Herschel*) регистрируется непрерывное излучение пыли, по которому определяется распределение температуры и плотности и выделяются компактные области, связанные с протозвёздами.

Дополнительную информацию предоставляют ультрафиолетовые и рентгеновские данные. В УФ-диапазоне наблюдаются линии высокоионизованных элементов (например, C IV, Si IV), которые коррелируют со скоростью аккреции вещества на протозвёзды. Эти линии отражают кинематику аккреции и позволяют оценить её темп, что недоступно в других диапазонах. Рентгеновские данные, в свою очередь, дают возможность более эффективно выделять области звездообразования: например, карты обсерватории *Chandra* обычно содержат около 10% загрязнения звёздами фона, тогда как в ближнем и среднем ИК-диапазонах эта доля может быть в десятки раз выше. Это связано с тем, что магнитная активность звёзд солнечного типа, ответственных за рентгеновские вспышки, высока на протяжении всех стадий эволюции до выхода на главную последовательность и уменьшается примерно в 100 раз в течение первого миллиарда лет. Таким образом, рентгеновские наблюдения позволяют выделять молодые звёздные объекты на фоне звёздного поля и исследовать процессы звездообразования в различных условиях, включая сценарии триггерного звездообразования на периферии расширяющихся оболочек II.

Следует подчеркнуть, что огромное количество подобных данных уже накоплено в архивах современных телескопов и интерферометров, однако значительная их часть до сих пор не проанализирована — не хватает исследовательских ресурсов для систематической обработки таких массивов наблюдений. В этом контексте особенно перспективным видится применение методов машинного обучения, позволяющих автоматически классифицировать объекты, выявлять скрытые корреляции и объединять информацию, полученную в разных диапазонах длин волн. Интеграция архивных данных ALMA, NOEMA, *Spitzer*, *Herschel*, *Chandra* и других обсерваторий в единое пространство признаков и их совместный анализ с использованием алгоритмов машинного обучения откроют новые возможности для построения обобщённой картины процессов звездообразования в Галактике.

## 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 — Ярмак Л. А., Морозову Л. К., Морозова А. М. и Ярмака 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.

## Библиографическое описание

- [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  $\alpha$ -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., Saliu 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. N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> 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.* CH<sub>3</sub>CN 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] *Rathborne J. M., Whitaker J. S., Jackson J. M. et al.* Molecular Line Emission Towards High-Mass Clumps: The MALT90 Catalogue // *Publ. Astron. Soc. Aust.* — 2016. — Vol. 33. — P. e030.
- [29] *Jackson J. M., Rathborne J. M., Foster J. B. et al.* MALT90: The Millimetre Astronomy Legacy Team 90 GHz Survey // *Publ. Astron. Soc. Aust.* — 2013. — Vol. 30. — P. e057.
- [30] *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.
- [31] *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.
- [32] *Elmegreen B. G., Lada C. J.* Sequential formation of subgroups in OB associations. // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.

- [33] *Egorov O. V., Lozinskaya T. A., Moiseev A. V., Smirnov-Pinchukov G. V.* The supergiant shell with triggered star formation in the dwarf irregular galaxy IC 2574: neutral and ionized gas kinematics // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 444, № 1. — P. 376–391.
- [34] *Egorov O. V., Lozinskaya T. A., Moiseev A. V., Shchekinov Y. A.* Complexes of triggered star formation in supergiant shell of Holmberg II // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 464, № 2. — P. 1833–1853.
- [35] *Preibisch T., Zinnecker H.* The History of Low-Mass Star Formation in the Upper Scorpius OB Association // *Astron. J.* — 1999. — Vol. 117, № 5. — P. 2381–2397.
- [36] *Ratzenböck S., Großschedl J. E., Alves J. et al.* The star formation history of the Sco-Cen association-Coherent star formation patterns in space and time // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — Vol. 678. — P. A71.
- [37] *Briceño-Morales G., Chanamé J.* Substructure, supernovae, and a time-resolved star formation history for Upper Scorpius // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 522, № 1. — P. 1288–1309.
- [38] *Ratzenböck S., Großschedl J. E., Alves J. et al.* The star formation history of the Sco-Cen association-Coherent star formation patterns in space and time // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — Vol. 678. — P. A71.
- [39] *Dale J. E., Haworth T. J., Bressert E.* The dangers of being trigger-happy // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Vol. 450, № 2. — P. 1199–1211.
- [40] *Pety J., Guzmán V. V., Orkisz J. H. et al.* The anatomy of the Orion B giant molecular cloud: A local template for studies of nearby galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 599. — P. A98.
- [41] *Bron E., Daudon C., Pety J. et al.* Clustering the Orion B giant molecular cloud based on its molecular emission // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 610. — P. A12.
- [42] *Kirsanova M. S., Punanova A. F., Semenov D. A., Vasyunin A. I.* Dark cloud-type chemistry in photodissociation regions with moderate ultraviolet field // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — Vol. 507, № 3. — P. 3810–3829.
- [43] *Roman-Lopes A.* SOAR-OSIRIS observations of the Sh 2-307 HII region: triggered star formation beyond the Solar Circle // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Vol. 398, № 3. — P. 1368–1382.

- [44] *Kaplan K. F., Dinerstein H. L., Kim H., Jaffe D. T.* A Near-infrared Survey of UV-excited Molecular Hydrogen in Photodissociation Regions // *Astrophys. J.* — 2021. — Vol. 919, № 1. — P. 27.
- [45] *Deng Y., Zhang Z.-Y., Zhou P. et al.* Multiple gas phases in supernova remnant IC 443: mapping shocked H<sub>2</sub> with VLT/KMOS // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2023. — Vol. 518, № 2. — P. 2320–2340.
- [46] *Kirsanova M. S., Tatarnikov A. M., Boley P. A. et al.* Near Infrared View on the Photo-Dissociation Regions S 255, S 257, NGC 7538, and S 140 // *Astrophysical Bulletin.* — 2023. — Vol. 78, № 3. — P. 372–383.
- [47] *Bock D. C. J., Large M. I., Sadler E. M.* SUMSS: A Wide-Field Radio Imaging Survey of the Southern Sky. I. Science Goals, Survey Design, and Instrumentation // *Astron. J.* — 1999. — Vol. 117, № 3. — P. 1578–1593.
- [48] *Deharveng L., Zavagno A., Schuller F. et al.* Star formation around RCW 120, the perfect bubble // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 496, № 1. — P. 177–190.
- [49] *Figueira M., Zavagno A., Deharveng L. et al.* Star formation towards the Galactic H II region RCW 120. Herschel observations of compact sources // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 600. — P. A93.
- [50] *Anderson L. D., Deharveng L., Zavagno A. et al.* Mopra CO Observations of the Bubble H II Region RCW 120 // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 800. — P. 101.
- [51] *Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Wiebe D. S. et al.* Molecular envelope around the HII region RCW 120 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2019. — Vol. 488, № 4. — P. 5641–5650.
- [52] *Zavagno A., André P., Schuller F. et al.* The role of Galactic H II regions in the formation of filaments. High-resolution submillimeter imaging of RCW 120 with ArTéMiS // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 638. — P. A7.
- [53] *Figueira M., Zavagno A., Bronfman L. et al.* APEX CO observations towards the photodissociation region of RCW 120 // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 639. — P. A93.
- [54] *Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Olofsson A. O. H. et al.* The shocked molecular layer in RCW 120 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2023. — Vol. 520, № 1. — P. 751–760.
- [55] *Luisi M., Anderson L. D., Schneider N. et al.* Stellar feedback and triggered star formation in the prototypical bubble RCW 120 // *Science Advances.* — 2021. — Vol. 7, № 15. — P. eabe9511.

- [56] *Güsten R., Nyman L. Å., Schilke P. et al.* The Atacama Pathfinder EXperiment (APEX) - a new submillimeter facility for southern skies - // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 454, № 2. — P. L13–L16.
- [57] *Russeil D.* Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 397. — P. 133–146.
- [58] *Astropy Collaboration, Robitaille T. P., Tollerud E. J. et al.* Astropy: A community Python package for astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A33.
- [59] *Astropy Collaboration, Price-Whelan A. M., Sipőcz B. M. et al.* The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v2.0 Core Package // *Astron. J.* — 2018. — Vol. 156, № 3. — P. 123.
- [60] *Robitaille T., Bressert E.* APLpy: Astronomical Plotting Library in Python. — Astrophysics Source Code Library. — 2012.
- [61] *Robitaille T.* APLpy v2.0: The Astronomical Plotting Library in Python. — 2019.
- [62] *Lin Y., Spezzano S., Sipilä O. et al.* Multiline observations of CH<sub>3</sub>OH, c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>, and HNC toward L1544. Dissecting the core structure with chemical differentiation // *Astron. Astrophys.* — 2022. — Vol. 665. — P. A131.
- [63] *Karlsson R., Sandqvist Å., Hjalmarson Å. et al.* Hydroxyl, water, ammonia, carbon monoxide, and neutral carbon towards the Sagittarius A complex. VLA, Odin, and SEST observations // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 554. — P. A141.
- [64] *Figueira M., Bronfman L., Zavagno A. et al.* ALMA observations of RCW 120 Fragmentation at 0.01 pc scale & star // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 616. — P. L10.
- [65] *Chen Z., Sefako R., Yang Y. et al.* The Role of Magnetic Fields in Triggered Star Formation of RCW 120 // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2022. — Vol. 22, № 7. — P. 075017.
- [66] *Torii K., Hasegawa K., Hattori Y. et al.* CLOUD–CLOUD COLLISION AS A TRIGGER OF THE HIGH-MASS STAR FORMATION: A MOLECULAR LINE STUDY IN RCW 120 // *The Astrophysical Journal.* — 2015. — Vol. 806, № 1. — P. 7.
- [67] *Rodón J. A., Zavagno A., Baluteau J.-P. et al.* Herschel SPIRE-FTS observations of RCW 120 // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 579. — P. A10.

- [68] *Kabanovic S., Schneider N., Ossenkopf-Okada V. et al.* Self-absorption in [C II], 12CO, and H I in RCW120-Building up a geometrical and physical model of the region // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — Vol. 659. — P. A36.
- [69] *Sánchez-Monge Á., López-Sepulcre A., Cesaroni R. et al.* Evolution and excitation conditions of outflows in high-mass star-forming regions // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 557. — P. A94.
- [70] *Codella C., Beltrán M. T., Cesaroni R. et al.* SiO collimated outflows driven by high-mass YSOs in G24.78+0.08 // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 550. — P. A81.
- [71] *Araya E., Hofner P., Kurtz S. et al.* Thermal Methanol Observations of the Outflow from the G31.41+0.31 Hot Molecular Core // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 675, № 1. — P. 420–426.
- [72] *Pety J., Guzmán V. V., Orkisz J. H. et al.* The anatomy of the Orion B giant molecular cloud: A local template for studies of nearby galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 599. — P. A98.
- [73] *Rathborne J. M., Whitaker J. S., Jackson J. M. et al.* Molecular Line Emission Towards High-Mass Clumps: The MALT90 Catalogue // *Publ. Astron. Soc. Aust.* — 2016. — Vol. 33. — P. e030.
- [74] *Orkisz J. H., Pety J., Gerin M. et al.* Turbulence and star formation efficiency in molecular clouds: solenoidal versus compressive motions in Orion B // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 599. — P. A99.
- [75] *Gratier P., Pety J., Bron E. et al.* Quantitative inference of the H<sub>2</sub> column densities from 3 mm molecular emission: case study towards Orion B // *Astron. Astrophys.* — 2021. — Vol. 645. — P. A27.
- [76] *Murga M. S., Kirsanova M. S., Vasyunin A. I., Pavlyuchenkov Y. N.* Impact of PAH photodissociation on the formation of small hydrocarbons in the Orion Bar and the horsehead PDRs // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 497, № 2. — P. 2327–2339.
- [77] *Murga M. S., Vasyunin A. I., Kirsanova M. S.* Impact of HAC evolution on the formation of small hydrocarbons in the Orion Bar and the Horsehead PDRs // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Vol. 519, № 2. — P. 2466–2474.
- [78] *Pety J., Teyssier D., Fossé D. et al.* Are PAHs precursors of small hydrocarbons in photo-dissociation regions? The Horsehead case // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 435, № 3. — P. 885–899.

- [79] *Awad Z., Viti S.* Interstellar hydrocarbons: degradation chemistry in diffuse clouds // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — Vol. 511, № 3. — P. 3832–3843.
- [80] *Ferrante R. F., Moore M. H., Spiliotis M. M., Hudson R. L.* Formation of Interstellar OCS: Radiation Chemistry and IR Spectra of Precursor Ices // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 684, № 2. — P. 1210–1220.
- [81] *Watanabe N., Kouchi A.* Efficient Formation of Formaldehyde and Methanol by the Addition of Hydrogen Atoms to CO in H<sub>2</sub>O-CO Ice at 10 K // *Astrophys. J., Lett.* — 2002. — Vol. 571, № 2. — P. L173–L176.
- [82] *Fuchs G. W., Cuppen H. M., Ioppolo S. et al.* Hydrogenation reactions in interstellar CO ice analogues. A combined experimental/theoretical approach // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 505, № 2. — P. 629–639.
- [83] *Punanova A., Vasyunin A., Caselli P. et al.* Methanol Mapping in Cold Cores: Testing Model Predictions // *Astrophys. J.* — 2022. — Vol. 927, № 2. — P. 213.
- [84] *Agúndez M., Cabezas C., Tercero B. et al.* Discovery of the propargyl radical (CH<sub>2</sub>CCH) in TMC-1: One of the most abundant radicals ever found and a key species for cyclization to benzene in cold dark clouds // *Astron. Astrophys.* — 2021. — Vol. 647. — P. L10.
- [85] *Byrne A. N., Xue C., Cooke I. R. et al.* Astrochemical Modeling of Propargyl Radical Chemistry in TMC-1 // *Astrophys. J.* — 2023. — Vol. 957, № 2. — P. 88.
- [86] *van Dishoeck E. F., Kristensen L. E., Mottram J. C. et al.* Water in star-forming regions: physics and chemistry from clouds to disks as probed by Herschel spectroscopy // *Astron. Astrophys.* — 2021. — Vol. 648. — P. A24.
- [87] *Kabanovic S., Schneider N., Ossenkopf-Okada V. et al.* Self-absorption in [C II], <sup>12</sup>CO, and H I in RCW120. Building up a geometrical and physical model of the region // *Astron. Astrophys.* — 2022. — Vol. 659. — P. A36.
- [88] *Kalenskii S. V., Promislov V. G., Alakoz A. et al.* Probing the properties of methyl cyanide sources // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 354. — P. 1036–1040.
- [89] *Giannetti A., Leurini S., Wyrowski F. et al.* ATLASGAL-selected massive clumps in the inner Galaxy. V. Temperature structure and evolution // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 603. — P. A33.

- [90] *Andron I., Gratier P., Majumdar L. et al.* Methyl cyanide ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ) and propyne ( $\text{CH}_3\text{CCH}$ ) in the low-mass protostar IRAS 16293-2422 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Vol. 481, № 4. — P. 5651–5659.
- [91] *Calcutt H., Willis E. R., Jørgensen J. K. et al.* The ALMA-PILS survey: propyne ( $\text{CH}_3\text{CCH}$ ) in IRAS 16293-2422 // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 631. — P. A137.
- [92] *Brouillet N., Despois D., Molet J. et al.* ALMA-IMF. IV. A comparative study of the main hot cores in W43-MM1: Detection, temperature, and molecular composition // *Astron. Astrophys.* — 2022. — Vol. 665. — P. A140.
- [93] *Askne J., Hoglund B., Hjalmarsen A., Irvine W. M.* Methyl acetylene as a temperature probe in molecular clouds. // *Astron. Astrophys.* — 1984. — Vol. 130. — P. 311–318.
- [94] *Burrell P. M., Bjarnov E., Schwendeman R. H.* Investigation of the  $\nu_5$  band of methylacetylene by infrared laser Stark and microwave spectroscopy // *Journal of Molecular Spectroscopy*. — 1980. — Vol. 82, № 1. — P. 193–201.
- [95] *Gadhi J., Lahrouni A., Legrand J., Demaison J.* Moment dipolaire de  $\text{CH}_3\text{CN}$  // *Journal de Chimie Physique*. — 1995. — Vol. 92. — P. 1984–1992.
- [96] *Goldsmith P. F., Langer W. D.* Population Diagram Analysis of Molecular Line Emission // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 517, № 1. — P. 209–225.
- [97] *Müller H. S. P., Thorwirth S., Roth D. A., Winnewisser G.* The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS // *Astron. Astrophys.* — 2001. — Vol. 370. — P. L49–L52.
- [98] *Mangum J. G., Shirley Y. L.* How to Calculate Molecular Column Density // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. — 2015. — Vol. 127, № 949. — P. 266.
- [99] *Wilson T. L.* Isotopes in the interstellar medium and circumstellar envelopes // *Reports on Progress in Physics*. — 1999. — Vol. 62, № 2. — P. 143–185.
- [100] *Frerking M. A., Wilson R. W., Linke R. A., Wannier P. G.* Isotopic abundance ratios in interstellar carbon monosulfide // *Astrophys. J.* — 1980. — Vol. 240. — P. 65–73.
- [101] *Molinari S., Schisano E., Elia D. et al.* Hi-GAL, the Herschel infrared Galactic Plane Survey: photometric maps and compact source catalogues. First data release for the inner Milky Way:  $+68^\circ \geq l \geq -70^\circ$  // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 591. — P. A149.

- [102] *Schuller F., Menten K. M., Contreras Y. et al.* ATLASGAL - The APEX telescope large area survey of the galaxy at 870  $\mu\text{m}$  // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 504, № 2. — P. 415–427.
- [103] *Shirley Y. L., Huard T. L., Pontoppidan K. M. et al.* Observational Constraints on Submillimeter Dust Opacity // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 728, № 2. — P. 143.
- [104] *Lilley A. E.* The Association of Gas and Dust from 21-CM Hydrogen Radio Observations. // *Astrophys. J.* — 1955. — Vol. 121. — P. 559.
- [105] *Bohlin R. C., Savage B. D., Drake J. F.* A survey of interstellar H I from Lalpha absorption measurements. II. // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 224. — P. 132–142.
- [106] *Draine B. T.* On Radiation Pressure in Static, Dusty H II Regions // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 732, № 2. — P. 100.
- [107] *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in expanding H II regions. I. Radiative drift of neutral and charged grains // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2015. — Vol. 449, № 1. — P. 440–450.
- [108] *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in H II regions - II. Effects of dynamical coupling between dust and gas // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2017. — Vol. 469, № 1. — P. 630–638.
- [109] *Kirsanova M. S., Moiseev A. V., Boley P. A.* 3D structure of H II regions in the star-forming complex S254-S258 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2023. — Vol. 526, № 4. — P. 5187–5202.
- [110] *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.
- [111] *Shematovich V. I., Shustov B. M., Wiebe D. S.* Self-consistent model of chemical and dynamical evolution of protostellar clouds // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 1997. — Vol. 292, № 3. — P. 601–610.
- [112] *Виббе , Шематович , Шустов* Химическая и динамическая эволюция протозвездных облаков. I. Начальные стадии коллапса // *Астрон. журн.* — 1996. — Vol. 73. — P. 702.

- [113] *Borshcheva E. V., Wiebe D. S.* Luminosity Outbursts in Protoplanetary Discs: A Three-Phase Astrochemical Model // *Astronomy Reports*. — 2022. — Vol. 66, № 5. — P. 393–418.
- [114] *Semenov D., Wiebe D.* Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 2011. — Vol. 196, № 2. — P. 25.
- [115] *Wiebe D. S., Molyarova T. S., Akimkin V. V. et al.* Luminosity outburst chemistry in protoplanetary discs: going beyond standard tracers // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Vol. 485, № 2. — P. 1843–1863.
- [116] *Woodall J., Agúndez M., Markwick-Kemper A. J., Millar T. J.* The UMIST database for astrochemistry 2006 // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 466, № 3. — P. 1197–1204.
- [117] *Plakitina K. V., Kirsanova M. S., Kalenskii S. V. et al.* Chemical differentiation and gas kinematics around massive young stellar objects in RCW 120 // *Astrophysical Bulletin*. — 2024. — Vol. 79, № 2. — P. 235–259.
- [118] *Harsono D., Bruderer S., van Dishoeck E. F.* Volatile snowlines in embedded disks around low-mass protostars // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 582. — P. A41.
- [119] *Kochina O. V., Wiebe D. S.* Methyl Formate Synthesis Pathways at Various Star Formation Stages // *Astronomy Letters*. — 2024. — Vol. 50, № 1. — P. 70–80.
- [120] *Hassel G. E., Herbst E., Garrod R. T.* Modeling the Lukewarm Corino Phase: Is L1527 Unique? // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 681, № 2. — P. 1385–1395.
- [121] *Sakai N., Yamamoto S.* Warm Carbon-Chain Chemistry // *Chemical Reviews*. — 2013. — Vol. 113, № 12. — P. 8981–9015.
- [122] *Beuther H., Shepherd D.* Precursors of UchII Regions and the Evolution of Massive Outflows // *Astrophysics and Space Science Library* / Ed. by M. S. N. Kumar, M. Tafalla, P. Caselli. — Vol. 324 of *Astrophysics and Space Science Library*. — 2005. — P. 105.
- [123] *Arce H. G., Shepherd D., Gueth F. et al.* Molecular Outflows in Low- and High-Mass Star-forming Regions // *Protostars and Planets V* / Ed. by B. Reipurth, D. Jewitt, K. Keil. — 2007. — P. 245.
- [124] *Zinchenko I., Liu S. Y., Su Y. N. et al.* The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 810, № 1. — P. 10.

- [125] *Voronkov M. A., Caswell J. L., Ellingsen S. P. et al.* Southern class I methanol masers at 36 and 44 GHz // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Vol. 439, № 3. — P. 2584–2617.
- [126] *Voronkov M. A., Caswell J. L., Ellingsen S. P. et al.* New class I methanol masers // *Cosmic Masers - from OH to H0* / Ed. by R. S. Booth, W. H. T. Vlemmings, E. M. L. Humphreys. — Vol. 287 of IAU Symposium. — 2012. — P. 433–440.
- [127] *Öberg K. I., Bergin E. A.* Astrochemistry and compositions of planetary systems // *Phys. Rep.*. — 2021. — Vol. 893. — P. 1–48.
- [128] *Santos J. C., van Gelder M. L., Nazari P. et al.* SO<sub>2</sub> and OCS toward high-mass protostars: A comparative study of ice and gas // *Astron. Astrophys.* — 2024. — Vol. 689. — P. A248.
- [129] *Ball N. M., Brunner R. J.* Data mining and machine learning in astronomy // *International Journal of Modern Physics D*. — 2010. — Vol. 19, № 07. — P. 1049–1106.
- [130] *Fluke C. J., Jacobs C.* Surveying the reach and maturity of machine learning and artificial intelligence in astronomy // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. — 2020. — Vol. 10, № 2. — P. e1349.
- [131] *Prisinzano L., Damiani F., Sciortino S. et al.* Low-mass young stars in the Milky Way unveiled by DBSCAN and Gaia EDR3: Mapping the star forming regions within 1.5 kpc // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — Vol. 664. — P. A175.
- [132] *Schawinski K., Zhang C., Zhang H. et al.* Generative adversarial networks recover features in astrophysical images of galaxies beyond the deconvolution limit // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. — 2017. — Vol. 467, № 1. — P. L110–L114.
- [133] *Angarita Y., Chaparro G., Lumsden S. L. et al.* Pattern finding in millimetre-wave spectra of massive young stellar objects // *Astron. Astrophys.* — 2025. — Vol. 694. — P. A20.
- [134] *Guzmán A. E., Sanhueza P., Contreras Y. et al.* Far-infrared Dust Temperatures and Column Densities of the MALT90 Molecular Clump Sample // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 815, № 2. — P. 130.
- [135] *Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al.* Scikit-learn: Machine learning in Python // *the Journal of machine Learning research*. — 2011. — Vol. 12. — P. 2825–2830.

- [136] *Pearson K.* LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space // The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science. — 1901. — Vol. 2, № 11. — P. 559–572.
- [137] *Jolliffe I. T.* Principal component analysis for special types of data. — Springer, 2002.
- [138] *Maaten L. v. d., Hinton G.* Visualizing data using t-SNE // Journal of machine learning research. — 2008. — Vol. 9, № Nov. — P. 2579–2605.
- [139] *Campello R. J., Moulavi D., Sander J.* Density-based clustering based on hierarchical density estimates // Pacific-Asia conference on knowledge discovery and data mining / Springer. — 2013. — P. 160–172.
- [140] *Breiman L.* Random forests // Machine learning. — 2001. — Vol. 45. — P. 5–32.
- [141] *Friedman J. H.* Greedy function approximation: a gradient boosting machine // Annals of statistics. — 2001. — P. 1189–1232.
- [142] *Benjamin R. A., Churchwell E., Babler B. L. et al.* GLIMPSE. I. An SIRTF legacy project to map the inner galaxy // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2003. — Vol. 115, № 810. — P. 953.
- [143] *Carey S., Noriega-Crespo A., Mizuno D. et al.* MIPS GAL: A Survey of the Inner Galactic Plane at 24 and 70  $\mu\text{m}$  // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2009. — Vol. 121, № 875. — P. 76.
- [144] *Rousseeuw P.* Rousseeuw, P.J.: Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis. *Comput. Appl. Math.* 20, 53-65 // *Journal of Computational and Applied Mathematics.* — 1987. — Vol. 20. — P. 53–65.
- [145] *Sanhueza P., Jackson J. M., Foster J. B. et al.* Chemistry in Infrared Dark Cloud Clumps: A Molecular Line Survey at 3 mm // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 756, № 1. — P. 60.
- [146] *Yu N.-P., Xu J.-L., Wang J.-J., Liu X.-L.* Chemical Evolution of  $\text{N}_2\text{H}^+$  in Six Massive Star-forming Regions // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 865, № 2. — P. 135.
- [147] *Liu X. C., Wu Y., Zhang C. et al.*  $\text{C}_2\text{H N} = 1 - 0$  and  $\text{N}_2\text{H}^+ \text{ J} = 1 - 0$  observations of Planck Galactic cold clumps // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 622. — P. A32.
- [148] *Jiang X.-J., Liu H. B., Zhang Q. et al.* SMA Observations of  $\text{C}_2\text{H}$  in High-mass Star-forming Regions // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 808, № 2. — P. 114.

- [149] *Gratier P., Bron E., Gerin M. et al.* Dissecting the molecular structure of the Orion B cloud: insight from principal component analysis // *Astron. Astrophys.* — 2017. — Vol. 599. — P. A100.
- [150] *Batrla W., Matthews H. E., Menten K. M., Walmsley C. M.* Detection of strong methanol masers towards galactic H II regions // *Nature.* — 1987. — Vol. 326, № 6108. — P. 49–51.
- [151] *Menten K. M.* The Discovery of a New, Very Strong, and Widespread Interstellar Methanol Maser Line // *Astrophys. J., Lett.* — 1991. — Vol. 380. — P. L75.
- [152] *Szymczak M., Olech M., Wolak P. et al.* Giant burst of methanol maser in S255IR-NIRS3 // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A80.
- [153] *Sandoval-Garrido N. A., Stutz A. M., Álvarez-Gutiérrez R. H. et al.* ALMA-IMF: XVIII. The assembly of a star cluster: Dense  $N_2H^+$  (10) kinematics in the massive G351.77 protocluster // *Astron. Astrophys.* — 2025. — Vol. 696. — P. A202.
- [154] *Álvarez-Gutiérrez R. H., Stutz A. M., Sandoval-Garrido N. et al.* ALMA-IMF: XIII.  $N_2H^+$  kinematic analysis of the intermediate protocluster G353.41 // *Astron. Astrophys.* — 2024. — Vol. 689. — P. A74.
- [155] *Hoq S., Jackson J. M., Foster J. B. et al.* Chemical Evolution in High-mass Star-forming Regions: Results from the MALT90 Survey // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 777, № 2. — P. 157.
- [156] *Han X. H., Zhou J. J., Wang J. Z. et al.* Combination of CN(1-0), HCN(1-0), and HNC(1-0): A possible indicator for a high-mass star formation sequence in the Milky Way // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 576. — P. A131.
- [157] *Hacar A., Bosman A. D., van Dishoeck E. F.* HCN-to-HNC intensity ratio: a new chemical thermometer for the molecular ISM // *Astron. Astrophys.* — 2020. — Vol. 635. — P. A4.