

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 — 2025

Оглавление

Введение	1
1 Глава 1. Химическое разнообразие и кинематика газа в области образования массивных звезд RCW 120	10
1.1 Область образования массивных звезд RCW 120	10
1.2 Наблюдательные и архивные данные	12
1.3 Результаты. Обнаруженные молекулы	13
1.4 Кинематика молекулярного газа	26
1.5 Обсуждение	27
1.6 Резюме Главы 1	30
2 Глава 2. Газофазная и поверхностная химия в области образования массивных звезд RCW 120	31
2.1 Лучевые концентрации молекул в приближении ЛТР	32
2.2 Результаты. Физические условия в молекулярном газе	35
2.3 Результаты. Температуры возбуждения вращательных уровней	37
2.4 Моделирование обилий молекул с помощью Presta	46
2.5 Лучевая концентрация водорода и температура пыли	46
2.6 Результаты. Обилия молекул	47
2.7 Результаты. Корреляции лучевых концентраций молекул	52
2.8 Обсуждение	57
2.8.1 Признаки наличия горячего газа в МЗО	57
2.8.2 Особенности разрушения мантий пылинок вблизи МЗО	59
2.9 Резюме Главы 2	60
3 Глава 3. Классификация молекулярных облаков с помощью методов машинного обучения	62
3.1 Данные каталогов	63
3.2 Предварительная обработка данных	63
3.3 Методы машинного обучения	65
3.3.1 Метод главных компонент (РСА)	65

3.3.2	Метод стохастическое вложение соседей с t-распределением (t-SNE)	65
3.3.3	Классификатор случайного леса (Random Forest)	66
3.3.4	Классификатор градиентного бустинга	67
3.4	Фотометрия для объектов каталога MALT90 по данным Spitzer . . .	67
3.5	Результаты кластеризации	68
3.5.1	Кластеризация на основе интенсивностей линий молекул . .	69
3.5.2	Кластеризация на основе интенсивностей линий молекул, инфракрасных потоках Spitzer и маркеров наличия мазеров CH_3OH	73
3.6	Применение алгоритмов машинного обучения для классификации молекулярных облаков из каталога MALT90	79
3.7	Обсуждение	99
3.8	Резюме Главы 3	99
	Заключение	101

Введение

На протяжении многих веков астрономия развивалась от наблюдения и каталогизации крупных небесных тел к изучению межзвёздной среды (МЗС) и процессов, протекающих в молекулярных облаках – главных резервуарах газа и пыли в Галактике. 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 зарождаются звёзды. Эти объекты, с массами от 10^4 до 10^6 солнечных масс (M_{\odot}), содержат подавляющую часть молекулярного газа Галактики и являются ключевым звеном в цепочке звёздной эволюции.

Актуальность темы диссертации

Исследование процессов звездообразования является одной из ключевых задач современной астрофизики. С конца XX века исследователи стали уделять внимание процессу образования массивных звезд и их воздействию на окружающую межзвездную среду (см., например, обзоры [1, 2]). Массивные звезды — редкие объекты в Галактике. Однако, являясь источником мощного ультрафиолетового (УФ) излучения, они оказывают значительное влияние на межзвездную среду, изменяя ее химический состав и физические характеристики ([3]). Несмотря на это, процессы, приводящие к формированию массивных звезд изучены фрагментарно. 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 эти объекты еще более редкие, чем массивные звезды. Горячее ядро – компактная ($<0,1$ пк), плотная ($10^5 - 10^8 \text{ см}^{-3}$), массивная ($\sim 100 M_{\odot}$) и горячая ($>100\text{K}$) оболочка из газа и пыли, которая окружает формирующуюся массивную протозвезду ([4, 5]). На сегодняшний день известно меньше 100 горячих ядер в нашей Галактике, 7 горячих ядер в Большом Магелановом Облаке и 2 – в Малом ([6, 7, 8]). Для изучения процесса формирования массивных звезд фаза горячего ядра особенно важна, поскольку горячие ядра могут отражать физическую и химическую

среду, в которой рождаются массивные звезды. Эти объекты представляют собой не только астрофизический интерес, но и являются ключевыми в астрохимии. Они привлекли к себе внимание множества исследователей, так как именно в их направлении впервые были обнаружены сложные органические молекулы (молекулы с шестью и более атомами, [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, среди которых выделяются источники в RCW 120, поскольку находятся на исключительно ранней стадии формирования ([18, 19]). В Главе 1 с помощью телескопа АРЕХ исследуется химический состав молекулярного газа в окрестности молодых звездных объектов (МЗО) в RCW 120, а также кинематика газа. В свою очередь, в Главе 2 используется астрохимическое моделирование, позволяющее выявить причины повышенного содержания ключевой для формирования сложных органических молекул – метанола (CH_3OH) и связать наблюдаемое химическое разнообразие с 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 гораздо более развита, 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 ([20]).

Разные молекулы могут существовать при разных температурах и плотностях газа. Например, молекулы, такие как метан (CH_4) или аммиак (NH_3), могут быть характерными для холодных и плотных областей, а молекулы метилацетиллена (CH_3CCH) и метилцианда (CH_3CN) обнаруживаются в более горячих средах. 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 понятие критической плотности, которая представляет собой объемную плотность, необходимую для столкновительного возбуждения перехода в условиях оптически тонкой среды. Когда молекулы сталкиваются друг с другом, это может вызывать изменения в их энергетических состояниях, что, в свою очередь, отражает объемную плотность и кинетическую температуру среды. Структура энергетических уровней молекул определяет то, насколько эффективно мы можем исследовать эти характеристики МЗС. В Главе 2, используя некоторые из упомянутых выше молекул и другие соединения для определения физических условий в молекулярном газе области RCW 120. Также проведен анализ корреляций меж-

ду лучевыми концентрациями различных молекул. Это позволило выявить взаимосвязи химического состава с локальными физическими процессами в среде и подсветить схожесть и различия путей образования молекул.

В настоящее время в МЗС наблюдается большое количество молекул, и ожидается, что еще больше будет обнаружено, учитывая неопознанные линии в существующих спектральных обзорах. На август 2025 года известно 335 молекул от двухатомных до сложных органических соединений и только за текущий год было открыто 9 ранее не наблюдававшихся молекул¹. Современный рост объемов 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 Н II. Традиционные «ручные» методы с трудом справляются с обработкой таких больших объемов данных. В последние годы все более активно используются алгоритмы машинного обучения для анализа многомерных наборов наблюдательных данных ([21, 22]). 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 были применены уже не к конкретному объекту, а к молекулярным облакам на разных стадиях эволюции, среди которых данные по интегральным интенсивностям молекулярных линий, инфракрасным потокам и мазерам.

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 стало исследование молекулярного состава вблизи молодых звездных объектов, в том числе используя методы машинного обучения. Особое внимание уделяется исследованию области образования массивных протозвезд, распределению обилий молекул и физических характеристик в ней. Проведено изучение особенностей образования молекул в условиях постепенного прогрева газопылевой среды молодым звездным объектом. Для сравнения эффективности работы человека и искусственного интеллекта предпринята попытка внедрения современных методов анализа больших объемов данных для классификации моле-

¹<https://public.nrao.edu/gallery/grote-rebers-first-radio-telescope/>

кулярных облаков на основе особенностей излучения молекул в них.

Задачи диссертации

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- Провести наблюдения в широком диапазоне частот в окрестностях молодых звездных объектов, отождествить линии в полученных спектрах и исследовать пространственное распределение молекулярного излучения.
- Определить физические условия вблизи молодых звездных объектов и провести анализ распределения полученных параметров.
- Определить обилия молекул вблизи молодых звездных 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 звездными объектами в области RCW 120 в широком диапазоне частот в миллиметровом диапазоне. Наблюдения проводились на радиотелескопе APEX в Чили. Для моделирования обилий молекул использовался астрохимический код Presta. Для анализа результатов наблюдений применялись методы переноса излучения в условиях локального термодинамического равновесия (ЛТР).

Для сравнения эффективности работы человека и искусственного интеллекта были освоены методы машинного обучения и применены к анализу архивных данных каталога молекулярных облаков MALT 90 и данных инфракрасной обсерватории Spitzer, базы данных maserDB.

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Полный объем работы составляет 119 страниц, включая 33 рисунка и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 128 наименований.

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 H Побласти 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 (CH_3CN), формируется в более теплой среде по сравнению с областями, где доминируют линии метилацетилена (CH_3CCH) и метанола (CH_3OH). 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 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 с использованием моделирования предпринята попытка выявить причины, обуславливающие формирование наблюдаемой картины и обсуждаются особенности разрушения мантий пылевых частиц и как они отражаются на обилии молекул в газовой фазе.

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, инфракрасной обсерватории Spitzer и базы данных maserDB. 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 потенциал машинного обучения для изучения процессов звездообразования.

В **Заключении** подводятся итоги выполненной работы, обсуждаются дальнейшие направления исследования, а также приводятся Благодарности.

Положения, выносимые на защиту

1. В направлении на молекулярное облако с молодыми протозвездами из области RCW120 в диапазоне 200-260 ГГц получены спектральные карты излу-

чения 50 линий 24 молекул, ранее не наблюдавшиеся в этом объекте. Всего в направлении на горячее ядро RCW 120 S2 обнаружены 78 линий 34 молекул. Обнаружены как простые двухатомные, так и сложные органические молекулы: ^{13}CO , ^{13}CN , ^{33}SO , ^{34}SO , C^{18}O , C^{33}S , C^{34}S , CCH , CH_3CCH , CH_3CN , CH_3OH , CS , DCN , DCO^+ , H^{13}CN , H^{13}CO^+ , H_2^{13}CO , H_2CCO , H_2CN , H_2CO , H_2CS , HC^{15}N , HC_3N , HCOOCH_3 , HDCO , HN^{13}C , HNCO , HSO , OCS , SO , SO_2 , SiO , $c\text{-C}_3\text{H}_2$, H_2S . Построены карты распределения физических параметров молекулярного газа. Определены направления биполярных молекулярных истечений по анализу спектральных линий CH_3OH и SiO , а именно, истечение направлено вдоль луча зрения в горячем ядре RCW 120 S2, но вблизи протозвезды RCW 120 S1 истечение расположено в картинной плоскости.

2. В пределах одного и того же молекулярного облака из области RCW120 механизмы десорбции молекул с пыли неравнозначны. В южной части облака эффективная фотодесорбция или ударные волны ответственны за высокое содержание органических молекул, в частности, метанола до 10^{-6} относительно водорода. Показано, что десорбция происходит с поверхности ледяных мантий, богатых CO и метанолом. В северной части облака содержание молекул регулируется тепловой десорбцией.
3. Методами машинного обучения при анализе выборки интенсивностей излучения линий CCH , N_2H^+ , HCN , HNC , HCO^+ и CH_3OH в молекулярных облаках выделены три устойчивых кластера объектов: (1) протозвёзды, (2) II-области и ФДО и (3) облаками без активного звездообразования. Показано, деление на кластеры не зависит от потоков в дальнем ИК-диапазоне, что говорит об астрохимической схожести молекулярных облаков разных масс.
4. Определены типы более пятисот ранее неисследованных молекулярных облаков методами машинного обучения на основе данных об их излучении в среднем ИК-диапазоне и излучении молекул. Показано, что около восьмидесяти процентов объектов относятся к облакам без активного звездообразования.

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 CCH , N_2H^+ , HCN , HNC , HCO^+ можно эффективно разделить молекулярные облака на эволюционно разные группы.

Впервые определены типы пятиста ранее неисследованных молекулярных облаков методами машинного обучения на основе данных об их излучении в среднем ИК-диапазоне и излучении молекул.

Научная и практическая значимость

Работа вносит вклад в исследование процессов формирования массивных протозвезд и эволюции молекулярных облаков, уточняя представления о разнообразии молекулярного излучения и его распределении вблизи горячих ядер на самой ранней стадии формирования. Выявленные корреляции между лучевыми концентрациями молекул и их связь могут способствовать 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 более объективное 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

1. **Plakitina, K. V.**, Kirsanova M. S., Kalenskii S. V., Salii S. V., and Wiebe D. S.. "Chemical differentiation and gas kinematics around massive young stellar objects in RCW 120." *Astrophysical Bulletin* —2024, Vol.79(2), P. 235-259.
2. **Plakitina, K. V.**, Kirsanova M. S., Wiebe D. S. and Kochina O. V. "Gas-phase and Surface Chemistry in the Massive Star-Forming region RCW 120" *Astrophysical Bulletin* —2025, Vol.80(3), P. 311–330
3. **Plakitina, K. V.**, Kirsanova M. S., Ostrovskii A. B., Salii S. V., Gimalieva A. D. "Applying machine learning to astrochemical observational data— submitted

Другие публикации автора по теме диссертации

1. 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

2. **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, и 2 работы в материалах конференций. В работах 1 и 2 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 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 и 2023 г.

Глава 1

Химическое разнообразие и кинематика газа в области образования массивных звезд RCW 120

1.1 Область образования массивных звезд RCW 120

Воздействие со стороны массивных звезд может способствовать образованию протозвезд. Этот процесс может быть запущен триггерными механизмами или расширяющимися оболочками ионизированного водорода (H II-областей) [23]. Чтобы убедиться в правильности этих предположений, нужно исследовать крупномасштабные структуры (порядка кпк) в отдаленных галактиках, где можно наблюдать отдельные поколения звезд и области ионизированного водорода (см., например, работы [24, 25]). Однако, при исследовании областей звездообразования в нашей Галактике становится сложно установить, было ли образование конкретной группы протозвезд вызвано внешним (триггерным) фактором [26, 27, 28, 29]. Считается, что образование протозвезд 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 образованию протозвезд (см. [30]).

В период активного проведения обширных исследований, идея поиска отличий между различными этапами процесса звездообразования становится очень привлекательной. Для этого используются данные об интенсивностях спектральных линий, обилий молекул и многие другие. Например, [31] продемонстрировали, что эмиссионные линии N_2H^+ и CH_3OH являются более надежными инди-

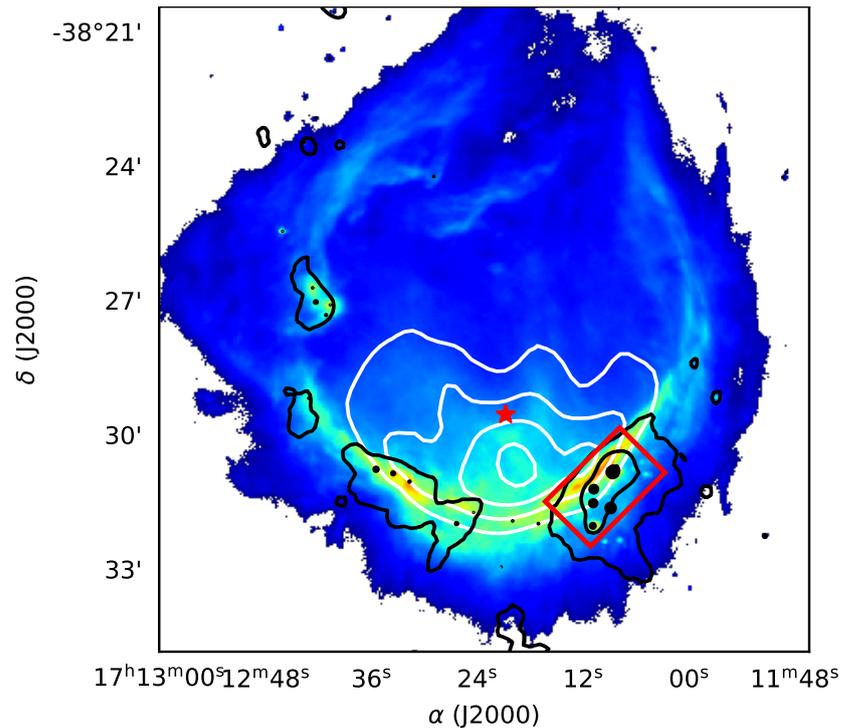


Рис. 1: Изображение RCW 120 при 70 мкм. Цветовая шкала показывает излучение нейтрального материала вокруг ионизированного газа. Положение ионизирующей звезды RCW 120 обозначено маркером в виде красной звезды. Белым цветом на изображении представлены контуры излучения радио-континуума с частотой 843 МГц [38], соответствующее свободному излучению ионизированного газа. Контуры этих радиоволн размещены линейно и представлены в диапазоне от 0.1 до 0.4 Ян/луч. Контуры для 870 мкм [39] при 0.4, 2.0 и 10.0 Ян/луч показаны черным цветом. Черные круги показывают местоположение компактных источников [40]. Размеры кругов линейно зависят от массы источников. Область, наблюдаемая в рамках данного исследования, показана красным прямоугольником.

каторами плотного молекулярного газа по спектральным линиям на 3 мм (см., например, [31]), по сравнению с другими широко используемыми индикаторами, такими как линии HCO^+ или HCN . Авторы работы [32] смогли определить различие между газом, находящимся под воздействием УФ-излучения и экранированного от него, используя несколько изотопологов CO и HCO^+ в том же молекулярном облаке. Основываясь на анализе лучевых концентраций в работе [33] показали, что молекулярные облака вокруг H II-областей (S 235 и S 235 A) имеют состав, типичный для темных звездообразующих облаков без признаков воздействия УФ-излучения. Масштабные исследования в ближнем ИК-диапазоне позволяют определить разницу между оболочками, созданными массивными звездами главной последовательности и молодыми звездными объектами (МЗО), погруженными в молекулярные облака (например, [34, 35, 36, 37] и многие другие).

В данной главе рассмотрена область фотодиссоциации (ФДО) RCW 120 имеет

кольцеобразную форму; она была сформирована в сплюснутом молекулярном облаке [41, 42, 43]. Ранее авторы работы [40] выделили ряд компактных источников на краю H II-области RCW 120, используя данные наблюдений космического телескопа Herschel в области RCW 120. Среди этих источников они обнаружили объекты, характеризующиеся массивными оболочками, эти объекты отождествлены с массивными молодыми протозвездами. Последующие исследования [44] подвергли сомнению сценарий триггерного механизма образования массивных протозвезд в RCW 120 и предположили, что образование массивных МЗО вокруг H II-области предшествовало расширению самой H II-области. Авторы работы [45] обнаружили наличие плотного слоя, который был порожден расширяющейся H II-областью, а также наличие молодых звезд 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 остается открытым. Этот вопрос интересен из-за возможного влияния этой области на функцию масс или временной масштаб звездообразования (см., например, [46]). Недавно в работе [19] было проанализировано излучение молекул CH_3CN и CH_3OH в двух МЗО, в окрестности RCW 120. Авторы оценили содержание этих молекул и физические параметры, окружающего газа в обоих МЗО, и обнаружили, что массивный МЗО RCW 120 S2 ([40]) начинает переход к фазе, которая сопровождается появлением т.н. горячего ядра – области, нагретой до 100 К и выше, в которой происходит интенсивное испарение молекул с пыли. По сравнению с более массивным МЗО RCW 120 S2, менее массивный RCW 120 S1 находится на более ранней стадии эволюции. Настоящая глава посвящена анализу распределения молекулярного излучения в облаке и изучению кинематики газа вблизи МЗО, чтобы выяснить, влияет ли наличие H II-области на эти источники в настоящее время.

1.2 Наблюдательные и архивные данные

Исследуется плотный молекулярный сгусток, расположенный непосредственно на юго-западной границей H II-области RCW 120. Используемые нами наблюдательные данные охватывают плотный молекулярный сгусток с погруженными в него молодыми звездными объектами (МЗО), предположительно находящиеся на самой ранней стадии горячего ядра и обозначенных 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 с использованием телескопа APEX (Atacama Pathfinder EXperiment telescope) в Чили [47] с 16 по 23 сентября 2021 года в рам-

ках проекта O-0108.F-9313-2021 (руководитель проекта: М. S. Kirsanova), которые проводились сотрудниками космической обсерватории Онсала. Для наблюдений использовался гетеродинный приемник nFLASH230, который одновременно охватывает две полосы частот по 8 Гц. При работе в режиме USB (верхняя боковая полоса), приемник 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 [48]). Были созданы две карты методом сканирования «на лету» (On-The-Fly (OTF)), размером $140''$ на $85''$ повернутые на 45° в экваториальной системе координат (с длинной стороной, простирающейся с юго-востока на северо-запад) с временем записи 1 с. 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 GILDAS². Дальнейший анализ проводился с использованием пакета Astropy ([49, 50]), а для представления результатов использовался APLpy [51, 52]. Конечные спектральные кубы данных были преобразованы в общую сетку с шагом $10''$ по направлениям x и y . Типичный уровень шума (1σ) 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 [53].

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

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

²<https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>

вглубь, будут обнаружены области, с разнообразными физическими условиями и химическим составом. Самый богатый состав молекул проявляется в направлении массивных МЗО. В частности, рассматривались 5 МЗО среди которых есть как МЗО промежуточных масс, так и массивные МЗО, которые были найдены [40]. В выбранном спектральном диапазоне и при пороге в 3σ , где $\sigma = 12 - 21$ мК – стандартное отклонение шума в спектре было идентифицировано в направлении МЗО S2 78 линий, принадлежащих 34 молекулам. Широкополосные спектры приведены на рис. 2, спектры в направлении пяти МЗО показаны на рис. 3– рис. 5.

Обнаруженные молекулы варьируются от двухатомных соединений (например, SO, CO) до сложных органических молекул (СОМ), таких как CH_3OH , CH_3CN , CH_3CCN , которые обычно наблюдаются в окрестностях горячих молекулярных ядер. Самая сложная из них — метилформиат HCOOCH_3 — состоит из 8 атомов. Насколько нам известно, это первое молекулярное исследование области RCW 120 в миллиметровом диапазоне с высоким разрешением.

Для изучения пространственного распределения молекулярного излучения вокруг МЗО и на границе RCW 120 ФДО, построены карты интегральных интенсивностей, которые показаны на рис. 6- 8. Для карт CH_3CN и CH_3CCN рассматривались $K = 0, 1, 2, 3$. Для карты CH_3OH рассматривались эмиссионные линии метанола в диапазоне частот 241680–241910 МГц. Карты яркостных температур для тех же линий показаны на рис. 9. При построении карт учитывалось пороговое значение сигнал-шум, равное 3σ , 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}CO , C^{18}O , ^{13}CN и малоатомных углеводородов $c\text{-C}_3\text{H}_2$, CCN (и его дейтерированного изотополога CCD), образование которых связано с проникновением УФ-квантов в молекулярный газ. Эти молекулы распространены в ФДО, и их излучение можно наблюдать вдоль излучения контуров пыли на длине волны 70 мкм, что показано голубыми контурами на рис. 6, 7. Излучение C^{18}O , например, распространяется от юго-востока к северо-западу, с наибольшей интенсивностью в направлении МЗО S2, в то время как яркое излучение ^{13}CO распределено более равномерно и даже простирается в направлении МЗО S1. Карты интегральных интенсивностей излучения CCN и $c\text{-C}_3\text{H}_2$ представляют промежуточное распределение излучения между первой и второй группами карт интегральных интенсивностей (см. ниже). Их излучение также имеет вытянутую форму в направлении северо-восток - юго-запад, но с максимумом излучения в направлении МЗО S2 и протяженным

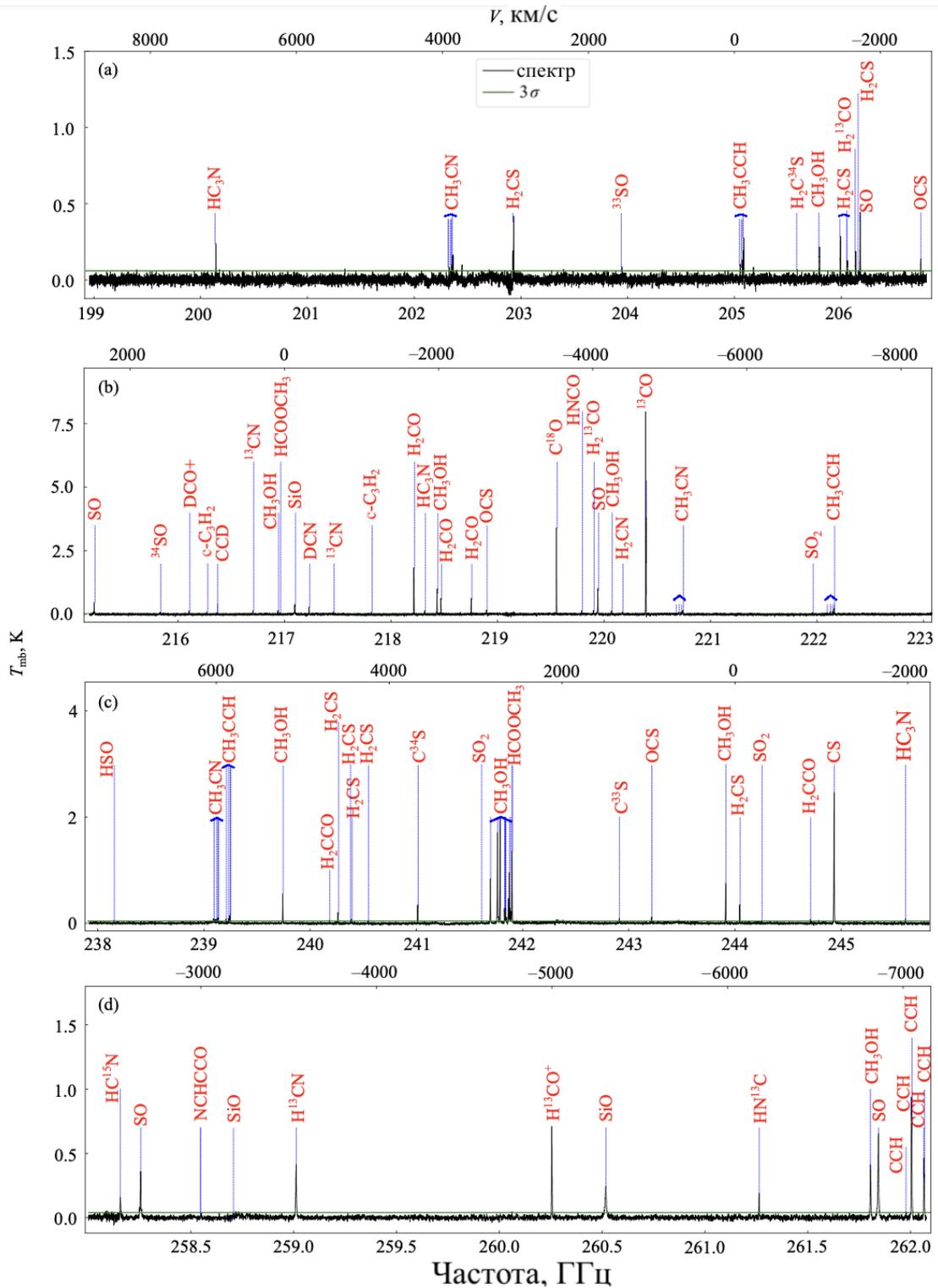


Рис. 2: Широкополосный спектр от приёмника nFLASH230 в направлении МЗО S2. Молекулы, линии которых идентифицированы, обозначены. Сплошная зелёная линия показывает уровень 3σ , где $\sigma = 19$ мК, 21 мК, 12 мК, 12 мК (от верхней панели к нижней).

излучением в направлении МЗО S1. Молекула $c\text{-C}_3\text{H}_2$ имеет другие условия возбуждения из-за своей критической плотности, которая на два порядка выше, чем у ^{13}CO и C^{18}O . Тем не менее излучение $c\text{-C}_3\text{H}_2$ также наблюдается параллельно RCW 120 ФДО.

Карта яркостной температуры для молекулы C^{18}O (2–1) изображенная на рис. 9, показывает заметное уменьшение величины яркостной температуры в направлении МЗО S10 и S39, что вызвано эффектом самопоглощения. Карты яркостных температур для молекул CCN и $c\text{-C}_3\text{H}_2$ в значительной степени схожи с их картами интегральной интенсивности, за исключением относительно яркого излучения к северо-западу, которое видно на карте T_{mb} и едва различимо на карте интегральной интенсивности. Это обусловлено тем, что линии CCN и $c\text{-C}_3\text{H}_2$ становятся яркими и узкими в направлении северо-запада. Предположительно, плотность газа выше в этом направлении, поскольку у этих двух простых углеводородов критическая плотность n_{crit} практически на два порядка выше, чем у изотопологов CO . В то время как ^{13}CO и C^{18}O обнаружены вдоль всей области фотодиссоциации, простые углеводороды наблюдаются только в его 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. 6- 8и 9

Молекула	Переход	Частота, МГц	E_u , К
HC_3N	$J=22-21$	200135.392	110.5
HDCO	$J_{K_a, K_c} = 3_{1,2} - 2_{1,1}$	201341.362	27.3
CH_3CN^a	$J_K = 11_0 - 10_0$	202355.510	58.3
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{1,6} - 5_{1,5}$	202924.054	47.3
^{33}SO	$J_{K_a, K_c} = 5_{4,6} - 4_{3,5}$	203939.255	38.3
CH_3CCH^a	$J_K = 12_0 - 11_0$	205080.732	64.0
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{0,6} - 5_{0,5}$	205987.858	34.6
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{3,4} - 5_{3,3}$	206052.602	153.1
$\text{H}_2\text{ }^{13}\text{CO}$	$J_{K_a, K_c} = 3_{1,3} - 2_{1,2}$	206131.626	31.6
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{2,4} - 5_{2,3}$	206158.602	87.3
SO	$J_K = 5_4 - 4_3$	206176.005	38.6
OCS	$J=17-16$	206745.156	89.3
SO	$J_K = 5_5 - 4_4$	215220.653	44.1
^{34}SO	$J_K = 5_6 - 4_5$	215839.920	34.4
DCO^+	$J = 3 - 2$	216112.582	20.7
$c\text{-C}_3\text{H}_2$	$J_{K_a, K_c} = 3_{3,0} - 2_{2,1}$	216278.756	19.5
CCD	$J_{K_a, K_c} = 3_{4,5} - 2_{3,4}$	216372.837	20.8

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	E_u , К
^{13}CN	$N=2-1, J=3/2-3/2, F1=2-1, F=1-2$	216710.144	15.6
H_2S	$J_{K_a, K_c} = 2_{2,0} - 2_{1,1}$	216710.437	84.0
HCOOCH_3	$J_{K_a, K_c} = 20_{0,20} - 19_{1,19}, A$	216964.157	111.5
SiO	$J = 5 - 4$	217104.919	31.3
DCN	$J = 3 - 2$	217238.538	20.9
^{13}CN	$N=2-1, J=5/2-3/2, F1=3-2, F=4-3$	217467.150	15.7
$c\text{-C}_3\text{H}_2$	$J_{K_a, K_c} = 6_{0,6} - 5_{1,5}$	217822.148	38.6
H_2CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{0,3} - 2_{0,2}$	218222.192	21.0
HC_3N	$J=24-23$	218324.723	131.0
H_2CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{2,1} - 2_{2,0}$	218760.066	68.1
OCS	$J=18-17$	218903.356	99.8
C^{18}O	$J = 2 - 1$	219560.354	15.8
HNCO	$J_{K_a, K_c} = 10_{0,10} - 9_{0,9}$	219798.274	58.0
H_2^{13}CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{1,2} - 2_{1,1}$	219908.525	32.9
H_2CN	$J_{K_a, K_c} = 3_{0,3} - 2_{0,2}, F=5/2-5/2, n=18-10$	220178.897	21.1
^{13}CO	$J = 2 - 1$	220398.667	15.9
CH_3CN^a	$J_K = 12_0 - 11_0$	220747.261	68.9
SO_2	$J_{K_a, K_c} = 11_{1,11} - 10_{0,10}$	221965.220	60.4
CH_3CCH^a	$J_K = 13_0 - 12_0$	222166.971	74.6
HSO	$N_{K_a, K_c} = 6_{2,5} - 5_{2,4}, J=13/2-11/2, F=6-5$	238156.771	93.4
CH_3CN^a	$J_K = 13_0 - 12_0$	239137.917	80.3
CH_3CCH^a	$J_K = 14_0 - 13_0$	239252.294	86.1
H_2CCO	$J_{K_a, K_c} = 12_{1,12} - 11_{1,11}$	240185.794	88.0
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{0,7} - 6_{0,6}$	240266.872	46.1
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{0,7} - 6_{0,6}$	240266.872	46.1
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{2,6} - 6_{2,5}$	240382.051	98.8
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{3,5} - 6_{3,4}$	240393.037	164.6
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{3,4} - 6_{3,3}$	240393.762	164.6
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{2,5} - 6_{2,4}$	240549.066	98.8
C^{34}S	$J = 5 - 4$	241016.089	27.8
SO_2	$J_{K_a, K_c} = 5_{2,4} - 4_{1,3}$	241615.797	23.6
$\text{CH}_3\text{OH}, v_t = 0-2^a$	$J_{K_a, K_c} = 5_{0,5} - 4_{0,4}, A^+$	241791.352	34.8
C^{33}S	$J_K = 5_0 - 4_0$	242913.610	35.0
OCS	$J=20-19$	243218.036	122.6
H_2CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{1,6} - 6_{1,5}$	244048.504	60.0
SO_2	$J_{K_a, K_c} = 14_{0,14} - 13_{1,13}$	244254.218	93.9

Продолжение на следующей странице

Таблица 1 – Продолжение

Молекула	Переход	Частота, МГц	E_u , К
H ₂ CCO	$J_{K_a, K_c} = 12_{1,11} - 11_{1,10}$	244712.269	89.4
CS	$J = 5 - 4$	244935.557	35.3
HC ₃ N	$J = 27 - 26$	245606.320	165.0
HC ¹⁵ N	$J = 3 - 2$	258156.996	24.8
SO	$N_J = 6_6 - 5_5$	258255.826	56.5
H ¹³ CN	$J = 3 - 2$	259011.798	24.9
H ¹³ CO ⁺	$J = 3 - 2$	260255.339	25.0
SiO	$J = 6 - 5$	260518.009	43.8
HN ¹³ C	$J = 3 - 2$	261263.513	25.1
SO	$J_K = 6_7 - 5_6$	261843.721	47.6
CCH ^a	$N_J = 3_{7/2} - 2_{5/2} \quad F = 4 - 3$	262004.260	25.1
CCH	$N_J = 3_{5/2} - 2_{3/2}, \quad F = 3 - 2$	262064.986	25.2
CCH	$N_J = 3_{5/2} - 2_{3/2}, \quad F = 2 - 1$	262067.469	25.2

^aХарактеристики 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, CH₃OH, SiO, DCO⁺, H¹³CO⁺, H₂CO, HNCO, HDCO, H₂CO, H₂¹³CO, H₂CS, HN¹³C, SO, ³³SO, HC₃N, OCS, SO₂. Линии молекулярного излучения из этой группы имеют схожее распределение с компактным точечным возрастанием интенсивности в направлении МЗО S1 и S2, а также в 1.5–3 раза с менее ярким и 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 молекулы DCO⁺ 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⁺, 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 C³⁴S, SO, DCN, CH₃CCH, CH₃CN, H₂S, H₂CS, H¹³CN, H₂CN, HC¹⁵N, ³⁴SO, C³³S, HSO, а также органические молекулы H₂CCO и HCOOCH₃. Интегральные интенсивности азотсодержащих соединений (DCN,

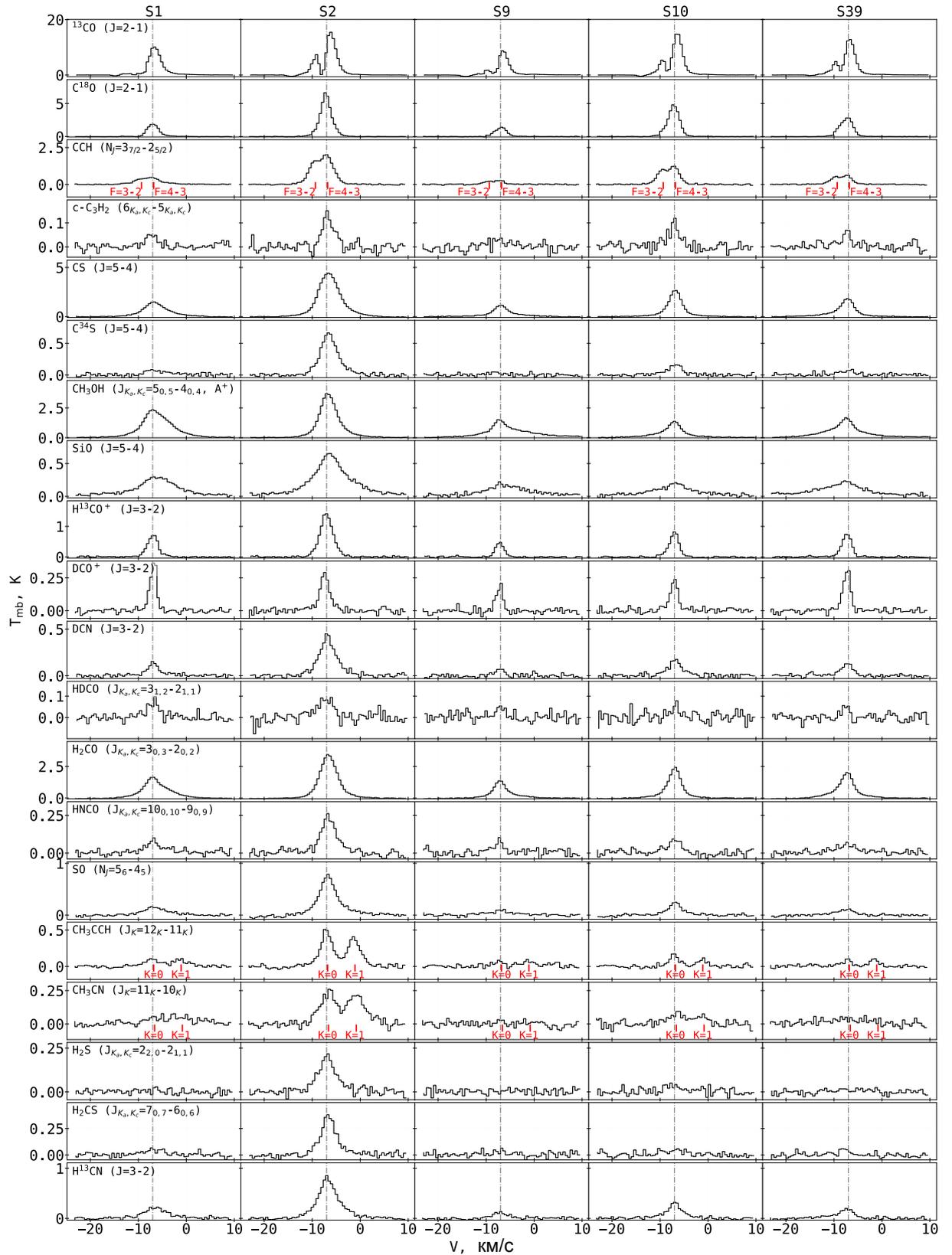
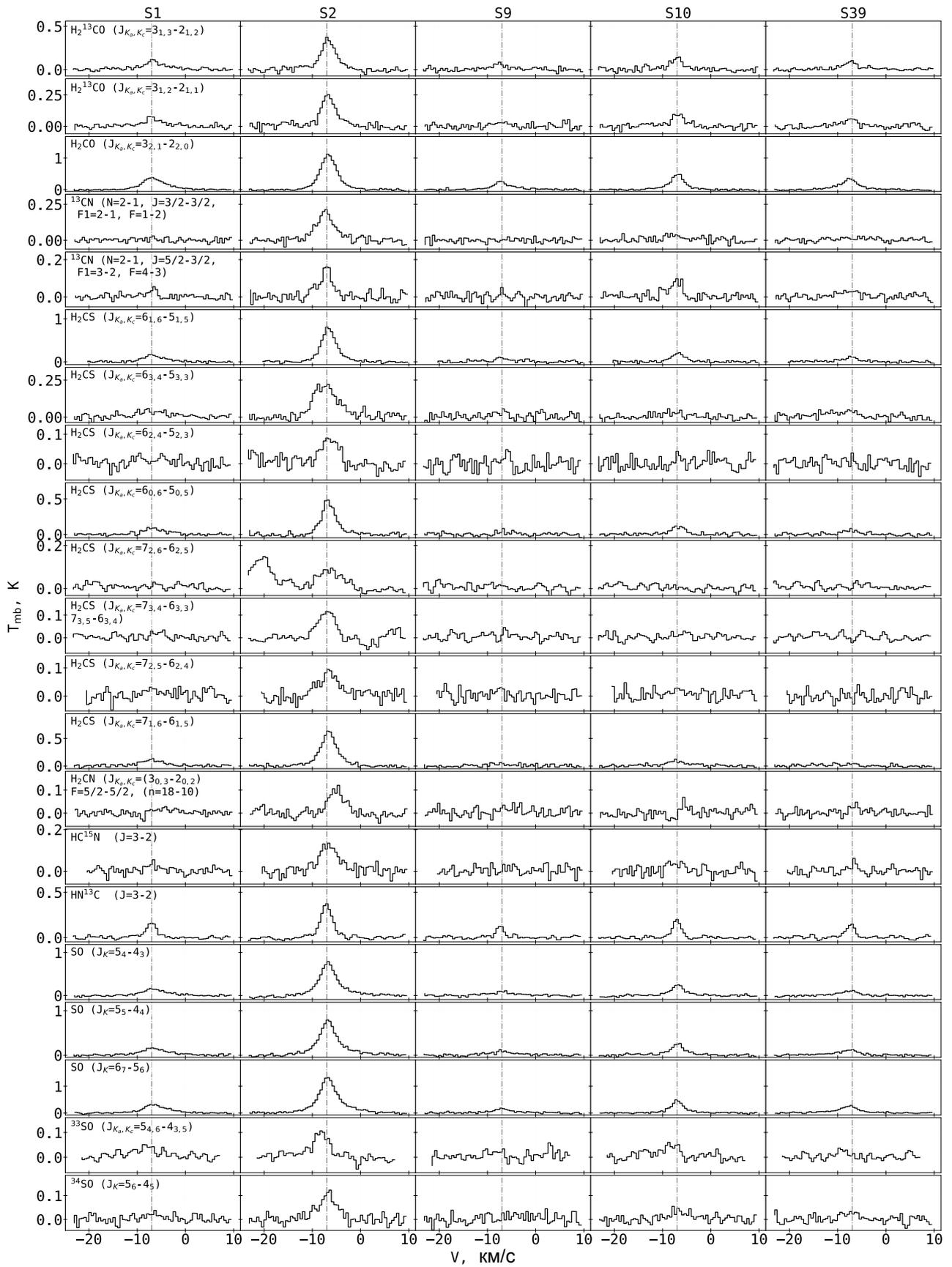


Рис. 3: Спектральные линии обнаруженных молекул в направлении пяти молодых звездных объектов (МЗО): S1, S2, S9, S10, S39. Пунктирная серая линия обозначает $V_{\text{LSR}} = -7 \text{ km s}^{-1}$.



(a)

Рис. 4: Продолжение рис. 3.

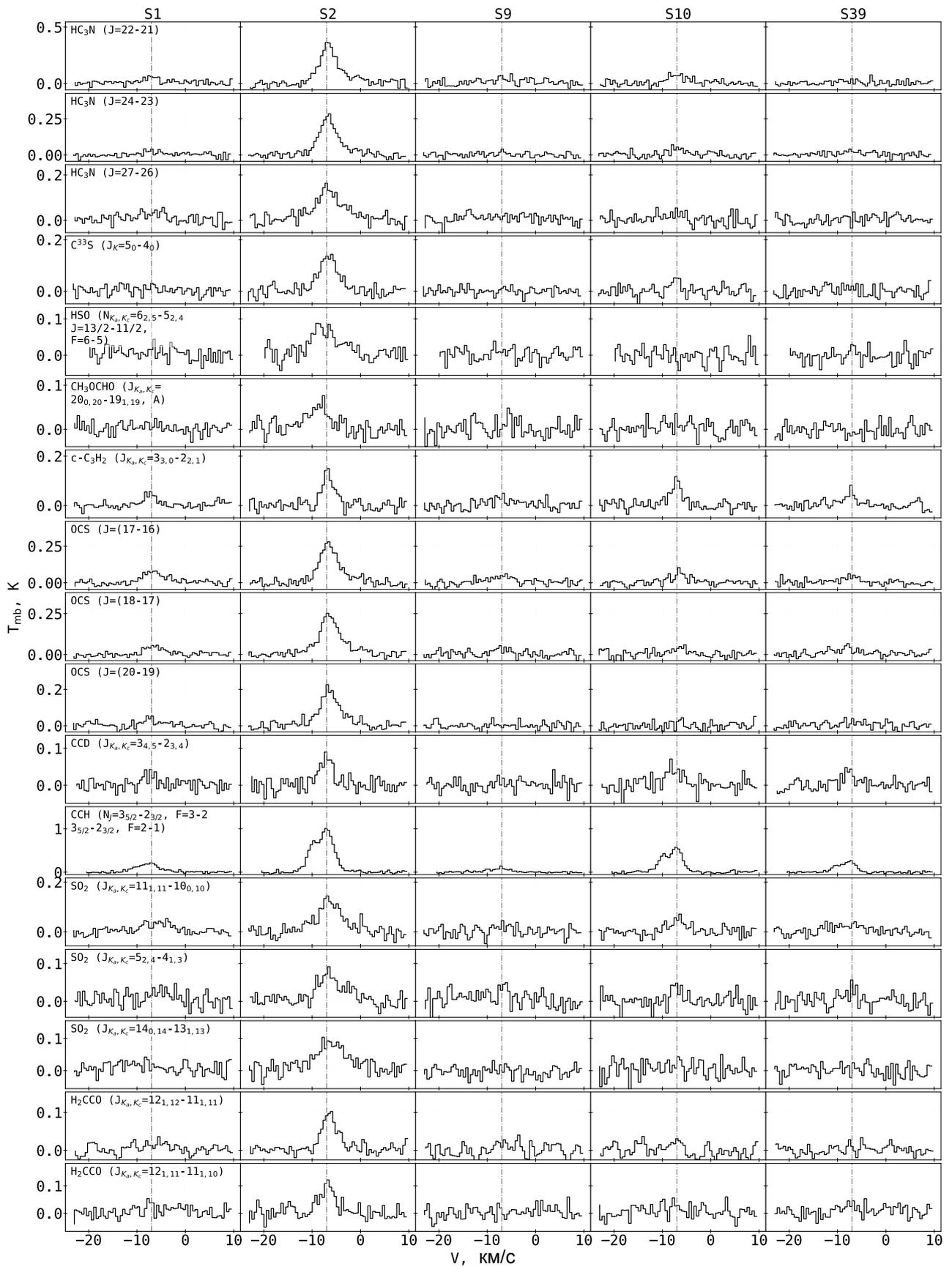


Рис. 5: Продолжение рис. 3.

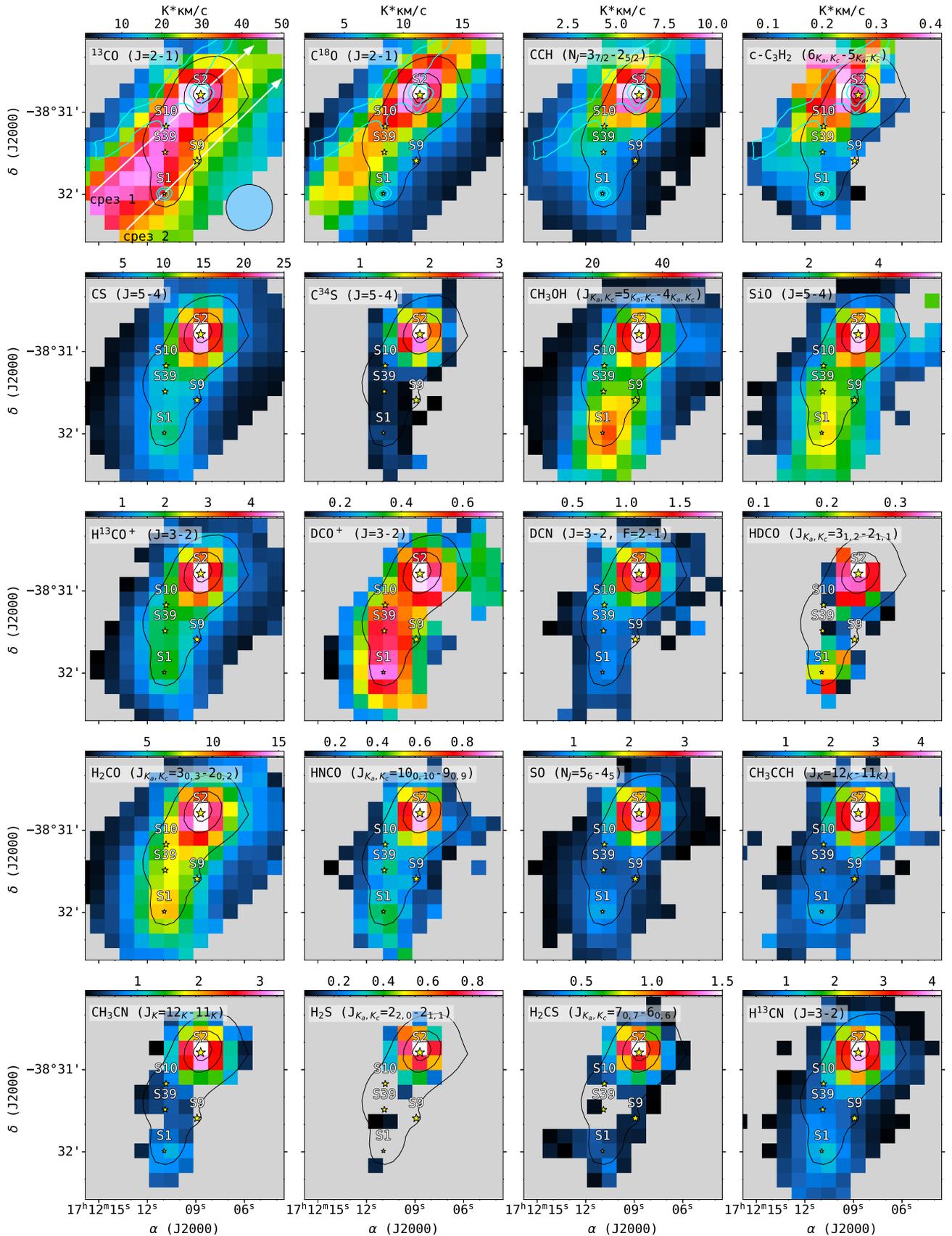


Рис. 6: Карты интегральных интенсивностей (карты нулевых моментов) рассматриваемых молекул. Молодые звездные объекты (МЗО) обозначены маркерами в виде желтых звезд, размер маркера-звезды пропорционален массе каждого МЗО. Черные контуры показывают излучение пыли на длине волны 870 мкм, уровни контуров 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}CO обозначен приведенный размер диаграммы направленности APEX.

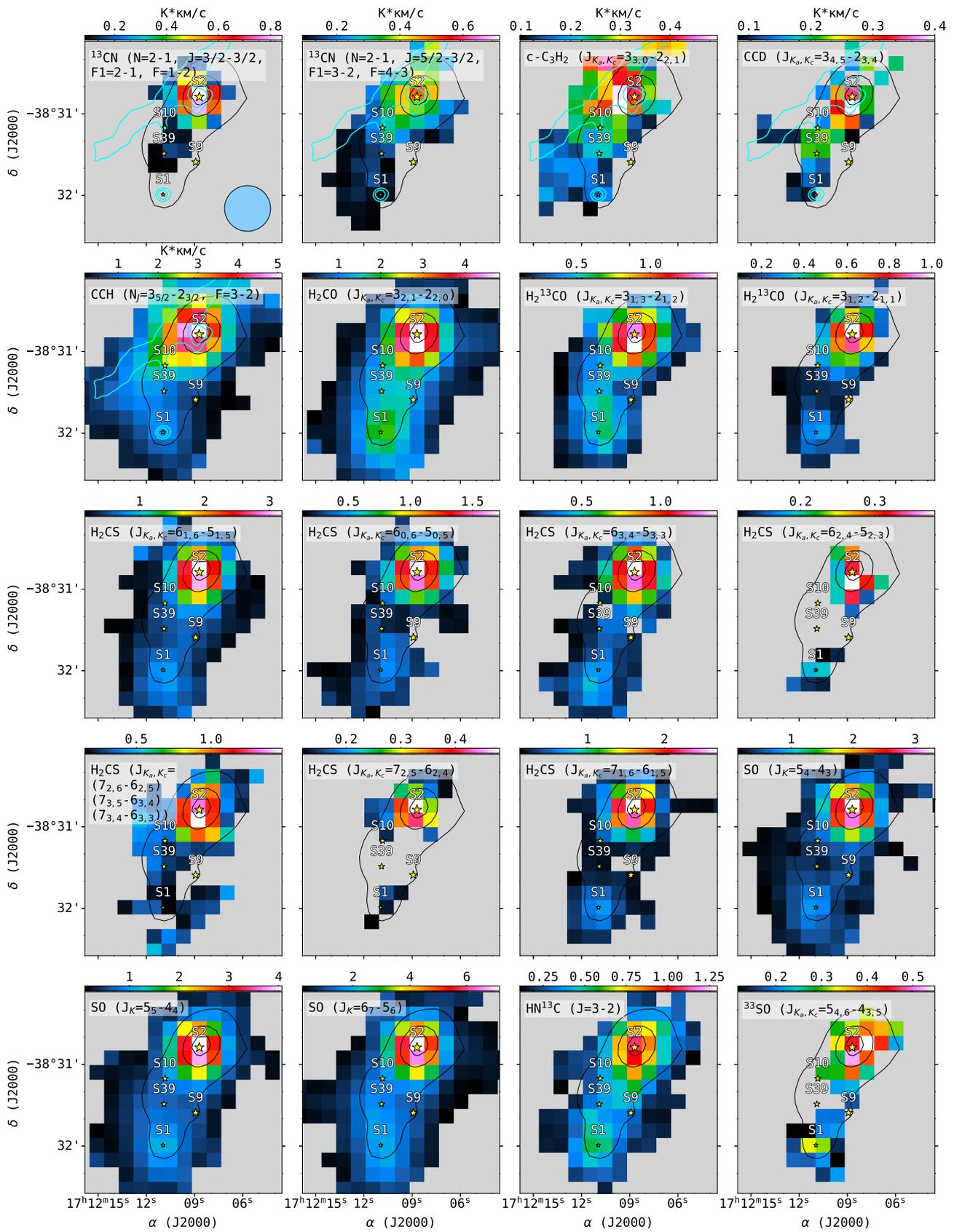


Рис. 7: Продолжение рис. 6.

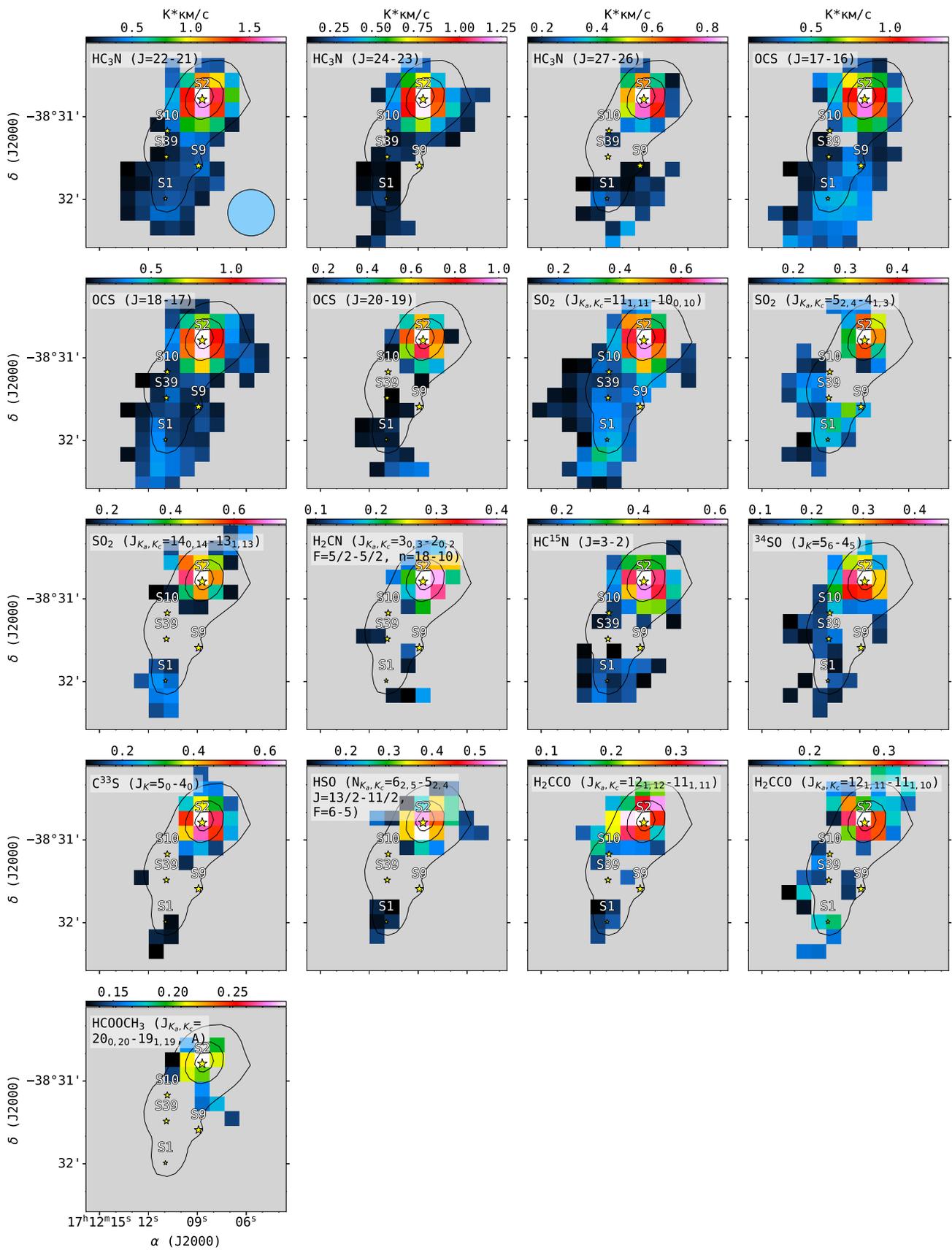


Рис. 8: Продолжение рис. 6.

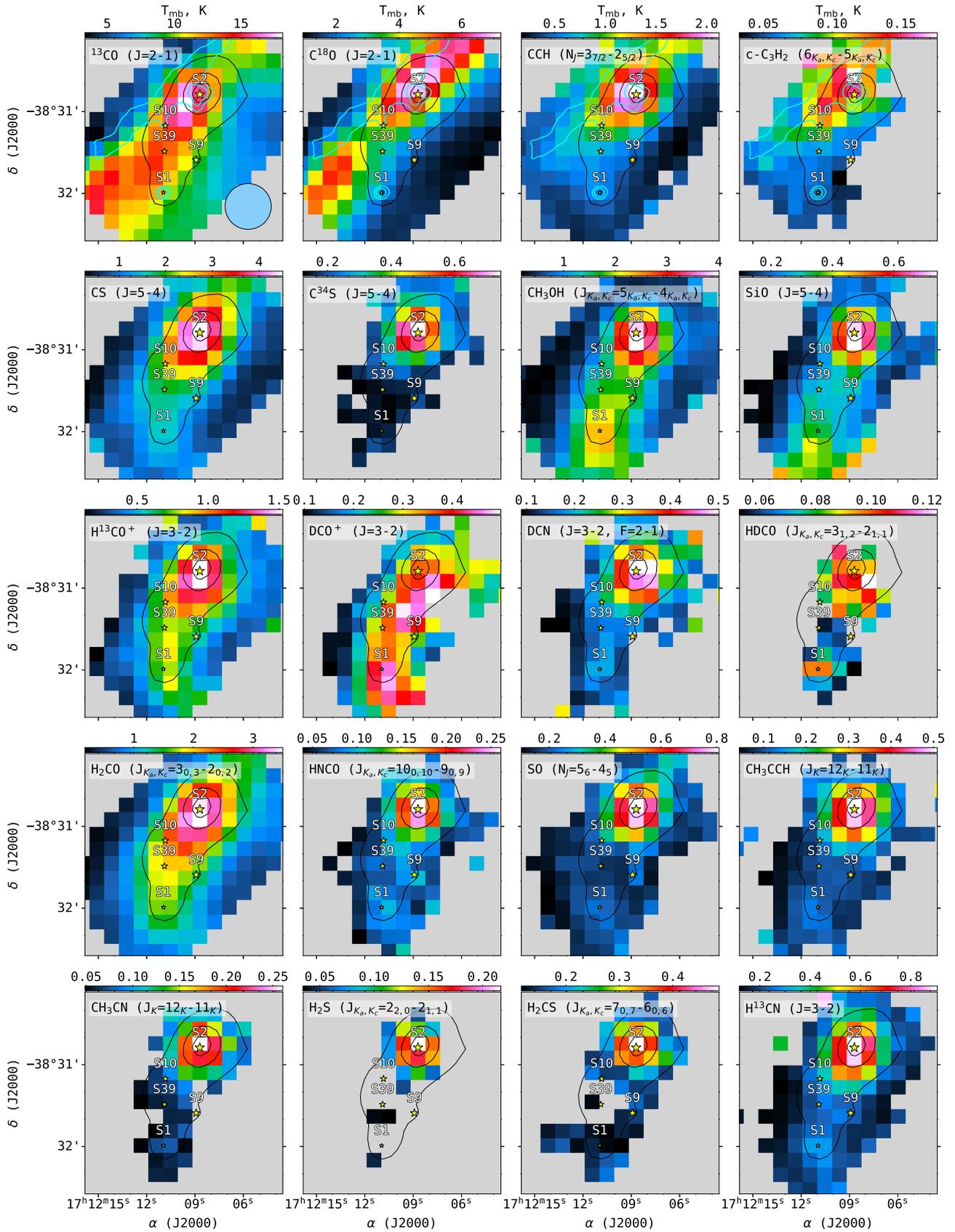


Рис. 9: Карты яркостной температуры линий двадцати молекул с наиболее яркими линиями. Молодые звездные объекты (МЗО) обозначены маркерами в виде желтых звезд, размер маркера-звезды пропорционален массе каждого МЗО. Черные контуры показывают излучение пыли на длине волны 870 мкм, уровни контуров составляют 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.

CH_3CN , H^{13}CN) симметричны относительно МЗО S2. В то время как асимметричное распределение молекулярного излучения в направлении S2 наблюдается для серосодержащих соединений: C^{34}S , SO , H_2S , H_2CS . Яркое излучение смещено на восток относительно МЗО S2. Распределение излучения CH_3CCH 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 Кинематика молекулярного газа

Для изучения кинематики газа внимание было сосредоточено на поиске высокоскоростных крыльев линий излучения SiO и CH_3OH . Эти молекулы обычно используются для обнаружения истечений в окрестностях горячих молекулярных ядер (например, [54, 55, 56]). Изучаемое молекулярное облако имеет градиент скорости северо-запад–юго-восток, приблизительно равный -1 км с^{-1} (см. [42, 45]). Поэтому необходимо учитывать этот градиент при изучении истечений по крыльям спектральных линий вблизи МЗО. Для выделения крыльев на картах излучения было произведено приближение линий функцией Гаусса в каждом пикселе. Излучение, выходящее за пределы порога, равного скорости, на которую приходится максимум излучения $\pm \text{FWHM}/2$, идентифицировалось как синие и красные интервалы. Интегрированное излучение, попадающее в интервал ширины профиля на половине высоты, считается основным излучением в каждом пикселе и называется средним интервалом.

Были построены карты излучения линий SiO (5–4) и CH_3OH ($5_{0,5}$ – $4_{0,4}$) в красных и синих интервалах скоростей. Примеры интервалов для МЗО S1 и S2 и карты излучения в этих интервалах показаны на рис. 10. Излучение красного и синего крыла в обеих линиях практически накладываются друг на друга в направлении на МЗО S2. Поэтому 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 SiO , как это можно увидеть на примере спектров SiO и метанола слева на графике рис. 10. Вокруг МЗО S1 также наблюдаются красные и синие крылья. Это излучение выглядит как биполярное истечение, ориентированное с северо-запада на юго-восток. Есть еще одна область с излучением синего крыла в направлении к МЗО S39. Профили метанола выглядят как состоящие из нескольких перекрывающихся компонентов, однако разделение этих компонентов в некоторых конкретных областях невозможно. Возможная причина – размер диаграммы направленности, который сопоставим с угловым расстоянием между МЗО.

Для изучения кинематики на более крупном масштабе были построены диаграммы позиции-скорости (или PV-диаграммы) из срезов, ориентированных параллельно ФДО RCW 120, используя линии CH_3OH ($5_{0,5}$ – $4_{0,4}$), $\text{C}^{18}\text{O}(2-1)$ и $\text{DCO}^+(3-2)$

на рис. 11. Сами срезы показаны белыми стрелками на рис. 6, наложенными на панель ^{13}CO и обозначенными как «срез 1» и «срез 2». Эти срезы пересекаются с МЗО S10 и S2 (обозначенные как срез 1), а также с МЗО S1 и S9 (обозначенные как срез 2). Заметный контраст в компонентах скорости выявился при изучении PV-диаграммы вдоль среза 1 C^{18}O (рис. 11). Двигаясь вдоль среза с юго-востока на северо-запад, пик скорости линии сдвигается примерно с -9 км с^{-1} на -6 км с^{-1} недалеко от МЗО S10. По левую сторону от МЗО S10 по этому срезу нет плотного газа, как видно на рис. 11. Этот сдвиг становится менее выраженным на срезе 2, который находится вдали от ФДО. Здесь наблюдается почти прямая линия вдоль среза 2 с незначительной особенностью самопоглощения.

Диаграммы позиция-скорость линий таких молекул, как CH_3OH и SiO , отличаются от того, что наблюдается для C^{18}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 SiO , чем на диаграмме CH_3OH .

Однако на PV-диаграмме 11 линия $\text{DCO}^+(3-2)$ узкая даже в направлении МЗО. Видно узкую линию между МЗО S2 и S10 на срезе 1 и отсутствие DCO^+ в области со сдвинутой линией $\text{C}^{18}\text{O}(2-1)$. На срез 2 есть две разделенные области с одинаковой скоростью, а именно, первая – между МЗО S1 и S9 и вторая – без МЗО. Положения МЗО совпадают с границами областей на обеих диаграммах. Очевидно, истечения не видны на диаграммах $\text{DCO}^+(3-2)$, а только спокойный молекулярный газ в противоположность всем рассмотренным выше молекулам.

1.5 Обсуждение

Анализ кинематики газа и содержания молекул показывает, что плотный молекулярный сгусток на границе ФДО RCW 120 состоит из двух частей: южной части, 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, определяемые по широким крыльям линий CH_3OH и SiO . Узкая линия C^{18}O на PV-диаграмме согласуется со скоростью слоя, подвергнувшегося воздействию расширяющейся оболочки H II, полученными в работе [45]. В [46] авторы 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 км с^{-1} до -9 км с^{-1} около МЗО S10. Стоит отметить, что этот сдвиг может быть связан с различной плотностью молекулярного облака, где плотный газ вокруг МЗО S2 замедляет ударную волну более эффективно, чем менее плотный газ к востоку от МЗО.

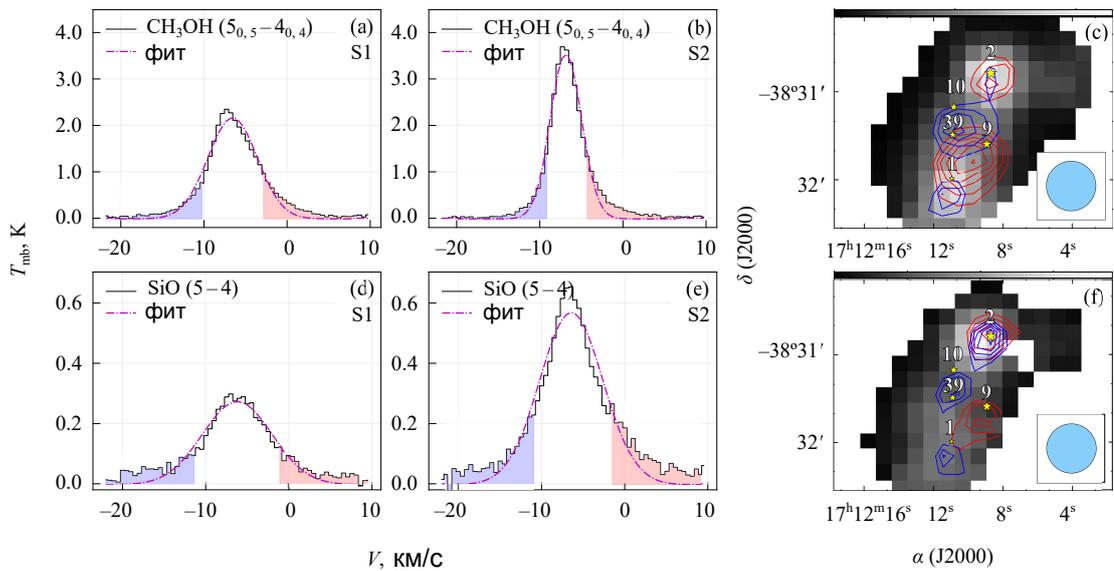


Рис. 10: Верхняя панель: Оттенками серого показана интегральная интенсивность средней компоненты излучения линии CH_3OH ($5_{0,5}-4_{0,4}$, A^+). Синие и красные контуры указывают на излучение линии CH_3OH смещенное в синюю и красную стороны, соответственно. Уровни красных контуров составляют: 20, 24, 28, 32, 36, 40 σ , а уровни синих контуров составляют: 14, 16, 18, 20 σ ($\sigma = 0.15 \text{ K km s}^{-1}$). Нижняя панель: Оттенками серого показана интегральная интенсивность средней компоненты излучения линии SiO (5-4). Синие и красные контуры указывают на излучение линии SiO , смещенное в синюю и красную стороны соответственно. Уровни красных контуров составляют: 6, 7, 8, 9, 10 σ , а уровни синих контуров составляют: 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5 σ ($\sigma = 0.14 \text{ K km s}^{-1}$).

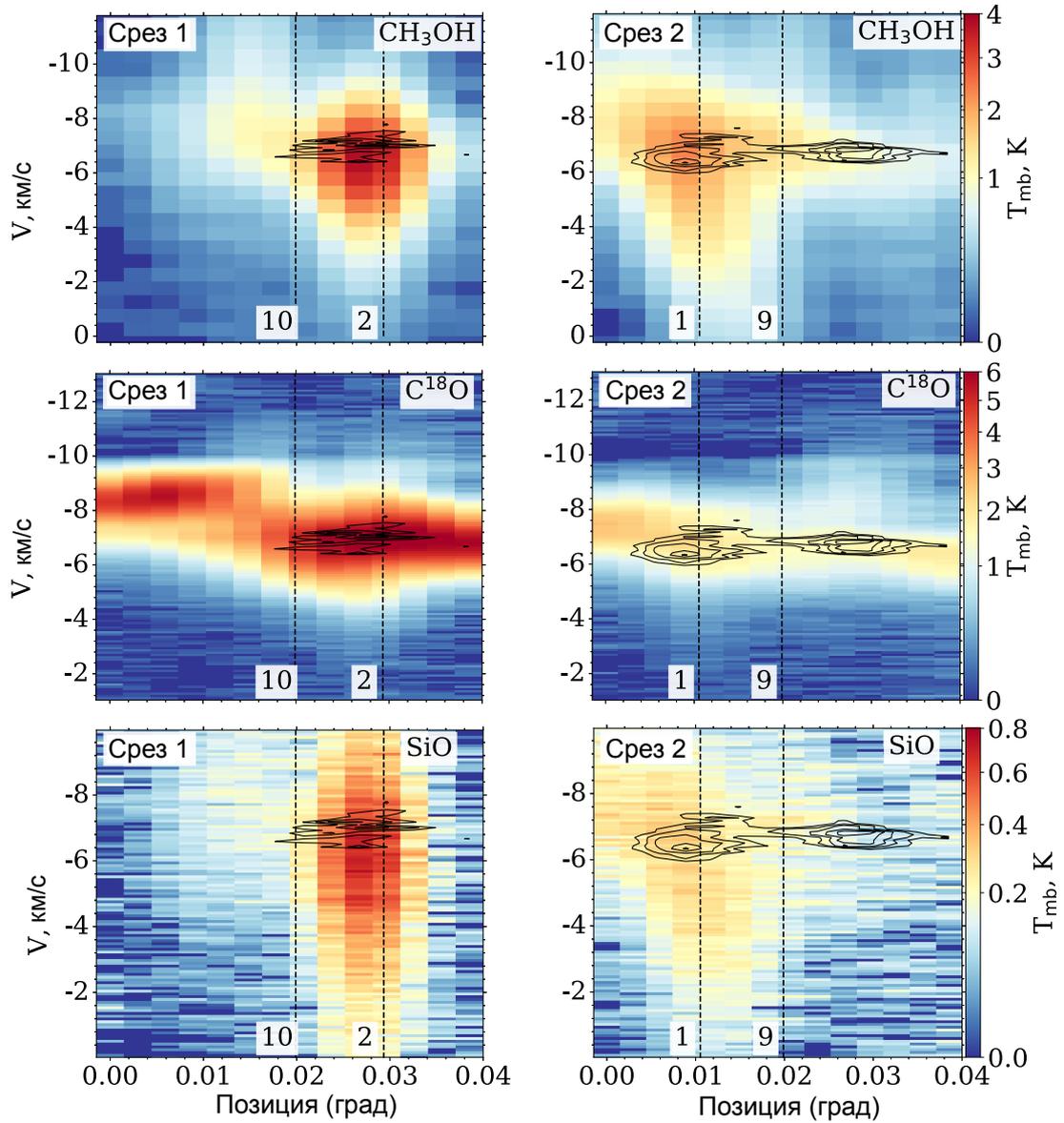


Рис. 11: Диаграммы позиция-скорость (PV-диаграммы) излучения линий CH_3OH ($5_{0,5}-4_{0,4}$), SiO ($5-4$) и C^{18}O ($3-2$) показаны цветом. Черные пунктирные линии указывают на положение молодых звездных объектов (МЗО). PV диаграмма излучения линии DCO^+ ($3-2$) показана черными контурами. Уровни контуров изменяются от 0.25 К до 0.6 К с шагом 0.05 К.

1.6 Резюме Главы 1

С помощью телескопа АРЕХ были проведены наблюдения излучения молекулярных линий в плотном молекулярном сгустке на границе ФДО RCW 120, где МЗО все еще 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, которые были отождествлены с 34 различными молекулами, включая двухатомные молекулы, такие как CS и SO, а также сложные органические молекулы, такие как CH₃CN, CH₃CCH, HCOOCH₃. Были сделаны следующие выводы.

- Обнаружено, что все карты интегральной интенсивности можно разделить на три группы: (i) Молекулы, которые присутствуют повсеместно в ФДО (¹³CO, C¹⁸O, малые углеводороды CCH и *c*-C₃H₂), (ii) молекулы, чье излучение пространственно коррелирует с излучением пыли на длине волны 870 мкм (CS, CH₃OH, SiO, DCO⁺, H¹³CO⁺, H₂CO, HNCO, HDCO), (iii) молекулы, чье излучение в основном наблюдается в направлении на МЗО S2 (молекулы, содержащие серу: SO, C³⁴S, H₂S, H₂CS; азотсодержащие соединения: DCN, H¹³CN, CH₃CN; и CH₃CCH)
- Анализ спектральных линий молекул-индикаторов ударных волн, таких как CH₃OH и SiO, показал широкие, асимметричные профили вблизи МЗО. Это свидетельствует о наличии истечений в наблюдаемых областях. Предполагается наличие истечения вдоль луча зрения около МЗО S2, а также присутствие истечения в картинной плоскости вблизи МЗО S1. Дополнительные исследования излучения CH₃OH и SiO требуются для выяснения происхождения истечений, поскольку наши данные имеют недостаточное пространственное разрешение.

Глава 2

Газофазная и поверхностная химия в области образования массивных звезд RCW 120

В современную эпоху, когда рутинными стали обзоры областей звездообразования в миллиметровом диапазоне со сверхвысоким ($R \geq 10^7$) спектральным разрешением ([57]), в том числе обзоры галактической плоскости ([58]), генерирующие большие объемы данных, остро встал вопрос об эффективной интерпретации этих наблюдений. Путем к решению 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 ([59, 60]). Применение этих методов осложняется тем, что распределение яркости излучения молекул определяется далеко не только общим распределением вещества или распределением условий возбуждения, но и особенностями протекания 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 этой главе определяются физические условия вблизи МЗО и рассматривается возможность исследования астрохимических путей образования молекул на основе статистических методов анализа. Из многочисленных наблюдений и моделирования известно, например, что малоатомные углеводороды, такие как CCH, образуются в газовой фазе, причем этот процесс может идти как от простых соединений к сложным ([61, 62]), так и наоборот ([63, 64]). Другие малоатомные молекулы, например, SO и OCS ([65]), могут также образовываться и на пыли, однако она особенно важна в качестве катализатора образования сложных органических молекул — метанола и еще более сложных соединений ([66, 67], см. также [68]). С другой стороны, некоторые сложные молекулы, например C₃H₂ и другие длинные углеродные цепочки, образуются в газовой фазе ([69, 70]). Наконец, многим молекулам, например, воде, присущи несколько

химических каналов образования (см. например, работу [71]), и для них актуален вопрос о преобладании какого-либо канала в тех или иных физических условиях.

2.1 Лучевые концентрации молекул в приближении ЛТР

Как было показано в ряде работ (например, [42, 44, 19, 72, 45]), приближение локального термодинамического равновесия (ЛТР) хорошо описывает физические условия в исследуемом молекулярном облаке. Поэтому было использовано это приближение для анализа излучения всех обнаруженных молекул. В Главе 1 были показаны спектры и карты молекулярного излучения для 34 молекул. Для тех молекул, для которых у нас есть три или более переходов, построены вращательные диаграммы для определения вращательных температур. Во всех остальных случаях в качестве температуры возбуждения T_{ex} принята температура пыли T_{dust} . В плотных молекулярных сгустках, где состояние газа близко к ЛТР, T_{dust} должна быть близка к температуре газа и температуре возбуждения молекул. Используя T_{dust} в качестве T_{ex} , полученные лучевые концентрации молекул дают оценку снизу, поскольку не имеется возможности оценить оптические толщины линий излучения. Температура пыли была определена путем анализа данных дальней инфракрасной области спектра, полученных с помощью космической обсерватории *Herschel*, а также данных ATLASGAL.

Такие молекулы, как метилацетилен (CH_3CCH) и метилцианид (CH_3CN) часто используются в качестве «термометров» для теплого и плотного газа (см., например, [73, 74, 75, 76, 77]). Обе молекулы являются молекулами типа симметричного волчка. Вращательные переходы между состояниями CH_3CCH и CH_3CN описываются двумя квантовыми числами: полным моментом импульса (J) и его проекцией на ось симметрии (K). Переходы этих молекул охватывают широкий диапазон энергетических уровней. Вращательные переходы $J \rightarrow J-1$ с теми же числами K тесно расположены по частоте и могут наблюдаться одновременно. Как показано в работе [78] CH_3CCH может в качестве «зонда» для определения кинетической температуры молекулярного газа, благодаря относительно небольшому дипольному моменту (0.784 Д [79]). В то время как CH_3CN термализуется только в областях с высокой плотностью, поскольку его дипольный момент 3.92 Д [80].

Для определения лучевых концентраций и вращательных температур использовался метод вращательных диаграмм, основанный на работе [81], в которой авторы обобщили и систематизировали этот подход. Этот метод основывается 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_{rot} — вращательная температура, Q — вращательная статистическая сумма, T_{rot} , g_u — статистический вес уровня, E_u — энергия верхнего уровня, k_B — постоянная Больцмана. Лучевая концентрация молекул в оптически тонком приближении N_u^{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 ν — 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 $\ln(N_u^{\text{thin}}/g_u)$ относительно E_u/k_B выглядит как прямая линия вида $y(x) = -kx + b$, откуда можно получить вращательную температуру, которая обратно пропорциональна тангенсу угла ее наклона к оси x . Полная лучевая концентрация молекулы $N_{\text{tot}}^{\text{thin}}$ может быть найдена тогда из точки, где построенная линия пересекает ось y , как $\ln(N_{\text{tot}}^{\text{thin}}/Q(T_{\text{rot}}))$. Статистическая сумма $Q(T_{\text{rot}})$, зависящая от T_{rot} , была найдена путем интерполяции данных, предоставленных в Кельнской базе данных по молекулярной спектроскопии, CDMS, [82]¹. Были использованы значения Q , включающие как A , так и E типы молекул CH_3CCH , CH_3CN , CH_3OH .

Для молекул, температура возбуждения которых не поддавалась оценке, была использована методика, описанная в работе [83], для определения лучевых концентраций молекул. Сначала вычислялись лучевые концентрации, с использованием оптически тонкого приближения:

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

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

¹<https://cdms.astro.uni-koeln.de>

$\frac{J_u^2 - K^2}{J_u(2J + 1)}$ для молекул типа симметричного волчка, μ — постоянный дипольный 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_{ex} — температура возбуждения, $J_\nu(T)$ — эквивалентная интенсивность черного тела при температуре T :

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

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

Проводя наблюдения в широком диапазоне частот, были обнаружены как оптически толстые линии молекул, так и линии некоторых изотопологов. Учитывая малые обилия изотопологов, разумно предположить, что связанные с ними линии можно считать оптически тонкими, что позволяет оценить оптическую толщину основного изотополога τ_ν используя значения максимумов яркостных температур $T_{\text{mb, thin}}$ и $T_{\text{mb, thick}}$, для оптически тонких и оптически толстых линий 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 [84]). Уравнение было решено с помощью функции `fsolve` из модуля Python `scipy.optimize`². Используя ту же функцию Python и предполагая, что среда однородна, температуры возбуждения T_{ex} определялись следующим образом:

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

Исходя из схожести сечений столкновений, температура возбуждения всех изотопологов считалась одной и той же. Используя это предположение, были определены лучевые концентрации молекул CO (используя изотопологи ^{13}CO и C^{18}O) и CS (в сочетании с C^{34}S). Для расчета были применены 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. [84]). Для отношения изотопов $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ использовалось значение $r = 22$. Как показано в работе [85], это отношение не изменяется с расстоянием от галактического центра. Для всех остальных молекул температура пыли T_{dust} использовалась в качестве температуры возбуждения T_{ex} .

²<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 применен следующий подход. Считая их излучение оптически тонким, использовались уравнения (2.2) и (2.1) для вычисления их лучевых концентраций.

Для расчета лучевых концентраций орто+пара состояний молекул H_2CO и $s\text{-C}_3\text{H}_2$, использовались отношение ядерных спиновых изомеров 3 : 1 для орто:пара. Для определения общей лучевой концентрации $s\text{-C}_3\text{H}_2$ учитывалось, что орто-состояние находится на 1.63 cm^{-1} выше основного состояния.

2.2 Результаты. Физические условия в молекулярном газе

В наблюдаемом диапазоне частот были обнаружены серии линий $J_K = 14_K-13_K$, $J_K = 13_K-12_K$, $J_K = 12_K-11_K$ для CH_3CSH и $J_K = 14_K-13_K$, $J_K = 13_K-12_K$, $J_K = 12_K-11_K$, $J_K = 11_K-10_K$ для CH_3CN . Для этих переходов применен метод вращательных диаграмм, описанный ранее, для определения физических условий в плотном молекулярном сгустке. Также использовались четыре наиболее яркие линии серии $J_{K_a, K_c} = 5_{K_a, K_c} - 4_{K_a, K_c}$ метанола для оценки лучевой концентрации этой молекулы по всей полученной карте. Интегральные интенсивности использованных линий излучения в направлении на МЗО приведены в Таблице 2.

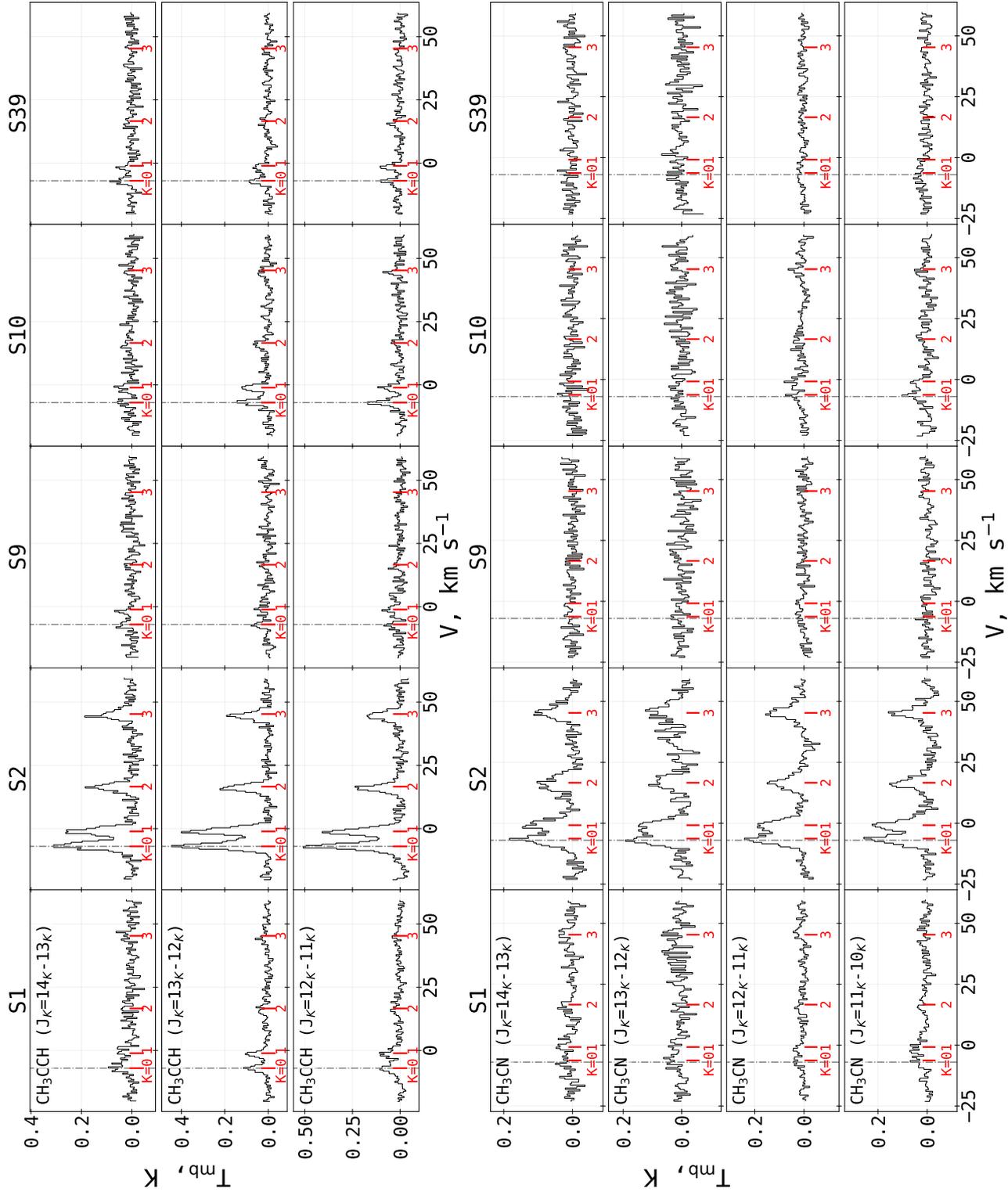


Рис. 12: Спектральные линии, используемые для анализа в условиях локального термодинамического равновесия (ЛТР), спектры в направлении на пять источников. Пунктирная серая линия обозначает скорость локального стандарта покоя $V_{\text{LSR}} = -7 \text{ km s}^{-1}$. Верхняя панель: линии лесенки: CH_3CCH 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: CH_3CN K -сверху вниз: $J_K = 14_K-13_K$, $J_K = 13_K-12_K$, $J_K = 12_K-11_K$, $J_K = 11_K-10_K$.

2.3 Результаты. Температуры возбуждения вращательных уровней

В наблюдаемом диапазоне частот были обнаружены серии линий CH_3CCH ($J_K = 14_K-13_K$, $J_K = 13_K-12_K$, $J_K = 12_K-11_K$, $J_K = 14_K-13_K$), CH_3CN ($J_K = 13_K-12_K$, $J_K = 12_K-11_K$, $J_K = 11_K-10_K$), SO_2 , OCS , HC_3N , H_2CS и SO . Для этих переходов применен метод вращательных диаграмм, описанный ранее, для определения физических условий в плотном молекулярном облаке.

Диаграммы населенностей вращательных уровней молекул в направлении на МЗО показаны на рис. 13–17, причем максимальное число диаграмм — восемь — было построено в МЗО S2 и МЗО S1 для молекул CH_3CCH , CH_3CN , SiO , SO_2 , OCS , HC_3N , H_2CS и SO . Отношение сигнал/шум в других МЗО оказалось ниже, поэтому для них число диаграмм меньше. Из рисунков видно, что наблюдаемые интенсивности линий молекул CH_3CCH , CH_3CN , SiO , SO , SO_2 , H_2CS , OCS , HC_3N 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 H_2CS , 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 CH_3CN и OCS , соответственно, а наименьшее значение — 19 К — было найдено из вращательной диаграммы для молекулы SiO . По убыванию вращательных температур молекулы выстраиваются в последовательность CH_3CN , OCS , SO_2 , CH_3CCH , HC_3N , H_2CS , SO , SiO которая может быть связана с химической структурой МЗО S2.

Для МЗО S1 наибольшая вращательная температура была получена для молекулы CH_3CN и составила 61 ± 16 К. За исключением вращательной температуры для молекулы CH_3CN и HC_3N , полученные значения для источника МЗО S1 в среднем ниже, чем в МЗО S2 примерно на 5–20 К, с наименьшим различием для молекулы SO и с максимальным — для молекулы SO_2 . Стоит отметить, что в МЗО S1 молекулы (кроме HC_3N) 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 , CH_3CCH и H_2CS . У источника МЗО S10 вращательная температура, определенная по линиям молекулы CH_3CCH , оказалась выше вращательной температуры, найденной по линиям молекулы H_2CS и SO : 41 К, 20 К и 13 К соответственно (рис. 13 и 16). В МЗО S39 температуры возбуждения молекул CH_3CCH также около 42 К, а температуры молекул H_2CS и SO в пределах ошибок совпадают и равны 13 – 14 К (рис. 17). В

МЗО S9 удалось определить температуру возбуждения SO и CH₃CCH на уровне 12 К и 27 К соответственно (рис. 15). Компоненты $K = 2$ и $K = 3$ серии линий CH₃CCH для МЗО S9 и S39 относительно слабы. В результате были использованы только $K = 0$ и $K = 1$ для этих МЗО (и $K = 3$ в случае наименьшего наблюдаемого перехода J для МЗО S39). Это ограничение привело к увеличению неопределенностей в анализе этих МЗО по сравнению с другими, где было рассмотрено большее количество переходов. Отношение сигнал/шум для наблюдения серий линий CH₃CN в направлении МЗО S9 и S39 недостаточно для получения надежных результатов. В отличие от этого, МЗО S2 был единственным МЗО, где нам удалось успешно обнаружить все четыре линии для каждой серии. Видно, что T_{rot} линий CH₃CN приблизительно на 20 К выше для МЗО S1 и S2 и примерно на 10 К выше для МЗО S10, чем для линий CH₃CCH. Следовательно, излучение CH₃CN указывает на более высокую температуру газа по сравнению с излучением CH₃CCH, образуя структуру, напоминающую луковицу. Излучение CH₃CN сосредотачивается в более компактных областях и, вероятно, указывает на более высокую плотность и температуру газа вблизи МЗО по сравнению с излучением CH₃CCH. Общий вывод, который можно сделать по диаграммам населенности, 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 счет более высокой лучевой концентрации молекул.

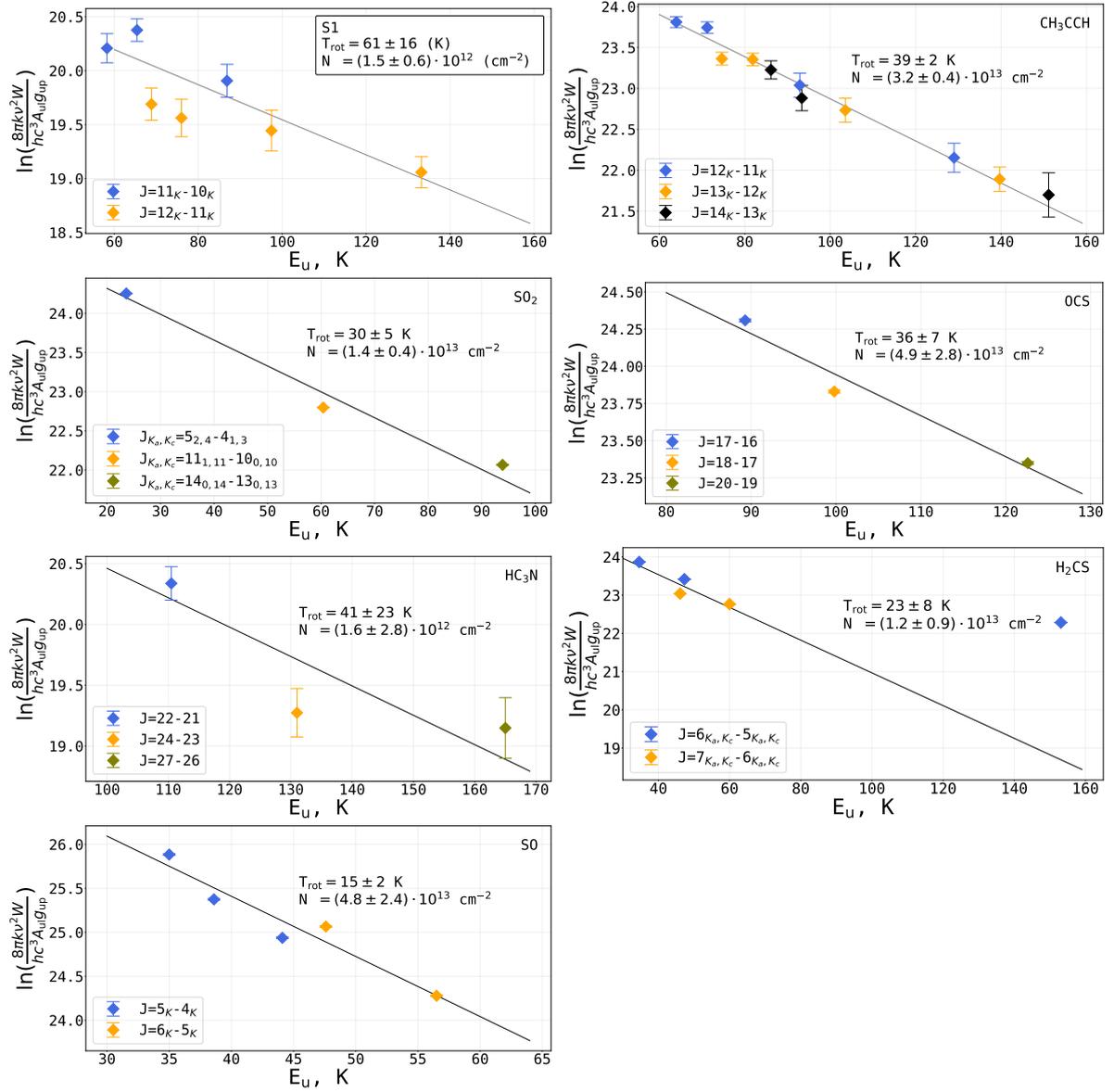


Рис. 13: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул SO₂, OCS, HC₃N, H₂CS, SO в МЗО S1.

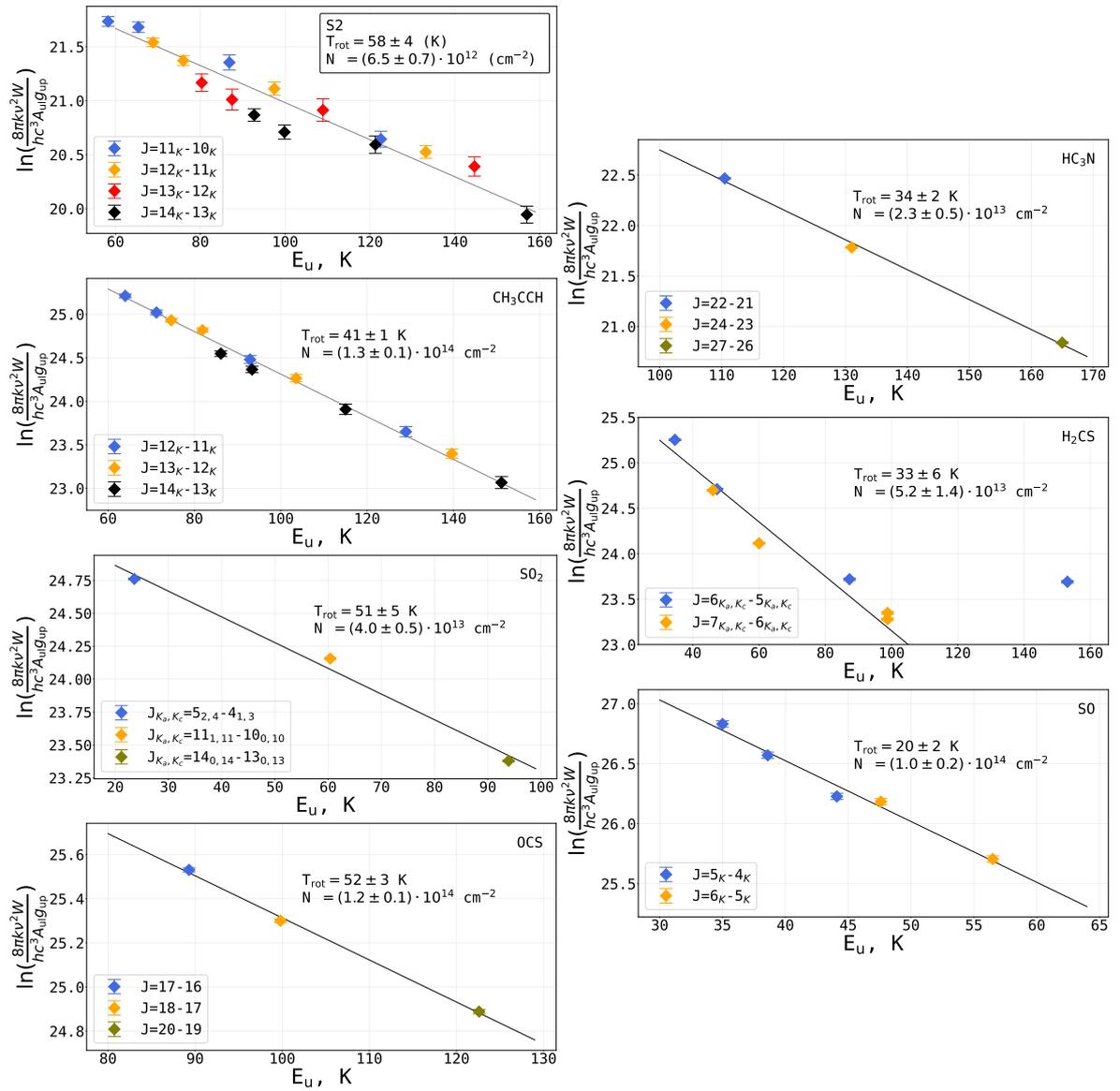


Рис. 14: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул SO₂, OCS, HC₃N, H₂CS, SO в МЗО S2.

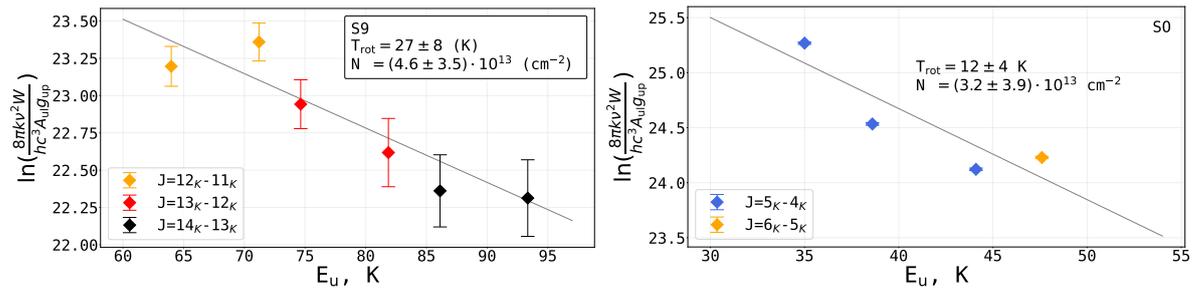


Рис. 15: Вращательные диаграммы для линий излучения молекулы SO в МЗО S9.

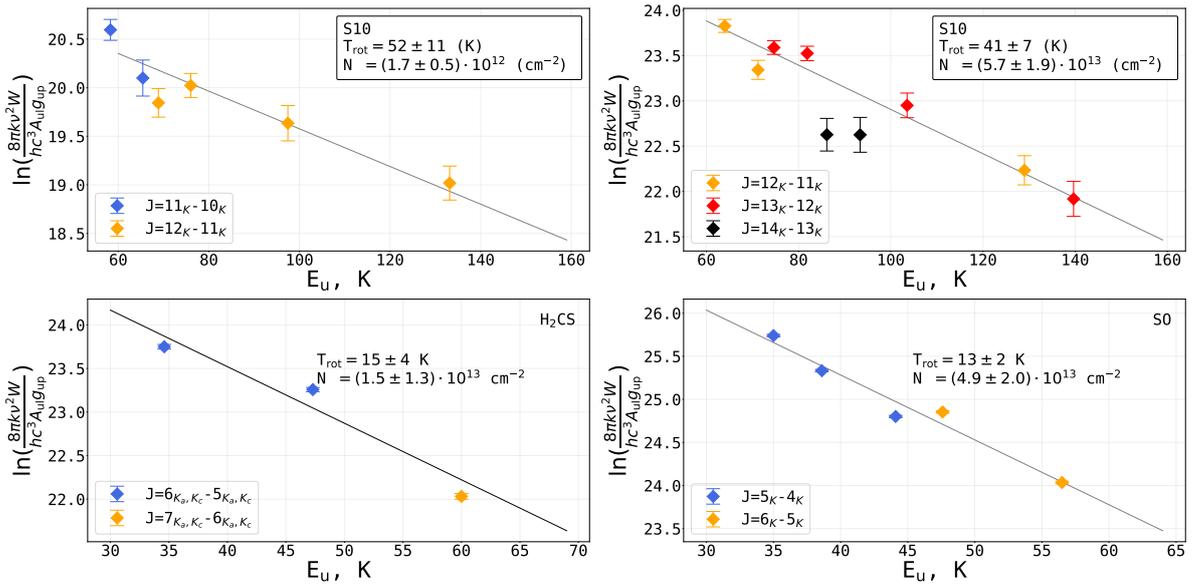


Рис. 16: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул SO и H₂CS в МЗО S10.

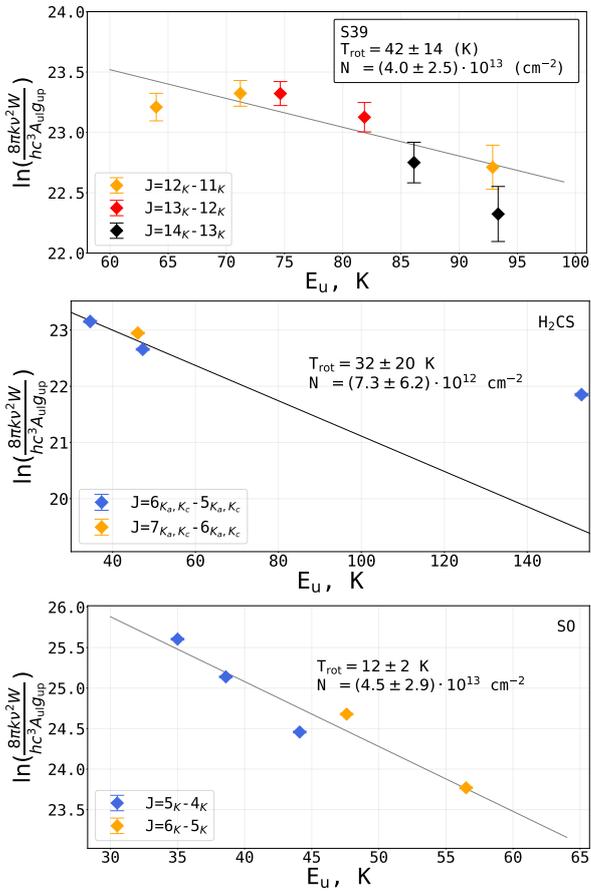


Рис. 17: Вращательные диаграммы для линий излучения молекул SO и H₂CS в МЗО S39.

Некоторые параметры линий CH_3CSH и CH_3CN и CH_3OH в направлении молодых звездных объектов (МЗО) S1, S2, S9, S10, S39.

Молекула	Частота, МГц	Переход	E_{up} , К	$\lg A_{\text{ul}}$	g_{up}	$\int T_{\text{mb}}dV, \text{ K km s}^{-1}$				
						S1	S2	S9	S10	S39
CH_3CSH	205045.500	12_3-11_3	129.0	-4.557	100	0.14±0.03	0.63±0.04	-	0.15±0.02	-
	205065.070	12_2-11_2	92.88	-4.541	50	0.18±0.03	0.75±0.03	-	-	0.13±0.02
	205076.816	12_1-11_1	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_0-11_0	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_3-12_3	139.7	-4.447	108	0.13±0.02	0.58±0.03	-	0.13±0.03	-
	222150.010	13_2-12_2	103.5	-4.433	54	0.16±0.02	0.72±0.03	-	0.19±0.03	-
	222162.730	13_1-12_1	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_0-12_0	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_3-13_3	151.14	-4.346	116	0.13±0.03	0.49±0.03	-	-	-
	239234.034	14_2-13_2	115.02	-4.334	58	-	0.58±0.03	-	-	-
	239247.728	14_1-13_1	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_0-13_0	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
	CH_3CN	202320.443	11_3-10_3	122.57	-3.183	92	-	0.70±0.05	-	-
202339.922		11_2-10_2	86.85	-3.164	46	0.18±0.03	0.75±0.05	-	-	-
202351.612		11_1-10_1	65.42	-3.153	46	0.29±0.03	1.06±0.05	-	0.22±0.04	-
202355.510		11_0-10_0	58.27	-3.149	46	0.24±0.03	1.13±0.05	-	0.36±0.04	-
220709.017		12_3-11_3	133.16	-3.062	100	0.17±0.02	0.75±0.04	-	0.17±0.03	-
220730.261		12_2-11_2	97.44	-3.047	50	0.13±0.02	0.70±0.04	-	0.16±0.03	-
220743.011		12_1-11_1	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 ₃ 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	$E_{\text{ур}},$ К	$\lg A_{\text{ul}}$	$g_{\text{ур}}$	$\int T_{\text{mb}} dV, \text{ К км с}^{-1}$				
						S1	S2	S9	S10	S39
SO ₂	241832.910 ^a	5 ₃ -4 ₃ A ⁺	84.61	-4.413	11	0.24±0.04	1.09±0.15	-	-	-
	241833.104 ^a	5 ₃ -4 ₃ A ⁻	84.61	-4.413	11	0.24±0.04	1.09±0.15	-	-	-
	241842.324 ^b	5 ₂ -4 ₂ A ⁻	72.53	-4.291	11	0.21±0.04	1.21±0.02	-	0.12±0.02	-
	241843.646 ^b	5 ₃ -4 ₃ E	82.53	-4.411	11	0.21±0.04	1.21±0.02	-	0.12±0.02	-
	241852.352	5 ₋₃ -4 ₋₃ E	97.53	-4.409	11	-	0.29±0.03	-	-	-
	241879.073	5 ₁ -4 ₁ 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 ₂ -4 ₂ A ⁺	72.53	-4.290	11	0.19±0.03	0.88±0.07	-	-	-
	241904.147 ^c	5 ₋₂ -4 ₋₂ 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 ^c	5 ₂ -4 ₂ 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 ₁ -4 ₁ A ⁺	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 ₋₁ -1 ₀ 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
OCS	221965.220	11 _{1,11} -10 _{0,10}	60.4	-3.943	23	261±2	848±6	-	159±2	240±1
	241615.797	5 _{2,4} -4 _{1,3}	23.6	-4.073	11	195±2	465±3	-	151±2	-
	244254.218	14 _{0,14} -13 _{0,13}	93.9	-3.785	29	157±1	584±4	-	-	-
HC ₃ N	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 ₃ 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	$\lg A_{\text{ul}}$	$g_{\text{ур}}$	$\int T_{\text{mb}} dV, \text{ К км с}^{-1}$					
						S1	S2	S9	S10	S39	
H ₂ CS	202924.054	6 _{1,6} -5 _{1,5}	47.3	-3.924	39	850±7	3128±38	362±4	731±6	401±6	
	205987.858	6 _{0,6} -5 _{0,5}	34.6	-3.893	13	464±4	1871±23	217±3	416±4	229±4	
	206052.602	6 _{3,4} -5 _{3,3}	153.1	-4.018	39	215±2	882±11	-	-	140±3	
	206158.602	6 _{2,4} -5 _{2,3}	87.3	-3.943	13	-	359±5	-	-	-	
	240266.872	7 _{0,7} -6 _{0,6}	46.1	-3.688	15	276±3	1460±18	-	-	253±4	
	240382.051	7 _{2,6} -6 _{2,5}	60.0	-3.678	45	-	347±5	-	-	-	
	240549.066	7 _{2,5} -6 _{2,4}	60.0	-3.678	45	-	325±5	-	-	-	
	244048.504	7 _{1,6} -6 _{1,5}	98.8	-3.724	15	624±5	2426±30	-	302±3	-	
	SO	206176.005	5 ₄ -4 ₃	38.6	-3.996	9	1152±11	3809±99	497±6	1105±16	910±9
		215220.653	5 ₅ -4 ₄	44.1	-3.924	11	3571±93	435±5	858±12	930±50	609±6
219949.442		5 ₆ -4 ₅	35.0	-3.873	13	3229±29	8325±214	1744±18	2796±39	2442±24	
258255.826		6 ₆ -5 ₅	56.5	-3.996	13	744±7	3100±82	-	583±9	447±5	
261843.722		6 ₇ -5 ₆	47.6	-3.642	15	1973±18	6033±156	855±9	1596±22	1340±13	

^{a, b, c} Блендированные линии, которые были аппроксимированы одной гауссианой. Линии CH₃OH были аппроксимированы в программе CLASS of GILDAS package (<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>) с помощью 1 Гауссова приближения с фиксированным значением $FWHM = 5 \text{ км с}^{-1}$ для S1 и 4 км с⁻¹ для остальных МЗО. Кроме того, значения V_{lsr} совпадающие с максимумами излучения, были зафиксированы (-6.59, -7.14, -6.94, -6.80, -7.05 км с⁻¹ для S1, S2, S9, S10 и S39, соответственно).

Таблица 2: Начальные обилия химических компонентов относительно числа ядер водорода в модели Presta. Формат записи $a(b)$ означает $a \cdot 10^b$.

Компонент	Начальное обилие
H ₂	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 Моделирование обилий молекул с помощью Presta

Астрохимическое моделирование обилий молекул выполнялось с помощью программного комплекса Presta [86], предназначенного для моделирования эволюции объектов, находящихся на различных стадиях протозвездной эволюции. Комплекс Presta позволяет рассчитывать химическую эволюцию в трех фазах: в газовой фазе, на поверхностях пылинок и в толще их ледяных мантий [87]. В этой работе использовался двухфазный вариант модели, то есть, учитывались только реакции, происходящие в газовой фазе и на поверхности пылинок. Набор компонентов и реакций основан на химической сетке ALCHEMIC [88], но с существенными дополнениями, частично описанными в [89]. Начальные обилия химических компонентов представлены в таблице 2.

Химическая эволюция моделировалась на интервале до 10^6 лет при неизменных физических условиях. Было проведено несколько расчетов с варьированием концентрации ядер водорода n_{H} в модельном облаке от 10^3 до 10^5 см^{-3} , температуры газа T_{gas} — от 10 до 100 К с интервалом 10 К, а оптического поглощения A_{V} — в пределах от 3 до 10^6 звездных величин.

2.5 Лучевая концентрация водорода и температура пыли

Для оценки лучевых концентраций ядер водорода $N(\text{HI} + \text{H}_2)$ и температуры пыли T_{dust} использовались данные Hi-GAL [90] на длинах волн 70, 160, 250, 350 и 500 мкм, загруженные с SSDC веб-сайта³, а также данные ATLASGAL [91] на

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

длине волны 870 мкм⁴.

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, τ_λ — оптическая толщина, Σ — поверхностная плотность пыли, T — температура пыли и κ_λ — непрозрачность пыли. Было сделано общепринятое предположение о том, что

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

где $\kappa_0 = 7 \text{ см}^2\text{г}^{-1}$, $\lambda_0 = 450 \text{ мкм}$, $\beta = 2.2$, в соответствии с оценками, представленными [92]. Полученная поверхностная плотность была преобразована в лучевую концентрацию ядер водорода, предполагая расстояние до RCW 120 равным 1.34 кпк (расстояние до ионизирующей звезды [48]). Наконец, $N_{\text{H}+\text{H}_2} = 100\Sigma/(1.4 m_{\text{H}})$, где 100 — предполагаемое отношение массы газа к массе пыли [93, 94]. При чем это значение 100 используется в качестве предположительного отношения массы газа к массе пыли, которое может меняться в различных областях Н II из-за воздействия излучения (см., например, [95, 96, 97, 98]). В данном случае, поскольку объектом исследования являются молекулярные облака, для оценки лучевой концентрации водорода используется значение 100.

2.6 Результаты. Обилия молекул

Для расчета обилий молекул, значение лучевой концентрации соответствующей молекулы было разделено на лучевую концентрацию атомов водорода $N_{\text{H}+\text{H}_2}$ (показанную на рис. 18), полученную из анализа дальнего ИК-излучения пыли. Используя карту распределения $N_{\text{H}+\text{H}_2}$, были оценены относительные обилия молекул CCH, c-C₃H₂, H₂CO, HDCO, H¹³CO⁺, DCO⁺, CH₃OH, H¹³CN, CH₃CN, DCN, CH₃CCH, CS, H₂CS, HC₃N, OCS, SO, SO₂ в наблюдаемой области. Соответствующие карты показаны на рис. 19, 20, а значения обилий для некоторых молекул в направлении на МЗО приведены в таблице 3. Видно, что обилия серосодержащих молекул в МЗО S1 выше, чем в МЗО S2; максимальное превышение достигается для молекул SO и OCS — в 2 и 3 раза, соответственно. Обилие HC₃N, напротив, в 2 раза выше в МЗО S2, чем в МЗО S1.

⁴https://atlasgal.mpifr-bonn.mpg.de/cgi-bin/ATLASGAL_DATABASE.cgi

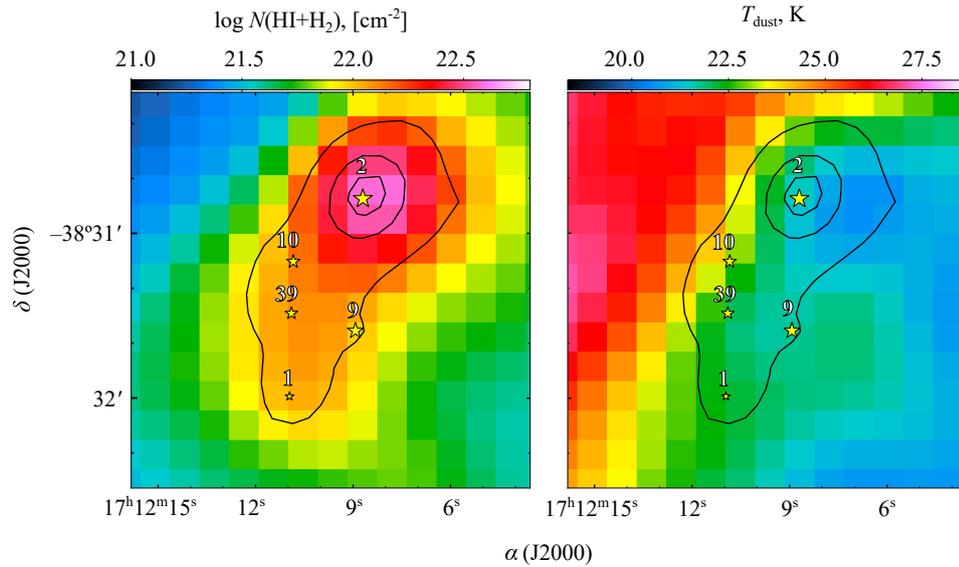


Рис. 18: Лучевая концентрация атомов водорода и температура пыли, полученные из анализа дальнего инфракрасного излучения пыли по данным Herschel и ATLASGAL.

Обилия малоатомных углеводородов достигают своих максимальных значений за пределами плотного молекулярного сгустка в отличие от всех других наблюдаемых молекул. Видно, что область наивысшего обилия малых углеводородов CCN и $\text{c-C}_3\text{H}_2$ совпадает с пиком излучения пыли в непрерывном спектре на длине волны 70 мкм, определяющим RCW 120 ФДО. Обилия CCN и $\text{c-C}_3\text{H}_2$ возрастают там примерно до 2.5×10^{-8} и 1.5×10^{-10} соответственно.

Обилие таких молекул, как H_2CO , HDCO , H^{13}CO^+ , DCO^+ , CH_3OH , достигают своих максимальных значений в направлении МЗО S1. Карта обилия для H_2CO показывает его максимальное значение, около 7.5×10^{-9} , к югу от МЗО S1. Аналогично, карта обилия для HDCO демонстрирует тенденцию, напоминающую распределение H_2CO , максимальное значение обилия около 2×10^{-10} , так же наблюдается к югу от МЗО S1. Карта обилия для H^{13}CO^+ показывает постепенное увеличение от МЗО S2 к югу, достигая своего максимального значения примерно 0.8×10^{-10} в направлении МЗО S1. Стоит отметить, что обилия H^{13}CO^+ , умноженные на отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, могут рассматриваться только как нижняя граница обилия HCO^+ , потому как нет возможности учесть эффекты оптической толщи. Любопытно, что обилие H^{13}CO^+ увеличивается вдвое по сравнению с МЗО S2 по мере удаления на юг от МЗО S1. Обилие DCO^+ относительно низкое, примерно 1.2×10^{-11} , вблизи МЗО S2, а затем увеличивается почти вдвое в направлении к МЗО S10 и S9, и достигает максимального значения около 4.3×10^{-11} к югу от МЗО S1. Карта обилия CH_3OH схожа с картой обилия DCO^+ , показывая низкие значения обилия около МЗО S2, а затем наблюдается постепенное увеличение концентрации молекул по направлению к югу. Наибольшее значение обилия, примерно 4.1×10^{-7} , достигается к югу от МЗО S1 и более чем в 6 раз превышает

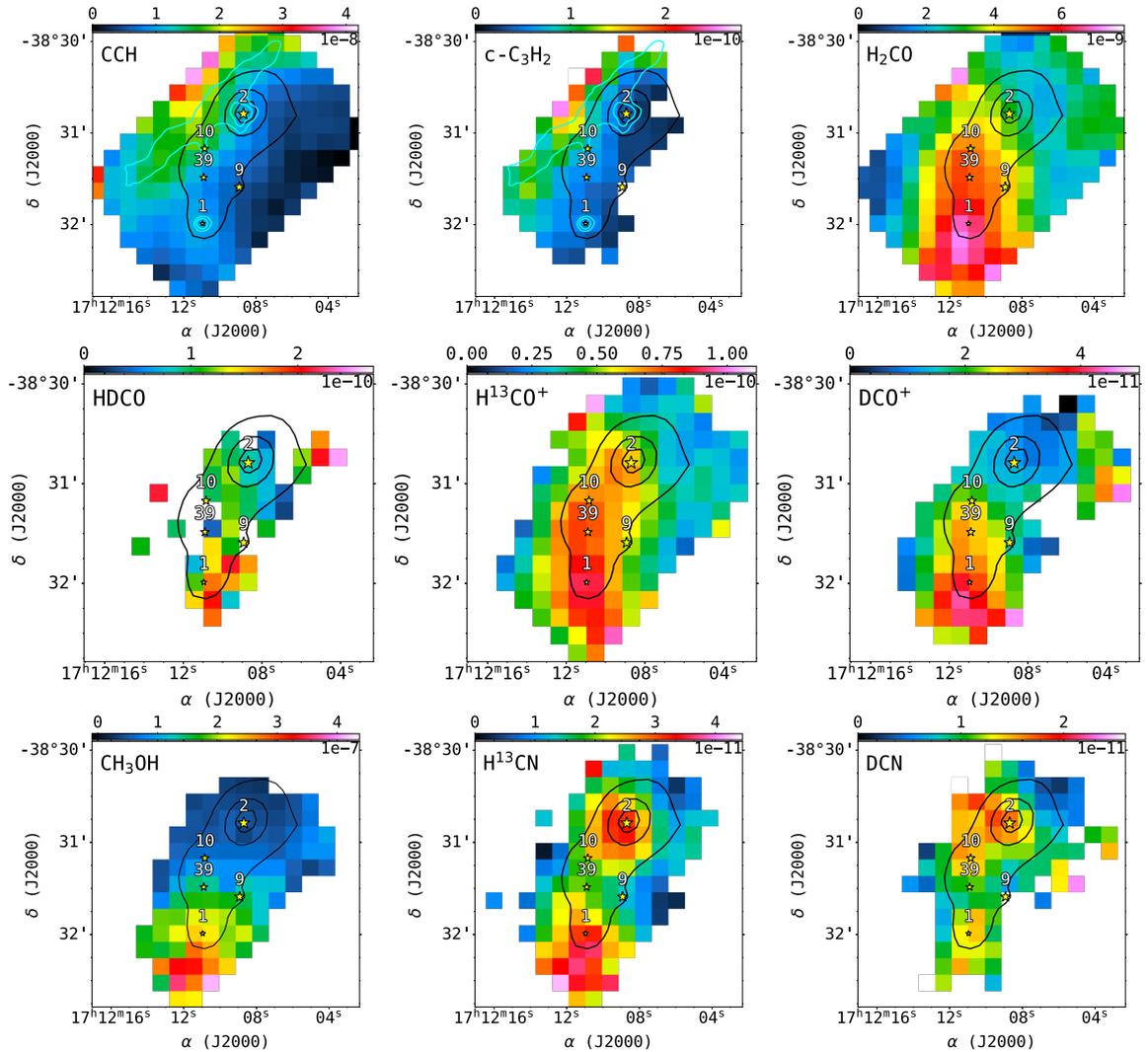


Рис. 19: Обилие молекул. Массивные молодые звездные объекты (МЗО) обозначены желтыми звездами, размер маркера-звезды пропорционален массе МЗО. Черные контуры показывают излучение пыли на длине волны 870 мкм, уровни контуров составляют 2.0, 6.0, 10.0 Ян/луч. Синие контуры показывают излучение пыли на длине волны 70 мкм, уровни контуров составляют 0.47, 1.0 Ян/пиксель.

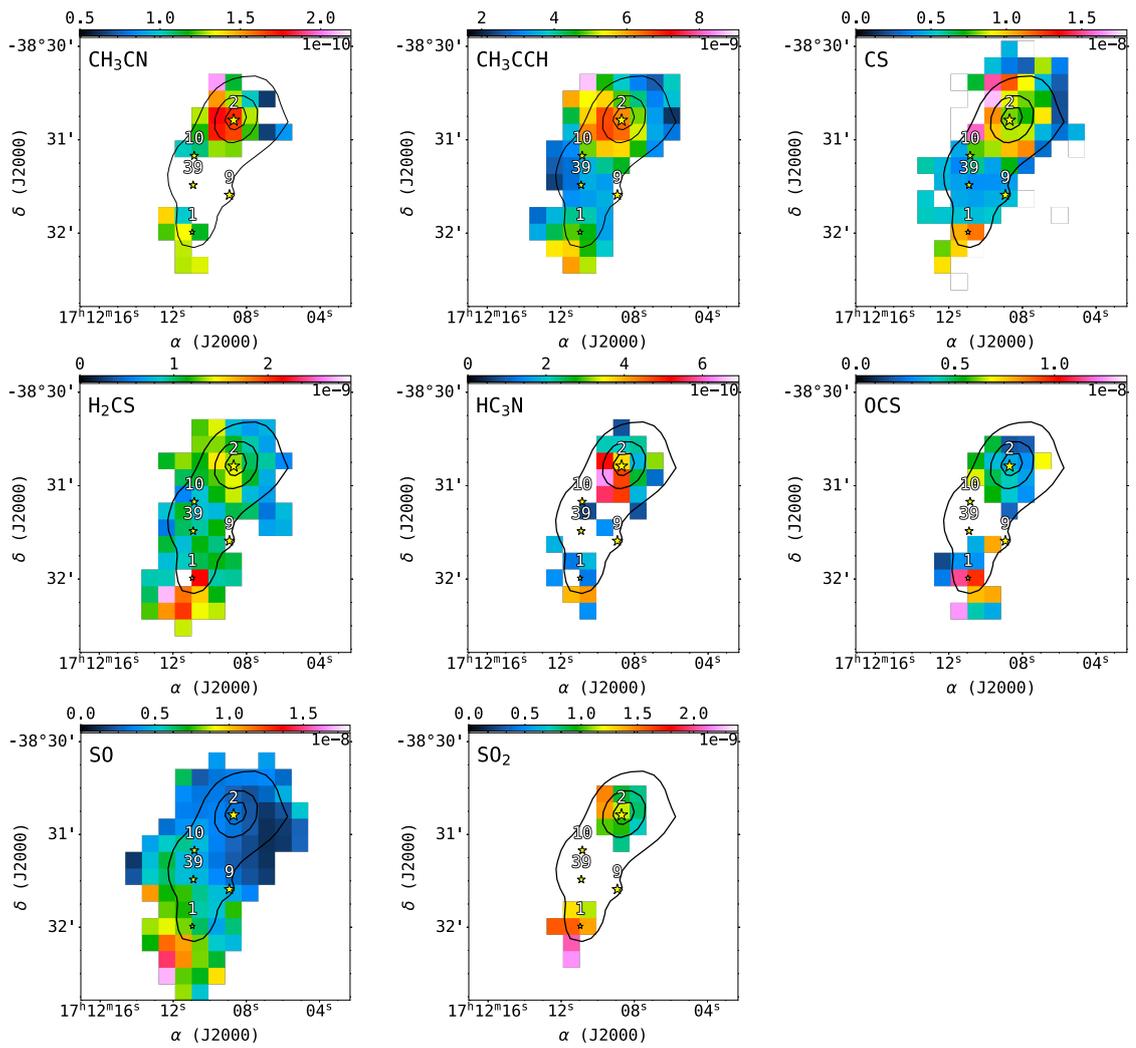


Рис. 20: Обилие молекул. Продолжение рис. 19

значение вблизи МЗО S2.

Обилия CH_3CCH , а также азотсодержащих молекул H^{13}CN , DCN и CH_3CN , показывают два пика, в отличие от всех остальных молекул. Оба пика связаны с МЗО S1 и S2. Для HC^{13}N наблюдается максимальное обилие 1.5×10^{-11} к югу от МЗО S1. Второй максимум в направлении МЗО S2 ниже в 1.5 раза. Опять же, стоит отметить, что H^{13}CN может дать только нижнюю границу для основного изотополога HCN из-за неучтенного эффекта оптической толщи. Изучая карту обилия DCN , видно, что эта молекула обладает наивысшим обилием в районе МЗО S2, со значением около 1.8×10^{-11} . Кроме того, DCN показывает относительно постоянный уровень обилия к востоку от МЗО S2. Еще один заметный пик в обилии DCN наблюдается вблизи МЗО S1 на том же уровне. Карта обилия CH_3CN показывает наивысшие значения 1.8×10^{-10} в направлении МЗО S2. В направлении МЗО S1, обилие немного ниже, 1.4×10^{-10} . По мере движения на юг от S1 обилие практически не возрастает, поддерживая примерно одинаковые значения. На карте обилия для CH_3CCH наибольшие значения проявляются в направлении МЗО S2, где оно достигает максимума 6.5×10^{-9} . Обилие примерно в 1.5 раза ниже в направлении МЗО S1. В отличие от H^{13}CN , DCN и CH_3CN , по мере движения на юг, обилие CH_3CCH увеличивается, в конечном итоге достигая значений, сходных с наблюдаемыми в направлении МЗО S2.

Обилие CS составляет примерно 0.5×10^{-8} к западу от МЗО S2, немного увеличивается до 1.1×10^{-8} на южной стороне и достигает значений около 1.5×10^{-8} к северо-востоку от МЗО S2. Вблизи МЗО S1 наблюдаются обилия CS около 1.0×10^{-8} , которые остаются практически постоянными на юго-западе. Важно отметить, что излучение между МЗО S1 и S2, по-видимому, оптически тонкое, что не дает возможности определить температуру возбуждения в этой области, поэтому была взята средняя температура возбуждения в 9 К.

Среди всех соотношений D/H, полученных в этом исследовании для различных молекулярных облаков, содержащих дейтерий, отношение $\text{HDCO}/\text{H}_2\text{CO}$ выделяется наибольшим обилием дейтерия, которое находится в пределах значений 0.02–0.04. Отношение $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ дает самое низкое обилие дейтерия, не превышающее 0.01. Минимальное отношение $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$ около 0.005 обнаружено в области источника МЗО S2, а максимальное – 0.01 наблюдается к югу от источника МЗО S1. Обилие дейтерия в отношении DCN/HCN составляет около 0.005 на протяжении всего рассматриваемого молекулярного сгустка.

Завершая раздел об обилиях молекул, стоит отметить, что молекулы, содержащие кислород, такие как H_2CO , HDCO , H^{13}CO^+ , DCO^+ и CH_3OH , достигают своих наибольших значений обилия вблизи на юге от МЗО S1. Молекулы без кислорода, такие как DCN , CH_3CN , CH_3CCH и CS , имеют свои основные пиковые значения обилий в районе МЗО S2 и вторичные максимумы обилия в районе МЗО S1.

Таблица 3: Температура пыли (T_{dust}), вращательные температуры (T_{rot}), лучевые концентрации (N_{tot}) и обилия (X) для CH_3CCH , CH_3CN и SiO , SO_2 , OCS , HC_3N , H_2CS , SO в направлении на МЗО в RCW 120. Обилия 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_{dust} , К	22.20	21.49	21.74	23.04	22.02
	$N(\text{HI}+\text{H}_2)$, 10^{22} cm^{-2}	1.11	3.71	0.98	1.42	1.26
CH_3CCH	T_{rot} , К	39 ± 2	41 ± 1	27 ± 8	41 ± 7	42 ± 14
	N_{tot} , 10^{13} cm^{-2}	3.2 ± 0.4	13 ± 1	4.6 ± 3.5	5.7 ± 1.9	4.0 ± 2.5
	X , 10^{-9}	5.2	6.2	4.7	4.0	3.2
CH_3CN	T_{rot} , К	61 ± 16	58 ± 4	–	52 ± 11	–
	N_{tot} , 10^{12} cm^{-2}	1.5 ± 0.6	6.5 ± 0.7	–	1.7 ± 0.5	–
	X , 10^{-10}	1.4	1.8	–	1.2	–
SiO	T_{rot} , К	12.1 ± 0.4	18.5 ± 0.7	14.1 ± 0.7	14.2 ± 0.1	16.3 ± 1.3
	N_{tot} , 10^{12} cm^{-2}	8.5 ± 0.3	9.9 ± 0.3	5.2 ± 0.3	4.4 ± 0.1	4.9 ± 0.9
	X , 10^{-11}	12.2	4.1	8.99	4.71	6.19
SO_2	T_{rot}	30 ± 5	51 ± 5	–	–	–
	N_{tot} , 10^{13}	$1.4, \pm 0.4$	4.0 ± 0.5	–	–	–
	X , 10^{-9}	1.40	1.14	–	–	–
OCS	T_{rot}	36 ± 7	52 ± 3	–	–	–
	N_{tot} , 10^{13}	4.9 ± 2.8	12 ± 1	–	–	–
	X , 10^{-9}	9.65	3.41	–	–	–
HC_3N	T_{rot}	41 ± 23	34 ± 2	–	–	–
	N_{tot} , 10^{12}	1.6 ± 2.8	23 ± 5	–	–	–
	X , 10^{-10}	1.27	3.70	–	–	–
H_2CS	T_{rot}	23 ± 8	33 ± 6	–	15 ± 4	32 ± 20
	N_{tot} , 10^{13}	1.2 ± 0.9	5.2 ± 1.4	–	1.5 ± 1.3	0.7 ± 0.6)
	X , 10^{-10}	21.6	13.3	–	8.32	9.34
SO	T_{rot}	15 ± 2	20 ± 2	12 ± 4	13 ± 2	12 ± 2
	N_{tot} , 10^{13}	4.8 ± 2.4	10 ± 2	3.2 ± 3.9	4.9 ± 2.0	4.5 ± 2.9)
	X , 10^{-9}	6.43	3.11	4.56	4.95	4.86

Простые углеводороды, такие как CCH и $s\text{-C}_3\text{H}_2$, в основном 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.

2.7 Результаты. Корреляции лучевых концентраций молекул

Были проанализированы корреляции лучевых концентраций, N , различных молекул в наблюдаемой области и определены для них коэффициенты корреляции Пирсона r . Кроме того, был проведен анализ корреляции величин N для наблюдавшихся молекул с лучевой концентрацией водорода $N_{\text{HI}+\text{H}_2}$. Результаты показана-

ны на рис. 22.

В большинстве пар молекул наблюдается положительная линейная корреляция. Значения $p > 0.95$ получены для пар молекул CH_3CCH и CH_3CN , CH_3CCH и DCN , CH_3CCH и H^{13}CN , CH_3CN и SO , CH_3CCH и H^{13}CN , CH_3CCH и DCN , ^{13}CO и C^{18}O , DCN и SO , DCN и H^{13}CN , H^{13}CN и SO , H^{13}CN и H^{13}CO^+ , H^{13}CO^+ и H_2CO . Высокие значения p для пар молекул свидетельствуют, что они образуются сходным образом, а именно, в газофазных реакциях или на поверхности пыли. При этом корреляции в парах $\text{DCN-H}^{13}\text{CN}$, $^{13}\text{CO-C}^{18}\text{O}$, $\text{H}^{13}\text{CO}^+-\text{DCO}^+$, $\text{CS-C}^{34}\text{S}$ ожидаемы, поскольку это пары изотопологов. Интересно отметить, что при коэффициенте корреляции 0.94 молекулы CS и C^{34}S попали в разные пространственные группы, хотя следует признать, что разделение молекул на группы 2 и 3 довольно субъективно.

Интересно отметить слабую корреляцию лучевых концентрацией метанола и изотопологов CS с лучевой концентрацией водорода. Это, возможно, указывает, что их эмиссия генерируется в локальных областях, протяженность которых вдоль луча зрения мало зависит от общего количества вещества в данном направлении. Для пар молекул CH_3OH и CCH , CH_3OH и CH_3CCH , CH_3OH и CH_3CN , ^{13}CO и CH_3OH , ^{13}CO и CS , C^{18}O и CS , H_2CO и CS значения коэффициентов корреляции Пирсона также близки к нулю. Это может означать, что образование молекул в паре независимо. Тот же факт, что некоторые пары молекул демонстрируют отрицательные корреляции, формально указывает, что образование одной молекулы из пары ведет к разрушению 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 проверки, в каких именно регионах из наблюдавшейся области имеется обнаруживается сильная корреляция лучевых концентраций молекул, проводилось попиксельное сравнение карт и построены графики зависимостей лучевых концентраций N для различных пар молекул. Избранные графики отображены на рисунке 21. Каждый пиксель на графиках окрашен в соответствии с цветовой шкалой от красного к синему, которая показывает расстояние от склонения $\delta = -38^\circ 31^m 11^s$. 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. 21 показаны пары молекул с $p \geq 0.75$. Здесь пиксели южной и северной частей карт укладываются в общую корреляцию — южная часть карты дает вклад в нижнюю часть графика, северная — в верхнюю. К та-

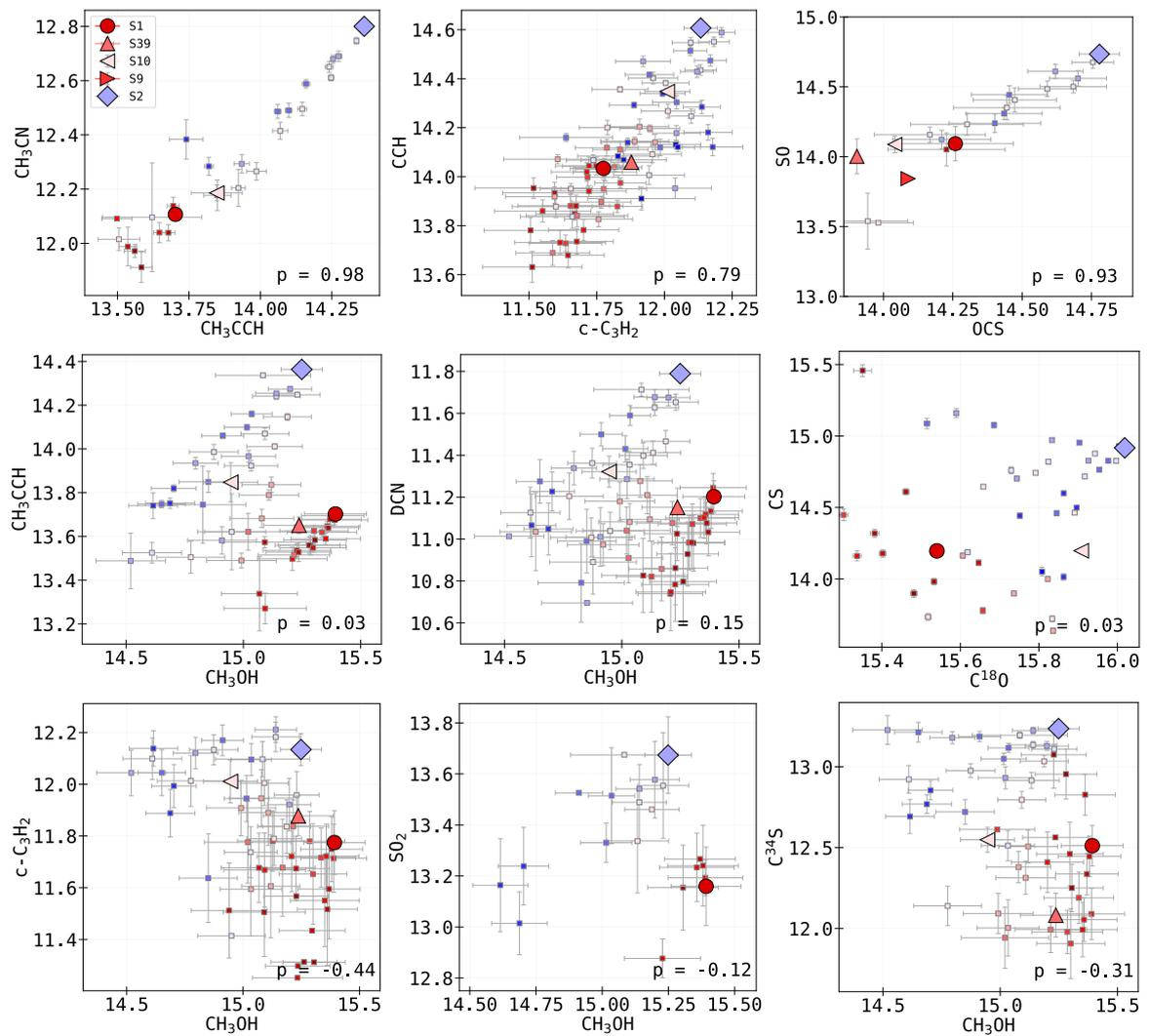


Рис. 21: Попиксельное сравнение лучевых концентраций молекул. Чем насыщеннее оттенок красного или синего, тем южнее или севернее находится пиксель. Пиксели, соответствующие пяти МЗО, отмечены маркерами на легенде. В правом нижнем углу каждой панели указан коэффициент корреляции Пирсона p .

корреляции между лучевыми концентрациями можно по виду карт излучения в линиях этих молекул. Так ведут себя, например, молекулы-трассеры ФДО ССН и $s\text{-C}_3\text{H}_2$, а также молекулы, яркое излучение которых наблюдается только в направлении на МЗО S2, например H_2CS и SO , CH_3CN и CH_3CCH (карты излучения в линиях этих двух молекул показаны на рис. 6 в Главе 1). Но для пары ССН и CH_3CN это не так — несмотря на большое значение p , интенсивность излучения этих молекул на картах распределена по-разному. Иными словами, значительная корреляция лучевых концентраций не обязательно означает схожесть пространственного распределения яркости излучения молекул, но может означать схожесть путей их образования молекул в наблюдаемых областях, что обсуждается ниже.

Для выявления возможных причин повышенного содержания метанола в южной части облака было проведено моделирование исследуемого объекта с помощью астрохимической модели Presta. Варьируя модельные параметры в пределах, указанных в разделе 2.4, было обнаружено, что наблюдаемые в объекте типичные обилия молекул CH_3CCH , CH_3CN и CH_3OH в пределах порядка величины лучше всего соответствуют модельному времени $t_{\text{model}} = 10^5$ лет в модели с концентрацией водорода $n_{\text{H}} = 10^4 \text{ см}^{-3}$ и оптическим поглощением $A_V \sim 3 - 5$ величин. На рис. 23 представлены модельные содержания пар молекул ССН– $s\text{-C}_3\text{H}_2$ (верхняя панель) и CH_3CCH – CH_3OH (нижняя панель) при различных значениях температуры газа и для $A_V = 3^m, 4^m$ и 5^m .

На рис. 23 видно четкое различие между последовательностями обилий CH_3CCH и CH_3OH для $A_V = 3^m, 4^m$ и 5^m . Представленные последовательности согласуются с наблюдаемым разделением на две ветви на рис. 21, где при сопоставимых содержаниях CH_3CCH обилие метанола в южной части облака превышает его обилие в северной части вплоть до порядка величины. Такая теоретическая закономерность может быть связана с тем, что молекула CH_3CCH образуется в газовой фазе, а молекула CH_3OH — на поверхности пыли. В среде с $A_V \leq 4^m$ фотодесорбция более эффективна по сравнению со средой с $A_V = 4^m$, и содержание метанола в газовой фазе становится выше. Дальнейшее понижение экстинкции до $A_V \leq 2^m$ 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 . Сравнивая распределение $N_{\text{H}+\text{H}_2}$ в окрестности МЗО S1 и S2 (см. работу [99]), видно, что разница между лучевыми концентрациями водорода в этих объектах больше $1.81 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (эквивалент $A_V = 1^m$), поэтому наше предположение о меньшем значении A_V вблизи МЗО S1 оправдано. Фотодиссоциация затрагивает также и молекулы, подобные CH_3CCH , однако их содержание в значительной степени восстанавливается газофазными реакциями.

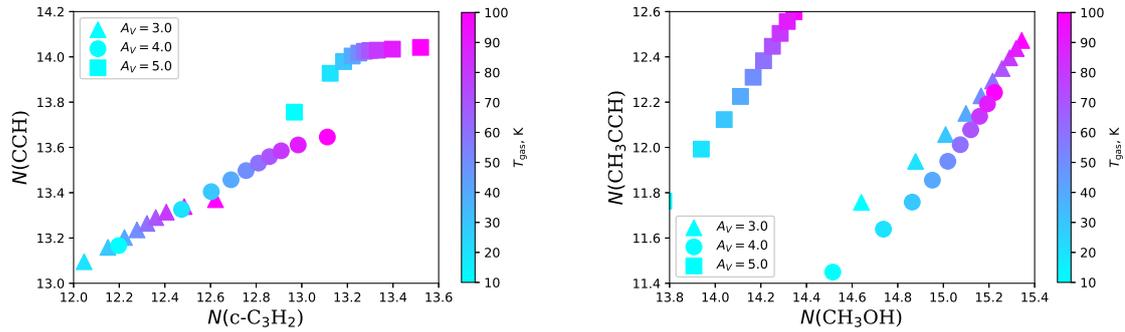


Рис. 23: Результаты моделирования для наилучшей модели и момента времени 10^5 лет. Модельные расчеты представлены треугольниками для модели с $A_V = 3^m$, кругами для $A_V = 4^m$, квадратами для $A_V = 5^m$. Цветовая шкала маркеров соответствует различным значениям T_{gas} .

2.8 Обсуждение

2.8.1 Признаки наличия горячего газа в МЗО

Несмотря на практически одинаковую температуру пыли, $T_{\text{dust}} \approx 21\text{--}23$ К, во всех МЗО, существует отчетливая химическая дифференциация в плотном молекулярном сгустке. Очевидно, эти различия не вызваны испарением оболочек мантий с пыли. Молекулы CO , наблюдаемые в газовой фазе на уровне около 10^{-4} испаряются с пыли, поскольку их температура испарения меньше 20 К при плотностях в наших МЗО (см. [100]).

Сравнение температур возбуждения CH_3OH , CH_3CCN и CH_3CN , позволяет предположить, что метанол появляется в более холодной и более обширной области вокруг МЗО, чем CH_3CCN и CH_3CN . Более того, возбуждение CH_3CN происходит в более теплых и плотных областях по сравнению с CH_3CCN . CH_3CN и CH_3CCN также более обильны в области высокой плотности вокруг S2. Таким образом, можно говорить о слоистой химико-физической структуре структуре вокруг МЗО S1 и S2, напоминающую слоистое строение луковицы. Последовательное появление CH_3OH , CH_3CCN и CH_3CN в газе вокруг МЗО означает переход к более теплому газу ближе к МЗО.

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

Чтобы оценить эту возможность, были сопоставлены содержания молекул в направлениях на МЗО, полученные в данной, с результатами химико-динамического

моделирования коллапса протозвезды, где использовались те же начальные содержания, что и в нашем исследовании. Сопоставление пространственного масштаба модельного коллапсирующего облака и карт на рис. 19 и рис. 20 показывает, что вся расчетная область на наших картах попадает в один пиксель. Модель позволяет проследить момент формирования протозвезды, который приводит к нагреву газа и пыли в ее непосредственных окрестностях. Нагрев сопровождается повышением обилий молекул вблизи внутренней границы расчетной области. Однако область прогрева невелика, 100–200 а.е. от протозвезды. Таким образом, полученные нами обилия отражают содержание молекул в оболочке МЗО S2, размер которой составляет до 40000 а.е., не отражая повышения обилий 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 H_2CS ($6_{3,4}-5_{3,3}$) с энергией верхнего уровня $E_u = 153.1$ К, наблюдаемая интенсивность которой не согласуется с вращательными диаграммами для $T_{\text{rot}} \approx 20 - 30$ К, полученными по линиям с более низкими уровнями энергии, на несколько порядков величины превышая значение, ожидаемое из диаграмм.

Возбуждение таких сложных органических молекул, как CH_3CCH и CH_3CN , по излучению линий, показывает более высокие значения T_{rot} , чем T_{dust} . Анализ излучения метанола также показывает, что возбуждение линий может происходить при более высоких температурах, чем $T_k \geq T_{\text{dust}}$. Следовательно, возбуждение этих сложных органических молекул происходит не в холодной среде, отслеживаемой дальней инфракрасной эмиссией от Herschel (см. [90]), а в более теплых и компактных областях вокруг МЗО. В работе [101], используя интерферометр ALMA, авторы выделили в направлении источника МЗО S2 пять фрагментов. Следовательно, там существуют более компактные компоненты. Значения для T_{rot} для CH_3CN в МЗО S2 согласуются с ранее найденными значениями в работе [19], в то время как они использовали только серию линий $J_K = 12_K-11_K$. Они также предполагают, что горячий газ существует по крайней мере вокруг S2. Авторы заключили, что эти линии появляются за счет наличия на луче зрения не только протяженного молекулярного облака, но и компактного горячего ядра, которое находится на ранней стадии формирования. Обнаружение относительно яркой линии H_2CS ($6_{3,4}-5_{3,3}$) согласуется с результатами из этой работы. Впервые о наличии компактного излучения в линиях молекулы CH_3CN в МЗО S2 сообщалось в работе [101], хотя эти авторы не проводили анализа физических условий в молекулярном газе.

С наличием компактного горячего ядра в МЗО S2 связано и обнаружение линии метилформиата HCOOCH_3 ($20_{0,20}-19_{0,19}$), см. табл. 1 в Главе 1. Как показано в работе [102], метилформиат образуется на пыли еще на стадии темного обла-

ка, а в газовой фазе появляется при формировании протозвезды в молекулярном облаке на стадии горячего ядра. Эта линия обнаружена только в МЗО S2 благодаря нагреву пыли в компактном источнике, которого нет в направлении на другие МЗО.

2.8.2 Особенности разрушения мантий пылинок вблизи МЗО

Южная и северная части облака имеют различные молекулярные обилия, где молекулы, содержащие азот (H^{13}CN , DCN , CH_3CN), более обильны в северной части, но молекулы, содержащие кислород (DCO^+ , SiO , H_2CO , CH_3OH), более концентрированы в южной части. Малоатомные углеводороды (CCH and $\text{c-C}_3\text{H}_2$) концентрируются в направлении ФДО. Этот феномен может быть объяснен газофазным образованием $\text{c-C}_3\text{H}_2$, который, считается, что образуется из CH_4 , посредством химических реакций, происходящих в условиях нагрева протозвездами окружающей среды, приводящих к образованию молекул с углеродными цепочками (механизм WCCS, см., например, [103, 104]). Наличие УФ-излучения вызывает диссоциацию молекул CO , что приводит к образованию атомов углерода, тем самым способствуя увеличению их обилия.

Ранее было высказано предположение, что повышенное содержание метанола в южной части объекта может быть связано с более эффективной фотодесорбцией. Рассматривая другие виды десорбции, можно отметить, что скорость тепловой десорбции, зависящая от температуры пыли T_{dust} , в МЗО S1 и S2 должна быть сравнима, так как температура пыли в этих объектах совпадает в пределах 1 К [99]. Более того, величина T_{dust} в этих МЗО меньше температуры сублимации молекул метанола, которая составляет около 80 К (см. [89]). Скорость десорбции космическими лучами также должна быть одинакова, так как эти МЗО лежат в пределах одного молекулярного сгустка на границе области II, размер которой ~ 1 пк. Важным фактором, не учитываемым в представленном моделировании, являются ударные волны и высокоскоростные истечения, которые сопровождают рождение звезд [105, 106, 107]. На наличие истечений в окрестности МЗО S1 указывают широкие крылья линий метанола [19, 99] и обнаружение мазерного излучения метанола 1 класса [108], которое образуется в областях, охваченных истечениями [109]. В модель Presta ударные волны не могут быть включены напрямую, однако их действие сводится фактически к появлению дополнительного механизма десорбции. Включив такой механизм на качественном уровне в нашу модель, можно было бы получить результат, сходный с тем, что показан на рис. 23. Следовательно, нельзя исключить вклад разрушения мантий пылинок при их столкновениях в повышение содержания метанола в газовой фазе.

Авторы работы [110], суммируя результаты астрохимического моделирования и наблюдения областей образования звезд, показали, что структура ледяных мантий

пылинок неоднородна: толща льда, в которой преобладает вода, покрыта слоем, богатым такими молекулами как CO, CO₂, метанол. Причем «водяной» слой образуется раньше «CO»-слоя, так как образование последнего происходит на поздней стадии формирования 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 [66, 67, 68]. Анализируя наблюдения линий молекул CO₂, OCS и метанола в направлении на массивные протозвезды, [111] показали, что SO, CO₂ и OCS образуются раньше, чем метанол, на той стадии развития молекулярного облака, когда лед преимущественно «водяной». Образование же метанола на пылинках происходит позже и преимущественно в верхнем «CO»-слое.

Наши результаты согласуются с представлением о наличии «водяного» и «CO»-слоя в мантиях пылинок. На рис. 21 в левой колонке видна высокая ($p = 0.93$) корреляция между концентрациями SO и OCS. Южная часть облака не выделяется повышенным содержанием какой-то из этих молекул. Напротив, корреляция между метанолом и SO₂ отсутствует ($p = -0.12$, см. рис. 22), хотя обе молекулы образуются на пылинках. Корреляция между OCS и метанолом хоть и положительная, но слабая ($p = 0.33$). Это можно объяснить, принимая во внимание, что первым делом разрушаются внешние слои мантии, богатые метанолом, что согласуется с трехфазными астрохимическими моделями, где химические реакции в основном происходят в приповерхностных слоях [87].

Суммируя все вышесказанное о графиках корреляций, можно сделать вывод о том, что к повышенному содержанию метанола в газовой фазе в южной части облака приводит разрушение верхних слоев пылевых мантий за счет фотодесорбции или, возможно, ударными волнами. Этот процесс в меньшей степени затрагивает содержание молекул, которые образуются в газовой фазе, например CH₃CCH, CH₃CN и др. Именно по этой причине получаются вилкообразные распределения на диаграммах с корреляциями (рис. 21).

2.9 Резюме Главы 2

Физические условия были изучены в предположении ЛТР с использованием ряда переходов CH₃CN, CH₃CCH, CH₃OH, SiO, SO₂, OCS, HC₃N, H₂CS и SO. Анализируя данные по CH₃CCH, было обнаружено, что вращательная температура для МЗО S1, S2 и S10 составляет около 40 К. Анализ CH₃CN показывает более высокие значения вращательных температур в направлении на МЗО S1, S2 и S10 до 61 К. МЗО S2 оказывается самой плотной областью. По убыванию вращательных температур молекулы выстраиваются в последовательность CH₃CN, OCS, SO₂, CH₃CCH, HC₃N, H₂CS, SO, SiO образуя структуру, напоминающую луковицу.

Доля дейтерированных молекул, с пиковым значением около 3%, была обнару-

жена для пары молекул HDCO/H₂CO в МЗО S2, подчеркивая влияние известного кинетического изотопного эффекта. Самая низкая доля дейтерированных молекул, ниже 0.5%, была выявлена для пары DCO⁺/HCO⁺ в МЗО S2.

Повышенное обилие простых углеводородов в северной части плотного сгустка — это единственное проявление воздействия массивной звезды на молекулярное обилие в плотном сгустке. Локальные явления, такие как распространение ударных волн и истечения, изменяют молекулярный состав в двух частях плотного сгустка, связанных с МЗО S1 и S2.

Было обнаружено, что в южной части плотного сгустка содержание метанола превышает содержание в северной части при сравнимых содержаниях других сложных молекул, таких, например, как CH₃CN и CH₃CCH. Кроме того, содержание метанола повышено и относительно других молекул, содержащих кислород, например: SO, OCS.

Для интерпретации результатов наблюдений была использована астрохимическая модель Presta. Модель воспроизводит наблюдаемые обилия CH₃CCH и CH₃OH 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 ускоряется десорбция метанола, при этом молекулы, попадая в газ, выживают и не разрушаются УФ-излучением, как это происходит уже при $A_V \sim 2^m$.

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, а вторая в пылевых мантиях, например, CCH и CH₃OH. Слабая корреляция между метанолом и другими кислородсодержащими молекулами (SO, OCS, SO₂), которые также образуются на пыли, свидетельствует, что в южной части облака разрушается только верхняя часть мантий пылевых частиц, богатая «СО»-льдом.

Глава 3

Классификация молекулярных облаков с помощью методов машинного обучения

Машинное обучение произвело революцию в анализе астрономических данных, предоставив мощные инструменты для обработки больших объемов информации и выявления скрытых закономерностей в сложных наборах данных [112, 113]. Интеграция астрометрических измерений с фотометрическими наблюдениями позволила построить детальные карты областей звездообразования в пределах 1.5 кпк от Солнца [114]. Машинное обучение также активно используется для улучшения качества изображений. Авторы работы [115] разработали нейросетевую архитектуру (GAN), которая улучшает чёткость и детализацию размытых изображений галактик, выявляя ранее неразличимые области активного звездообразования в них. Также современные исследования демонстрируют растущую роль машинного обучения в понимании физических процессов звездообразования. Авторы работы [116] продемонстрировали возможности применения алгоритмов машинного обучения к миллиметровым спектрам массивных молодых звёздных объектов, выявив общие спектральные характеристики, связанные с физическими условиями в областях звездообразования.

В этой главе исследуется возможность применения методов машинного обучения для автоматического выявления и классификации молекулярных облаков на различных стадиях эволюции. Используются данные в миллиметровом диапазоне и в инфракрасном, к которым применяются два различных подхода: машинное 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 принадлежности к определённым типам. В свою очередь, алгоритмы классификации, обученные на выборках объектов с уже известными свойствами, дают возможность предсказать стадию эволюции молекулярного облака.

Таблица 4: Полнота признаков из каталога MALT90, данных Spitzer и мазеров CH₃OH 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
HCO ⁺	3125	87.88
HNC	2993	84.17
HCN	2678	75.31
N ₂ H ⁺	2543	71.51
C ₂ H	1673	47.05
H ¹³ CO ⁺	915	25.73
HC ₃ N	798	22.44
HN ¹³ C	547	15.38
Мазер CH ₃ OH	505	14.2
SiO	341	9.59
HNCO ₄₀₄	296	8.32
¹³ CS	171	4.81
CH ₃ CN	103	2.9
H41 _a	22	0.62
HC ¹³ CCN	10	0.28
¹³ C ³⁴ S	9	0.25

3.1 Данные каталогов

Данные об излучение в молекулярных линиях и плотности потока на длине волны 870 мкм были получены из обзора MALT90 [117], который представляет собой обзор галактической плоскости ($0 < l < 20$, $248 < l < 360$ и $|b| < 1.4$) в районе 90 ГГц. Фотометрические данные в инфракрасном диапазоне на длинах волн 3.6 мкм и 4.5 мкм, а также данные на 24 мкм получены из архива Spitzer Heritage¹. Для анализа также использовались данные о наличии мазеров CH₃OH второго класса типа в радиусе 5'' от источников из базы данных maser.db [118]. Краткая сводка о полноте данных приводится в таблице 4

Анализ данных проводился с использованием библиотеки машинного обучения Scikit-learn для Python [119].

3.2 Предварительная обработка данных

В исходном наборе данных каждому сгустку соответствует одна из нескольких категорий, основанных на инфракрасных характеристиках: Q – темные ИК-

¹https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/?__action=layout.showDropDown&

области, А – протозвёздные, С – компактные области Н II, Н – протяженные области Н II, Р – 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 нашего анализа мы сосредоточились на интегральных интенсивностях 16 молекулярных линий и плотности потока на длине волны 870 мкм. Хотя инфракрасная классификация молекулярных облаков не использовалась при выполнении кластеризации, она была привлечена на последующих этапах – для анализа состава кластеров и для обучения алгоритмов для последующей идентификации объектов неопределенной классификации (U). Следует отметить, что не все линии излучения были обнаружены в молекулярных облаках. На первом этапе кластеризации не принимались во внимание параметры, для которых излучение было зарегистрировано менее чем у 40% источников. В результате были отобраны только значения интегральной интенсивности излучения пяти молекул: HCO^+ , HNC , N_2H^+ , HCN и C_2H , а также значение потока на длине волны 870 мкм. На втором этапе кластеризации и при решении задачи классификации были использованы все доступные значения интегральных интенсивностей молекул из каталога MALT90, к которым были добавлены ИК-потоки Spitzer и маркеры наличия мазеров метанола.



Рис. 24: Схема предварительной обработки данных

Для подготовки данных к кластеризации мы применили QuantileTransformer для стандартизации признаков. QuantileTransformer для каждого значения признака определяет его квантиль – долю данных, которые меньше или равны этому значению. Затем квантиль переводится в число из нового распределения (в этой работе использовалось нормальное распределение), так что все признаки получают одинаковую форму распределения. В результате признаки становятся сравнимыми по масштабу и менее чувствительными к выбросам. Затем использовался метод стохастическое вложение соседей с t-распределением для снижения размерности данных (подробнее об этом методе ниже смотри раздел 3.3.2), который пре-

образовал многомерные данные в двумерное пространство. Более наглядно шаги по предварительной обработке данных показаны на рис. 24

3.3 Методы машинного обучения

Кластеризация – мощный метод выявления закономерностей в многомерных данных, позволяющий выявлять значимые подгруппы без предварительной маркировки. Однако при работе с большим количеством признаков наличие нерелевантной или избыточной информации может исказить структуру кластеризации, что затрудняет интерпретацию. Кроме того, не все признаки вносят одинаковый вклад в формирование отдельных подгрупп, а некоторые могут вносить шум, а не полезную информацию. Для решения этих задач перед кластеризацией часто применяются методы снижения размерности.

3.3.1 Метод главных компонент (PCA)

Метод главных компонент (или PCA) ([120], [121]) – один из наиболее популярных методов снижения размерности. Он создаёт линейную комбинацию признаков, преобразуя данные в новый набор переменных, называемых главными компонентами, которые ранжируются по степени дисперсии. Эти компоненты представляют собой линейные комбинации исходных признаков, где первый главный компонент отражает наибольшую дисперсию, второй – следующую по величине, и так далее. Сокращая набор данных до меньшего количества компонент, PCA помогает устранить шум и избыточность, упрощая выявление значимых кластеров. Этот процесс может повысить производительность алгоритмов кластеризации, выделяя наиболее важные признаки и снижая вычислительную сложность. Однако PCA имеет свои ограничения. Этот метод предполагает, что данные могут быть представлены в виде линейной комбинации признаков. Если данные содержат нелинейные связи, PCA может не охватить их, что может привести к потере важной информации во время кластеризации. Для данных каталога MALT90 это использование этого метода показывало систематически худший результат кластеризации, чем метод стохастическое вложение соседей с t -распределением, поэтому от него пришлось отказаться.

3.3.2 Метод стохастическое вложение соседей с t -распределением (t-SNE)

Другим методом снижения размерности является метод стохастическое вложение соседей с t -распределением (t-SNE) ([122]). Это нелинейный метод, разработанный для сохранения локальных взаимосвязей между точками данных. t-SNE преобразует парные расстояния между точками в условные вероятности, отра-

жающие сходство. Затем он пытается отобразить данные в пространстве меньшей размерности, где схожие точки остаются близко друг к другу, а различные – дальше друг от друга. Такой подход часто выявляет естественные группировки данных.

Однако ключевым ограничением t-SNE является то, что результирующие оси в пространстве меньшей размерности не соответствуют каким-либо конкретным признакам или комбинациям признаков исходного набора данных. Хотя расстояние между точками показывает, насколько они схожи, направление, размер или расположение всего графика не несут никакой интерпретируемой информации.

Для лучшего понимания результатов мы использовали классификатор Random Forest. Мы обучили его на исходных данных, чтобы предсказать, как точки на карте t-SNE будут сгруппированы в кластеры. Это помогло нам определить, какие признаки наиболее важны для кластеризации.

В отличие от традиционных методов кластеризации, HDBSCAN не требует заранее заданного количества кластеров. Вместо этого он динамически выделяет группы на основе локальных вариаций плотности. Алгоритм также определяет некоторые точки как «шум», предотвращая образование искусственных кластеров из выбросов.

3.3.3 Классификатор случайного леса (Random Forest)

Случайный лес (Random Forest, RF) – это метод машинного обучения, используемый для задач классификации и регрессии ([123]). Он работает путем построения большого количества деревьев решений в процессе обучения и формирования прогнозов на основе большинства голосов (при классификации) отдельных деревьев. Каждое дерево строится с использованием случайного подмножества обучающих данных и случайного подмножества признаков, что помогает снизить переобучение и улучшить обобщение.

Этот метод особенно полезен при работе со сложными многомерными наборами данных, поскольку он позволяет улавливать нелинейные взаимосвязи и взаимодействия между признаками. Более того, случайный лес предоставляет оценки важности признаков, которые показывают, какой вклад каждая переменная вносит в процесс принятия решений моделью. Эти значения могут предоставить информацию о том, какие признаки играют ключевую роль в разделении кластеров.

В нашем анализе мы использовали классификатор случайного леса для двух основных целей. Во-первых, с помощью этого классификатора мы выявляли наиболее важные признаки, способствующие разделению кластеров. Во-вторых, мы использовали классификатор для прогнозирования вероятной принадлежности к тому или иному типу сгустков ранее неопределённых объектов. Для этого мы исключили неопределённые объекты из обучающей выборки, обучили модель на

изначально классифицированных сгустках, а затем применили её для оценки вероятности принадлежности каждого неопределённого объекта к определённому типу молекулярного облака.

3.3.4 Классификатор градиентного бустинга

Градиентный бустинг (Gradient Boosting, GB) – это ещё один метод машинного обучения с учителем, используемый как для задач классификации, так и для задач регрессии ([124]). В отличие от случайного леса, который строит множество независимых деревьев, градиентный бустинг строит деревья последовательно, где каждое новое дерево пытается исправить ошибки, допущенные предыдущими. Это достигается путём подгонки каждого дерева к градиенту функции потерь, фокусируясь на остатках или ошибках, оставленных предыдущими деревьями.

Модель постепенно улучшается путём добавления этих деревьев по одному, объединяя их результаты для создания сильного общего предсказания. Этот последовательный процесс обучения позволяет градиентному бустингу улавливать сложные закономерности и взаимодействия в данных. Градиентный бустинг также обеспечивает гибкость в отношении функций потерь и методов регуляризации, помогая уменьшить переобучение и улучшить обобщение.

Мы использовали градиентный бустинг ([119]) для классификации неопределённых объектов, исключая их из обучающего набора, подгоняя классификатор к известным кластерам и оценивая вероятность принадлежности каждого неопределённого объекта к заданному классу.

3.4 Фотометрия для объектов каталога MALT90 по данным Spitzer

Как упоминалось в работе [117], инфракрасные фотометрические данные для объектов каталога MALT90 на длинах волн 3–8 мкм и 3–24 мкм были взяты из обзоров GLIMPSE и MIPS GAL; [125, 126]. Однако, несмотря на то, что данные фотометрии, выполненные в работе [125], есть в базе данных VizieR², они покрывают только часть объектов по галактической долготе $|l| = 10^\circ - 65^\circ$. В то же время в работе [126] были получены мозаики для галактической плоскости, но фотометрия на 24 мкм для интересующих нас источников не проводилась. Поэтому фотометрические измерения на длинах волн 3.6, 4.5 и 8 мкм были выполнены самостоятельно с использованием архивных данных Spitzer Space Telescope IRAC (Infrared Array Camera) в каналах 1, 2 и 4 соответственно. Методика обработки основывалась на рекомендациях, приведённых в IRAC Instrument Handbook³. Для

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

³https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irac/iracinstrumenthandbook/IRAC_Instrument_Handbook.pdf

каждого объекта из каталога MALT90 была проведена апертурная фотометрия изображений mosaic с последующей коррекцией фонового излучения. Измерения проводились с использованием круговой апертуры радиусом 2.4 угловых секунды. Фоновое излучение оценивалось в кольцевой области с внутренним радиусом 2.4'' и внешним радиусом 7.2''. Для корректного учета потерь потока за пределами апертуры применялась поправка апертуры, соответствующая каналу IRAC. Фоновое излучение оценивалось с использованием алгоритма MMM (Mean-Mode-Mean), который обеспечивает оценку фона неба даже в присутствии слабых источников в кольцевой области. Измеренный поток в апертуре корректировался на вычитание фонового излучения. Преобразование единиц из МЯн/стер в мЯн учитывало угловой размер пикселя и площадь апертуры:

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

где F_{mJy} – поток в мЯн, $F_{\text{ap,corr}}$ – скорректированный поток в апертуре (в единицах изображения, МЯн/ср), A_{pixel} – площадь пикселя в квадратных угловых секундах, $A_{\text{pixel}} = \theta_x \times \theta_y \times (3600)^2$ (где θ_x, θ_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 инструмента IRAC, для MIPS существует руководство по обработке данных ⁴, которое бралось за основу при выполнении фотометрии. Для каждого объекта апертурная фотометрия проводилась с радиусом апертуры 7'', а фоновое излучение оценивалось в кольцевой области с внутренним радиусом 7'' и внешним радиусом 20''. В остальном порядок обработки данных и вычисления потоков не отличался от применяемого для каналов IRAC.

Стоит отметить, что при таком подходе полученная точность результатов фотометрии составляет 10-20%. В контексте решаемой задачи такая точность приемлема, поскольку в задачах кластеризации и сравнительного анализа важны не абсолютные потоки, а относительные различия между объектами. Даже при 20%-ной неопределённости общие тенденции в распределении сохраняются.

3.5 Результаты кластеризации

Параметры кластеризации были оптимизированы систематическим перебором. В частности, протестированы различные методы масштабирования данных, включая StandardScaler, RobustScaler, MinMaxScaler, PowerTransformer, MaxAbsScaler,

⁴https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/mips/mipsinstrumenthandbook/MIPS_Instrument_Handbook.pdf

Normalizer и QuantileTransformer из библиотеки scikit-learn ([119]). Для снижения размерности t-SNE варьировался параметр перплексии от 30 до 100 с шагом 10. В алгоритме кластеризации HDBSCAN тестировались значения минимального размера кластера от 30 до 150, а минимальный параметр выборки варьировался от половины размера кластера, с шагом 10, и до того, как следующий шаг превысит размер кластера. Другим переменным параметром было количество компонент. Поскольку t-SNE может генерировать максимум три компоненты, были протестированы две возможные конфигурации, с использованием либо двух, либо трех компонент. Каждая уникальная комбинация параметров оценивалась с помощью оценки силуэта, стандартной метрики для оценки качества кластеризации (см. [127]). Эта оценка основывается на попарных метрических расстояниях объектов из разных кластерах. Для каждого объекта метрика сравнивает среднее расстояние до всех других объектов внутри своего кластера с средним расстоянием до объектов из ближайшего соседнего кластера. Значение силуэта варьируется от -1 до 1 и чем ближе к 1 , тем объект лучше соответствует своему кластеру и отделён от соседних кластеров. Комбинация параметров, достигшая наивысшей оценки силуэта и минимального количества точек шума, выбиралась в качестве оптимальной, что гарантировало хорошее разделение полученных кластеров. Было обнаружено, что для имеющихся данных масштабирование QuantileTransformer в комбинации с методом уменьшения размерности t-SNE с двумя компонентами систематически демонстрировали лучшие результаты оценки силуэта по сравнению с использованием других методов масштабирования или трёх компонент в t-SNE. Если не указано иное, представленные ниже результаты кластеризации предполагают использование масштабирования QuantileTransformer в сочетании с двумя компонентами для t-SNE.

3.5.1 Кластеризация на основе интенсивностей линий молекул

На основе интегральных интенсивностей молекул HCO^+ , HNC , N_2H^+ , HCN и C_2H HDBSCAN успешно выделил одиннадцать кластеров, представленных на рис. 25, каждый из которых представляет отдельную группу. Каждая точка соответствует объекту из каталога MALT90. Наивысшая оценка силуэта $-0,68$ была достигнута при минимальном размере кластера 75 и минимальном количестве соседей 45. Среди кластеров наиболее многочисленные кластеры -0 и 2 , они же оказались устойчивыми при варьировании параметров. Как показано на рис. 25, наблюдается некоторое перекрытие типов объектов между двумя кластерами. Однако, как видно на рис. 26, в их классификациях проявляется чёткое различие: кластер 0 (Протозвёзды) преимущественно содержит протозвёздные объекты (A) и протяженные области II(H), тогда как кластер 1 (Темные в ИК) состоит в

основном из темных ИК-источников (Q) и неопределённых объектов (U).

Поскольку t-SNE — нелинейный метод, невозможно напрямую определить вклад отдельных характеристик в результат кластеризации. Для решения этой проблемы мы обучили классификатор случайного леса (RF), используя метки кластеров в качестве целевых объектов, что позволило оценить важность характеристик на основе того, насколько хорошо каждая характеристика помогает предсказать принадлежность к кластеру. Результаты, представленные на рис. 27, показывают, что наиболее важными характеристиками являются интегральные интенсивности CCN и N_2H^+ .

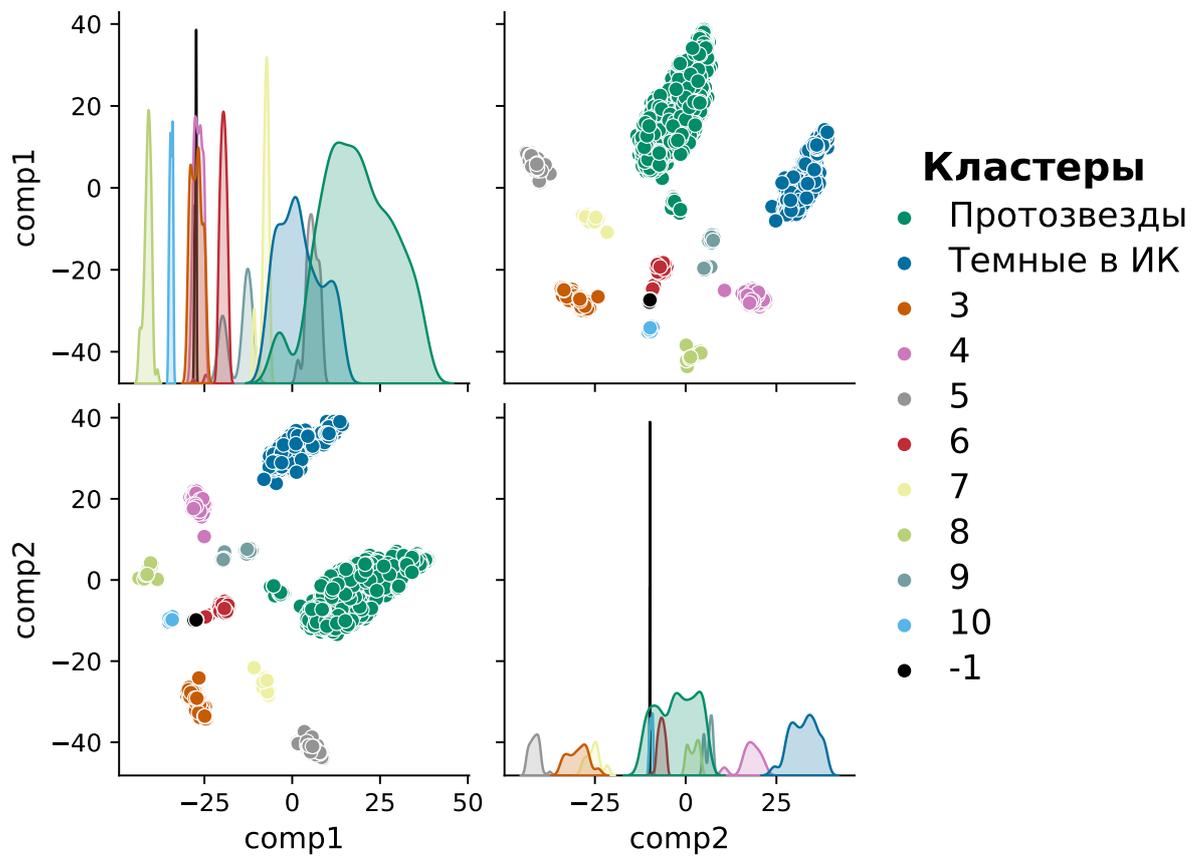


Рис. 25: Результат кластеризации HDBSCAN с использованием метода уменьшения размерности t-SNE на основе интегральных значений интенсивности пяти молекул: HCO^+ , HNC , N_2H^+ , HCN и C_2H . Каждая точка представляет собой объект из каталога MALT90. Кластеры показаны разными цветами, а стабильные кластеры 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.

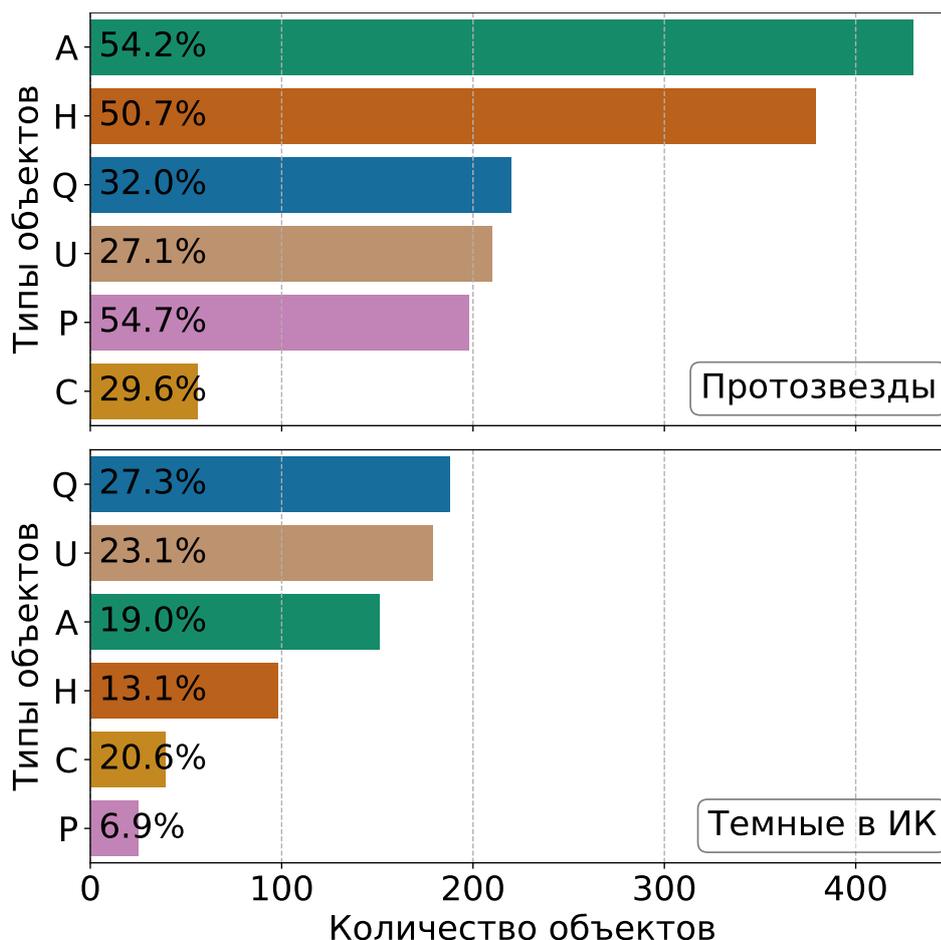


Рис. 26: Распределение типов объектов в двух стабильных и населённых кластерах, выявленных с помощью кластеризации HDBSCAN с методом уменьшения размерности t-SNE по значениям интегральных интенсивностей пяти молекул: HCO^+ , HNC , N_2H^+ , HCN и C_2H . Эти два кластера интерпретируются как преимущественно содержащие протозвёздные объекты (верхний рисунок) и темные в ИК объекты (нижний график). Каждый столбец соответствует определённому типу объектов из каталога MALT90: Q — темные в ИК сгустки, A — протозвёздные, C — компактные области H II, H — протяжённые области H II, P — ФДО и U — неопределённые сгустки. Проценты указывают долю объектов определённого типа сгустка в кластере, а фактическое количество объектов указано по оси x.

Таблица 5: 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
Протозвезды	HCO^+	7.26	4.54
	HNC	5.14	3.15
	N_2H^+	6.19	4.10
	HCN	8.36	4.72
	C_2H	2.59	1.72
Темные в ИК	HCO^+	5.73	2.83
	HNC	3.60	2.07
	N_2H^+	3.30	2.31
	HCN	7.27	2.63
	C_2H	0.00	0.00

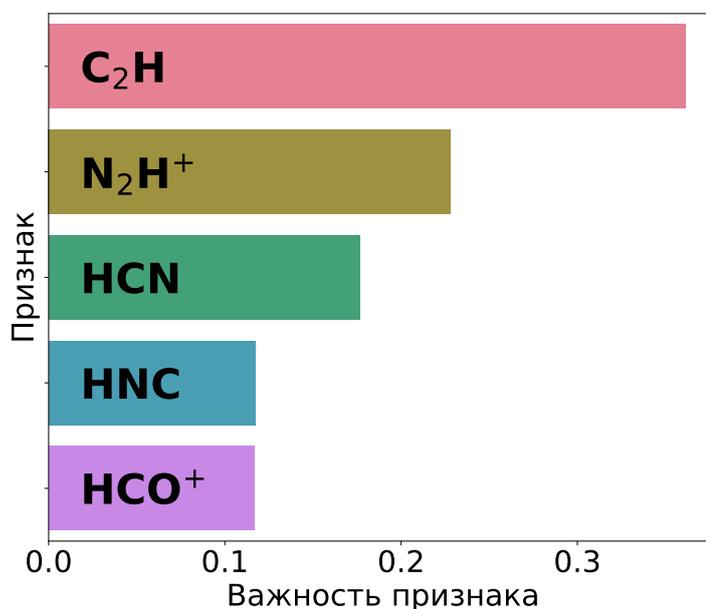


Рис. 27: Важность признаков, полученная методом случайного леса для модели классификации на основе интегральных интенсивностей пяти молекул: HCO^+ , HNC, N_2H^+ , HCN и C_2H .

Следующим шагом было добавление потока на длине волны 870 мкм в качестве дополнительного признака для проверки его влияния на кластеризацию. Однако это оказало незначительное влияние на выделение кластеров, что говорит о том, что данный признак не оказывает существенного влияния на различение этих типов объектов. В результате общая кластеризация осталась практически неизменной, что подтверждает стабильность исходного результата. Поскольку этот признак не оказал влияния на результат кластеризации мы решили не использовать его в дальнейшем.

3.5.2 Кластеризация на основе интенсивностей линий молекул, инфракрасных потоках Spitzer и маркеров наличия мазеров CH_3OH

Поскольку в направлениях плотных сгустков из каталога ATLASGAL телескопом MOPRA проводились наблюдения в районе 90 ГГц с целью поиска спектральных линий, и само отсутствие зарегистрированного излучения также представляет собой полезную информацию, следующим шагом стало включение в анализ данных по интегральным интенсивностям всех линий – даже тех, чьи значения для большинства объектов оказались ниже порога обнаружения телескопа. Всего таких линий 16: HCO^+ (1-0), HNC (1-0), N_2H^+ (1-0), HCN (1-0), C_2H (1-0) 3/2–1/2, H^{13}CO^+ (1-0), HN^{13}C (1-0), ^{13}CS (2-1), $^{13}\text{C}^{34}\text{S}$ (2-1), HC^{13}CCN (10-9), HNCO 4(0,4)–3(0,3), CH_3CN 5(1)–4(1), HC_3N (10-9), HNCO 4(1,3)–3(1,2), SiO (2–1), H 41 α .

Как упоминалось в работе [117], классификация объектов в каталоге MALT90 основывалась на данных потоков Spitzer, на 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм. Поэтому было принято решение добавить ИК-потоки соответствующих объектов на этих длинах волн к имеющимся данным, чтобы оценить их влияние на результаты кластеризации и выяснить, обеспечивают ли они лучшее разделение кластеров по типам объектов. Дополнительно в анализ были включены бинарные маркеры наличия мазеров CH_3OH второго класса, которые являются известными индикаторами ранних стадий звездообразования и часто связаны с горячими ядрами.

Таким образом, финальный набор признаков включал интегральные интенсивности шестнадцати молекулярных линий, инфракрасные потоки и данные о наличии мазеров. Наилучшее значение коэффициента силуэта, равное 0.65, было получено при значении перплексии t-SNE 100, минимального размера кластера 100 и минимального количества соседних объектов – 50. Результат кластеризации показаны на рис. 28, где кластер, состоящий в основном из протозвезд, отчетливо выделяется на фоне других.

Это заметно и на рис. 29, где показаны три наиболее населенных устойчивых кластера. На второй панели видно, что в этом кластере четкое доминирование молекулярных облаков с протозвездами и H II-областей. Кластер состоящий из неопределенных молекулярных облаков состоит из разных типов объектов, распределенных о. Состав кластера, представленном на нижней панели рис. 29. показывает, что связан с молекулярными облаками на более поздней стадии эволюции и состоит из H II-областей и ФДО.

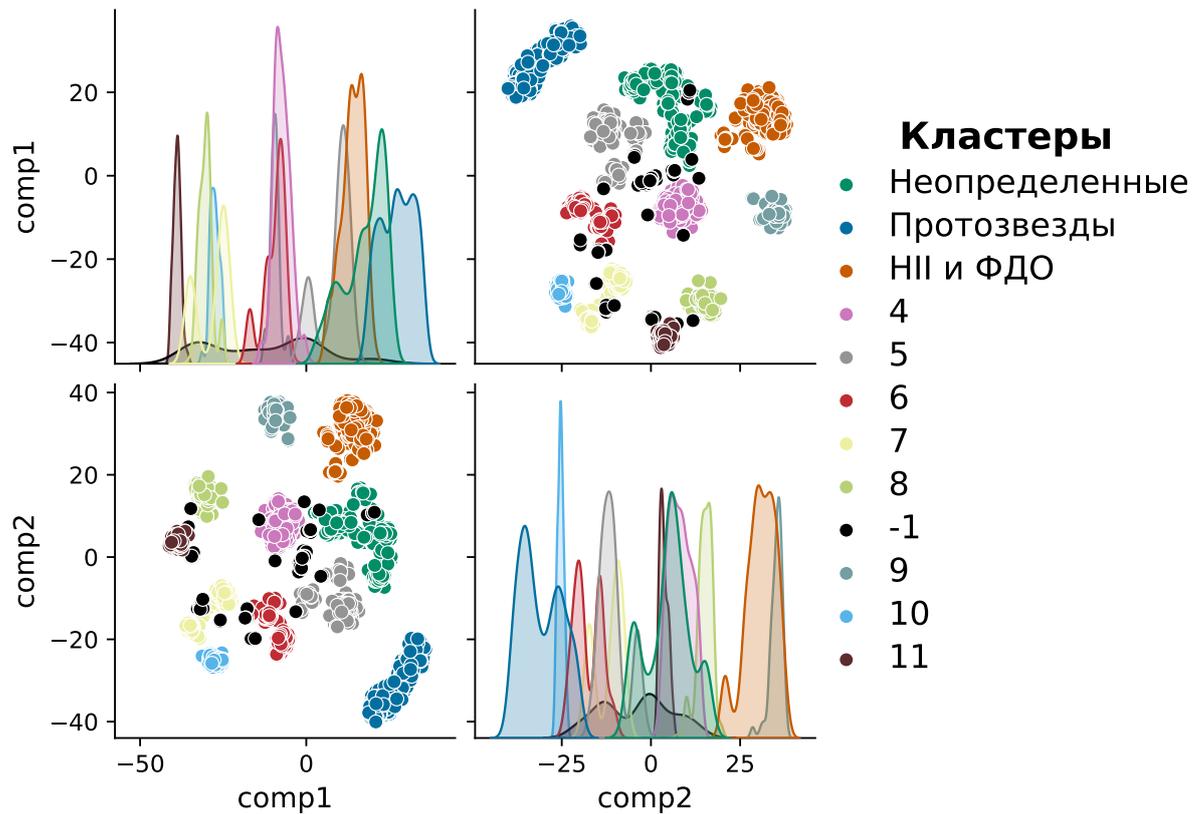


Рис. 28: Результат кластеризации HDBSCAN с использованием метода уменьшения размерности t-SNE на основе интегральных значений интенсивности шестнадцати молекул ($\text{HCO}^+(1-0)$, $\text{HNC}(1-0)$, $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$, $\text{HCN}(1-0)$, $\text{C}_2\text{H}(1-0)$ $3/2-1/2$, $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$, $\text{HN}^{13}\text{C}(1-0)$, $^{13}\text{CS}(2-1)$, $^{13}\text{C}^{34}\text{S}(2-1)$, $\text{HC}^{13}\text{CCN}(10-9)$, $\text{HNCO } 4(0,4)-3(0,3)$, $\text{CH}_3\text{CN } 5(1)-4(1)$, $\text{HC}_3\text{N } (10-9)$, $\text{HNCO } 4(1,3)-3(1,2)$, $\text{SiO } (2-1)$, $\text{H } 41\alpha$), потоках Spitzer на 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм и на бинарных маркерах наличия мазеров CH_3OH второго класса. 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 0.65 была достигнута с использованием QuantileTransformer для масштабирования, перплексии t-SNE 100, минимального размера кластера 100 и минимального количества соседних объектов — 50. Подписи кластеров отображены в порядке убывания количества объектов в каждом из них, а кластер, обозначенный как -1, представляет шум.

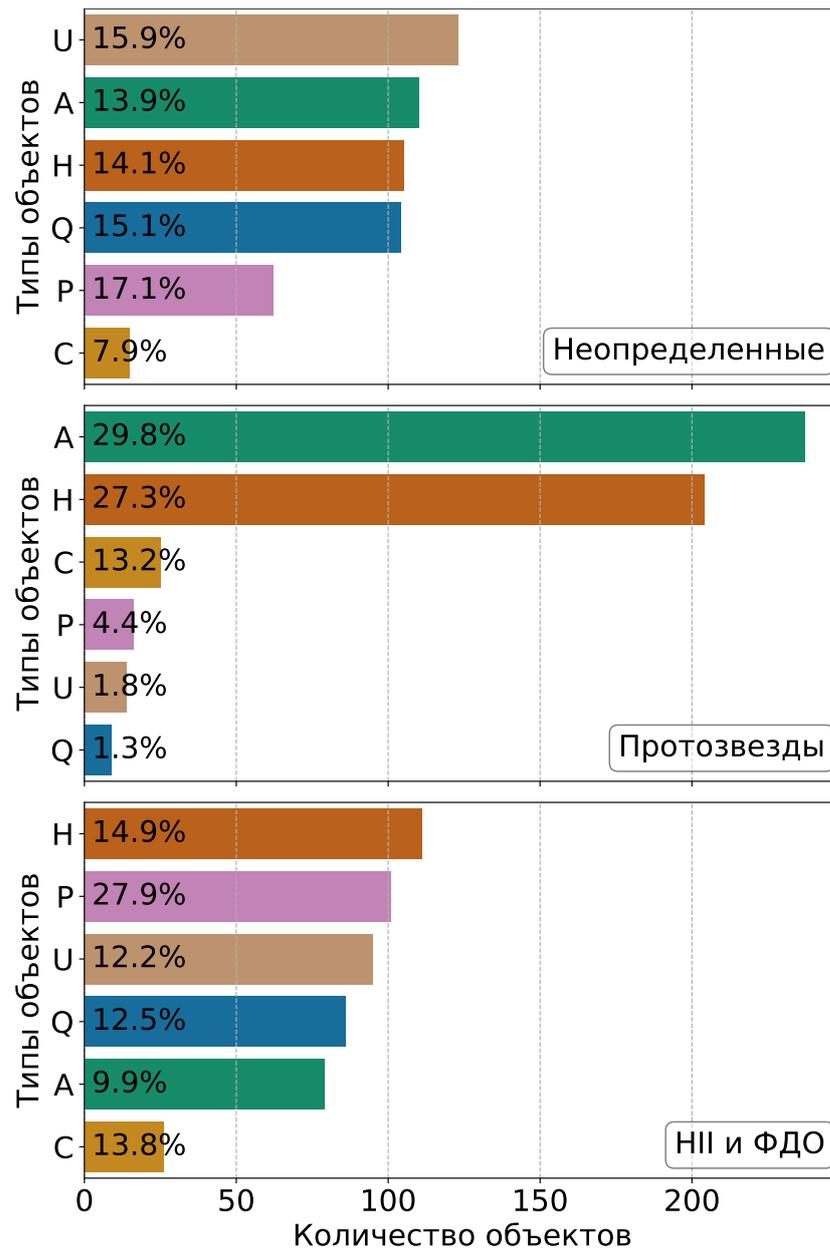


Рис. 29: Распределение типов объектов в трех стабильных и населённых кластерах, выявленных с помощью кластеризации HDBSCAN с методом уменьшения размерности t-SNE по значениям интегральных значений интенсивности шестнадцати молекул (HCO^+ (1-0), HNC (1-0), N_2H^+ (1-0), HCN (1-0), C_2H (1-0) 3/2-1/2, H^{13}CO^+ (1-0), HN^{13}C (1-0), ^{13}CS (2-1), $^{13}\text{C}^{34}\text{S}$ (2-1), HC^{13}CCN (10-9), HNCO 4(0,4)-3(0,3), CH_3CN 5(1)-4(1), HC_3N (10-9), HNCO 4(1,3)-3(1,2), SiO (2-1), $\text{H } 41\alpha$), потоках Spitzer на 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм и на бинарных маркерах наличия мазеров CH_3OH второго класса. Эти кластеры интерпретируются как преимущественно содержащие протозвёздные объекты (верхний рисунок), и темные в ИК объекты (нижний график). Каждый столбец соответствует определённому типу объектов из каталога MALT90: Q — темные в ИК молекулярные облака, A — протозвёздные, C — компактные области H II, H — протяжённые области H II, P — ФДО и U — неопределённые молекулярные облака. Проценты указывают долю объектов определённого типа сгустка в кластере, а фактическое количество объектов указано по оси x.

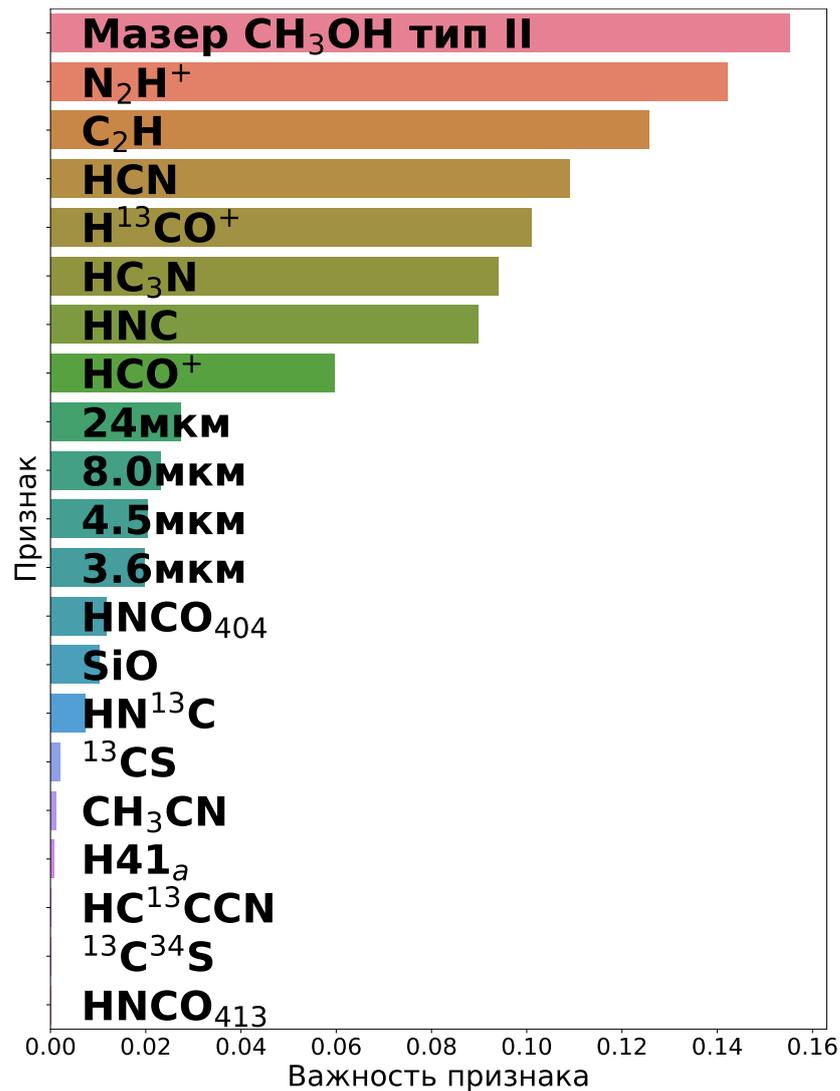


Рис. 30: Важность признаков, полученная методом случайного леса для модели классификации на основе интегральных значений интенсивности шестнадцати молекул (HCO⁺ (1-0), HNC(1-0), N₂H⁺ (1-0), HCN(1-0), C₂H(1-0) 3/2-1/2, H¹³CO⁺ (1-0), HN¹³C(1-0), ¹³CS(2-1), ¹³C³⁴S(2-1), HC¹³CCN(10-9), HNC O 4(0,4)-3(0,3), CH₃CN 5(1)-4(1), HC₃N (10-9), HNC O 4(1,3)-3(1,2), SiO (2-1), H 41 α), потоках Spitzer на 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм и на бинарных маркерах наличия мазеров CH₃OH второго класса.

В таблице 6 приведены численные значения признаков по кластерам. Анализируя медианные и средние значения признаков можно заметить, что кластеры с преобладанием неопределённых молекулярных облаков характеризуются относительно высоким содержанием молекул плотного газа, таких как HCN, HCO⁺, N₂H⁺ и HNC, при умеренных инфракрасных интенсивностях. Это указывает на наличие холодного молекулярного газа и слабую или отсутствующую активность звездообразования. Напротив, кластер с преобладанием протозвёзд демонстрируют повышенные (в 2 – 12 раз) медианные значения ИК-потоков. Медианные интегральные интенсивности молекул плотного газа ниже. Также этот кластер выделяется среди прочих наличием мазерного излучения метанола, что является характерным

признаком активного звездообразования. Области H II характеризуются ещё более низкими медианами интенсивности линий плотного газа и умеренными значениями инфракрасного излучения, что может быть связано с процессами ионизации. А более низкие по сравнению с кластером протозвезд медианные значения ИК-излучения, могут отражать излучение ПАУ.

В целом, комбинация химического состава и инфракрасного излучения позволяет различать стадии эволюции кластеров: от холодного молекулярного газа к протозвездам и областям H II.

Таблица 6: Распределение средних и медианных значений признаков по кластерам для модели классификации на основе значений интегральных интенсивностей ($K^*_{\text{км/с}}$) шестнадцати молекул, потоках Spitzer (мЯн) и на бинарных маркерах наличия мазеров CH_3OH второго класса. Нулевые значения интегральных интенсивностей указывают на то, что излучение соответствующей молекулы ниже порога ее обнаружения.

Кластер	Признак	Среднее	Медиана
Неопределенные	Мазер CH_3OH тип II	нет	нет
	N_2H^+	9.34	6.69
	C_2H	3.15	2.30
	HCN	16.42	9.41
	H^{13}CO^+	0.79	0.64
	HC_3N	2.67	1.10
	HNC	8.68	5.88
	HCO^+	12.18	7.60
	24мкм	137.30	17.11
	8.0мкм	311.36	22.87
	4.5мкм	8.68	0.64
	3.6мкм	28.82	4.28
	HNCO_{404}	2.74	0.00
	SiO	1.99	0.00
	HN^{13}C	0.48	0.00
	^{13}CS	0.15	0.00
	CH_3CN	0.28	0.00
	H41_a	0.08	0.00
	HC^{13}CCN	0.00	0.00
	$^{13}\text{C}^{34}\text{S}$	0.00	0.00
Протозвезды	Мазер CH_3OH тип II	есть	есть
	N_2H^+	6.19	3.98
	C_2H	2.15	1.43
	HCN	7.69	3.94
	H^{13}CO^+	0.75	0.00
	HC_3N	1.63	0.00
	HNC	4.89	3.04
	HCO^+	7.05	4.21
	24мкм	315.82	206.00
	8.0мкм	615.95	98.01
	4.5мкм	15.10	1.60
	3.6мкм	54.02	9.02

Продолжение на следующей странице

Кластер	Признак	Среднее	Медиана
Протозвезды	HNCO ₄₀₄	0.75	0.00
	SiO	0.66	0.00
	HN ¹³ C	0.43	0.00
	¹³ CS	0.30	0.00
	CH ₃ CN	0.40	0.00
	H41 _a	0.06	0.00
	HC ¹³ CCN	0.02	0.00
	¹³ C ³⁴ S	0.00	0.00
Области H II	Мазер CH ₃ OH тип II	нет	нет
	N ₂ H ⁺	2.69	2.14
	C ₂ H	1.53	1.31
	HCN	4.34	3.38
	H ¹³ CO ⁺	0.00	0.00
	HC ₃ N	0.00	0.00
	HNC	2.63	2.10
	HCO ⁺	3.98	3.18
	24мкм	123.01	20.00
	8.0мкм	166.65	23.41
	4.5мкм	5.07	0.36
	3.6мкм	16.84	2.11
	HNCO ₄₀₄	0.03	0.00
	SiO	0.02	0.00
	HN ¹³ C	0.04	0.00
	¹³ CS	0.00	0.00
	CH ₃ CN	0.00	0.00
	H41 _a	0.00	0.00
HC ¹³ CCN	0.00	0.00	
¹³ C ³⁴ S	0.00	0.00	

3.6 Применение алгоритмов машинного обучения для классификации молекулярных облаков из каталога MALT90

Предварительная обработка данных включала масштабирование с помощью QuantileTransformer, которое ранее показало наилучшие результаты для данных по молекулярному излучению и ИК потокам. Поскольку в решении задачи кластеризации включение всех имеющихся данных по интегральным интенсивности линий, а так же потокам в среднем ИК и маркерам наличия мазеров CH₃OH

показало разделение молекулярных облаков на три устойчивых кластера, было решено использовать этот же набор признаков и в решении задачи по уточнению классификации молекулярных облаков неопределенного типа.

Для выявления скрытых закономерностей в данных был применён классификатор Random Forest с 1000 деревьями. Объекты были разделены на две группы: с известной и неопределённой классификацией. Для обучения модели использовались только объекты с известной классификацией, при этом из обучающей выборки исключались молекулярные облака, для которых отсутствовали данные по ИК потокам. Качество модели оценивалось с помощью 4-кратной кросс-валидации. После обучения классификатор применялся для прогнозирования типов объектов из неопределённой группы и оценки вероятностей принадлежности к каждому типу. Средняя точность кросс-валидации составила 0.6. Для повышения надёжности предсказаний был установлен порог вероятности 50% для отнесения объекта к предсказанному типу. Объекты с вероятностью принадлежности к предсказанному типу ниже этого порога сохраняли статус неопределённых. С помощью этого подхода удалось классифицировать 527 из 774 молекулярных облаков неопределённых типов.

Для повышения точности идентификации объектов с неопределённой классификацией был дополнительно применён классификатор Gradient Boosting. Классификатор Gradient Boosting был обучен со следующими параметрами: количество деревьев — 1000, скорость обучения — 0.01, максимальная глубина — 3. Для повышения обобщающей способности модели и снижения переобучения при построении каждого нового дерева на каждой итерации использовалось только 80% от общего набора данных. Кроме того, была активирована функция early stopping с валидационной выборкой 10%, что позволяло автоматически завершать обучение при отсутствии улучшений в течение 10 итераций подряд. Обучение проводилось на подмножестве объектов с известными типами молекулярных облаков для которых есть значения по ИК-потокам во всех четырех диапазонах, а оценка качества осуществлялась методом 4-кратной кросс-валидации, аналогично использованному подходу для Random Forest.

Классификатор Gradient Boosting определил типы 611 молекулярных облаков с вероятностью принадлежности к предсказанному классу молекулярного облака выше 50%. Средняя точность кросс-валидации составила 0.6, что сопоставимо с результатами Random Forest. Для повышения надёжности итоговой классификации были объединены предсказания обоих классификаторов. В результате была установлена классификация 505 объектов, 499 из которых были отнесены к одному и тому же классу обоими методами.

Таблица 7: Сводка предсказанного типа объектов для неопределённых молекулярных облаков с использованием классификаторов Random Forest (RF) и Gradient Boosting (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	451	477	85.6	78.1	0.74	0.775
P	48	75	9.1	12.3	0.66	0.717
A	24	53	4.6	8.7	0.60	0.598
H	4	5	0.8	0.8	0.61	0.605
C	-	1	-	0.2	-	0.514

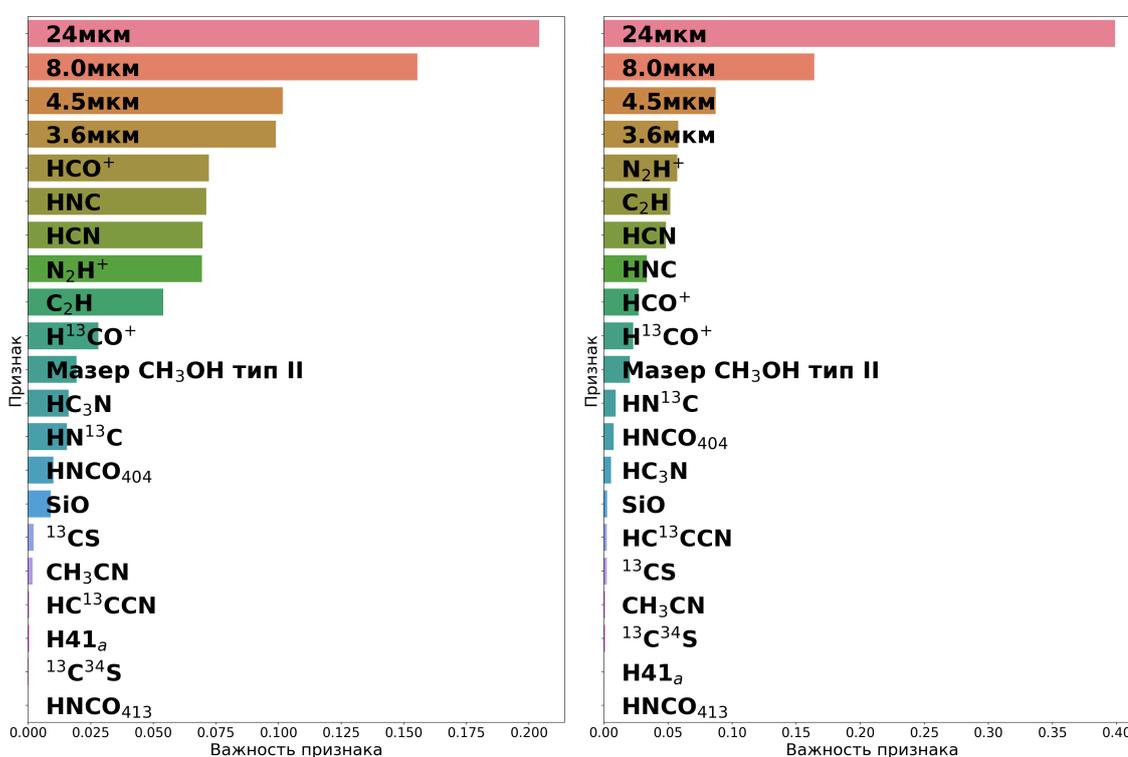


Рис. 31: Важность признаков при использовании классификаторов Random Forest (левая панель) и Gradient Boosting (правая панель)

Стоит отметить, что основными признаками для классификации неопределённых молекулярных облаков оказались инфракрасные потоки Spitzer (см. рис. 31). Это можно объяснить тем, что модель учится находить границы между заранее определёнными типами молекулярных облаков, т.к. в подходе, принятом в работе [117], ИК-потоки служили основным критерием для классификации молекулярных облаков.

Сравнительный анализ результатов классификации молекулярных облаков с неопределёнными типами, выполненный с использованием классификаторов Random Forest и Gradient Boosting, отображён на рис. 33. Для иллюстрации различий в результатах классификации на правой панели рис. 33 приведена матрица несоот-

ветствий. Каждая ячейка содержит число объектов, для которых Random Forest (строки) и Gradient Boosting (столбцы) предсказали тип молекулярного облака. Сходства и расхождений выделены цветовой шкалой, а число указывает на количество молекулярных облаков принадлежащих соответствующему типу. Анализ матрицы показывает, что лишь 6 объектов получили различные классификации от двух алгоритмов, причём максимальное число несоответствий – пять – наблюдается между протозвездами и областями без активного звездообразования. В таблице 8 приведены результаты классификации молекулярных облаков, типы которых были определены описанным методом. Названия объектов, отмеченные символом *, получили различные классификации от двух алгоритмов.

Следующим этапом исследования стала замена ранее неопределённых типов молекулярных облаков на уточнённые типы, полученные с помощью классификаторов Random Forest и Gradient Boosting. После этого была проведена кластеризация с использованием тех же параметров, которые были описаны в параграфах 3.5.1 и 3.5.2, что позволило оценить влияние уточнённой классификации на структуру кластеров. Результаты представлены на рис. 32

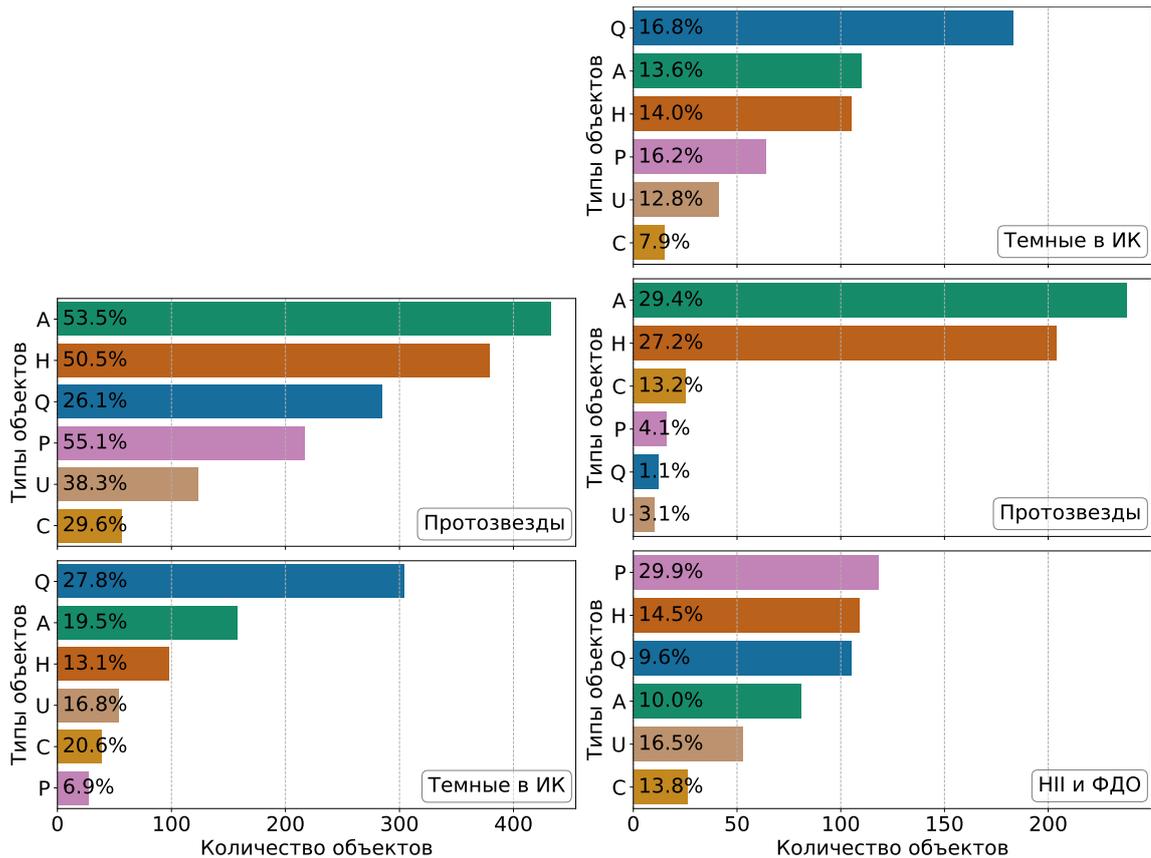


Рис. 32: Распределение типов объектов в кластерах после замены неопределенных молекулярных облаков найденным наиболее вероятным типом. **Левая панель:** Использовалась кластеризация HDBSCAN с методом уменьшения размерности t-SNE по значениям интегральных значений интенсивности пяти молекул (сравните с рис. 26). **Правая панель:** Использовалась кластеризация HDBSCAN с методом уменьшения размерности t-SNE по значениям интегральных значений интенсивности шестнадцати молекул, потоках Spitzer и на бинарных маркерах наличия мазеров CH_3OH второго класса (сравните с рис. 29).

Анализ кластеризации по пяти молекулярным линиям показывает, что кластер, ранее включавший как молекулярные облака без активного звездообразования, так и неопределенные объекты, теперь демонстрирует явное преобладание объектов без активного звездообразования. При этом состав второго кластера остается практически неизменным, что свидетельствует о стабильности выделения групп с другой эволюционной стадией.

Схожая картина наблюдается при кластеризации по 16 молекулярным линиям, потокам Spitzer и мазерам CH_3OH . Введение уточненных типов объектов позволило более четко выделить кластеры с преобладанием молекулярных облаков без активного звездообразования и областей ФДО, в то время как кластер с преобладанием протозвезд практически не претерпел изменений в своем составе. Эти наблюдения указывают на то, что уточнение типов объектов повышает однородность кластеров и усиливает статистическую значимость выделенных групп, не влияя при этом на кластеры, характеризующиеся устойчивыми и хорошо разли-

чимыми свойствами.

Таким образом, применение машинного обучения для определения типов молекулярных облаков и последующая кластеризация позволяет более надежно выявлять закономерности в распределении объектов по стадиям звездообразования. Полученные результаты создают основу для дальнейшего анализа взаимосвязей между физико-химическими свойствами облаков и их эволюционными стадиями.

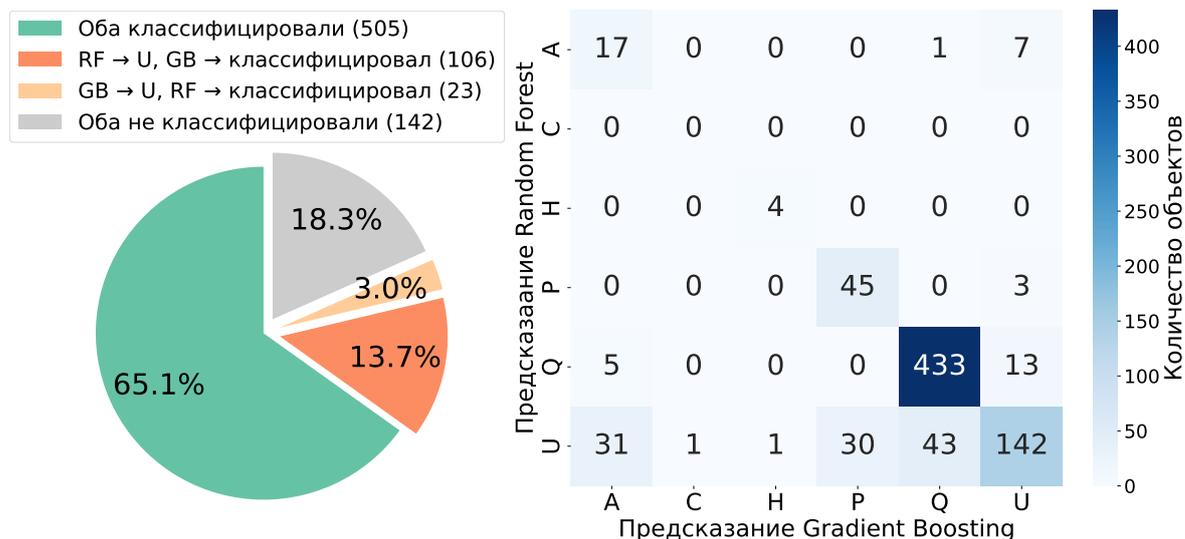


Рис. 33: Сравнение результатов классификации ранее неопределённых типов молекулярных облаков (U) с использованием классификаторов Random Forest (RF) и Gradient Boosting (GB) для объектов с вероятностью предсказания превышающей 50%. **Левая панель:** На диаграмме выделены три категории: совпадения (зеленый сегмент), расхождения (оранжевый и желтый сегменты) и случаи неуверенной классификации (обозначен серым цветом). Каждый сегмент отображает процент молекулярных облаков от общего числа неопределённых 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 Random Forest и Gradient Boosting. 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 — протяжённые области II, P — ФДО и U — неопределённые молекулярные облака.

Таблица 8: Результаты классификации ранее неопределённых 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 её 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	0.69	Q	0.93
2	AGAL000.084+00.164_S	0.08	0.16	Q	0.69	Q	0.75
3	AGAL000.273-00.064_A	0.27	-0.06	Q	0.52	Q	0.93
4	AGAL000.293-00.112_B	0.29	-0.11	P	0.62	P	0.77
5	AGAL000.314-00.099_A	0.31	-0.10	Q	0.61	Q	0.88
6	AGAL000.428-00.184_A	0.43	-0.18	Q	0.80	Q	0.77
7	AGAL000.469+00.026_S	0.47	0.03	Q	0.91	Q	0.95
8	AGAL000.478-00.729_S	0.48	-0.73	Q	0.67	Q	0.82
9	AGAL000.494-00.664_S	0.49	-0.66	A	0.66	A	0.84
10	AGAL000.504+00.141_S	0.50	0.14	Q	0.56	Q	0.73
11	AGAL000.541+00.117_A	0.54	0.12	Q	0.69	Q	0.67
12	AGAL000.541+00.117_B	0.54	0.12	Q	0.79	Q	0.77
13	AGAL000.553-00.679_S	0.55	-0.68	Q	0.76	Q	0.70
14	AGAL000.569-00.889_S	0.57	-0.89	Q	0.54	Q	0.76
15	AGAL000.646+00.029_A	0.65	0.03	Q	0.98	Q	0.95
16	AGAL000.646+00.029_B	0.65	0.03	Q	0.88	Q	0.92
17	AGAL000.704-00.181_S	0.70	-0.18	Q	0.94	Q	0.96
18	AGAL000.756-00.074_S	0.76	-0.07	Q	0.97	Q	0.98
19	AGAL000.771-00.186_S	0.77	-0.19	Q	0.96	Q	0.96
20	AGAL000.784-00.206_A	0.78	-0.21	Q	0.98	Q	0.96
21	AGAL000.784-00.206_B	0.78	-0.21	Q	0.80	Q	0.93
22	AGAL000.844-00.204_A	0.84	-0.20	Q	0.89	Q	0.96
23	AGAL000.844-00.204_B	0.84	-0.20	Q	0.83	Q	0.90
24	AGAL000.848-00.029_A	0.85	-0.03	Q	0.86	Q	0.97
25	AGAL000.848-00.029_B	0.85	-0.03	Q	0.82	Q	0.90
26	AGAL000.866-00.036_S	0.87	-0.04	Q	0.83	Q	0.86
27	AGAL000.874-00.012_A	0.87	-0.01	Q	0.78	Q	0.93
28	AGAL000.874-00.012_B	0.87	-0.01	Q	0.84	Q	0.95
29	AGAL000.883+00.166_S	0.88	0.17	Q	0.94	Q	0.96
30	AGAL000.891+00.142_S	0.89	0.14	Q	0.97	Q	0.96
31	AGAL000.918-00.326_S	0.92	-0.33	Q	0.56	Q	0.77

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
32	AGAL000.928-00.337_S	0.93	-0.34	Q	0.76	Q	0.83
33	AGAL000.934-00.327_S	0.93	-0.33	Q	0.78	Q	0.81
34	AGAL000.969-00.336_S	0.97	-0.34	Q	0.78	Q	0.79
35	AGAL001.036-00.076_A	1.04	-0.08	Q	0.93	Q	0.94
36	AGAL001.036-00.076_B	1.04	-0.08	Q	0.51	Q	0.52
37	AGAL001.063-00.077_A	1.06	-0.08	Q	0.56	Q	0.61
38	AGAL001.063-00.077_B	1.06	-0.08	Q	0.81	Q	0.90
39	AGAL001.199+00.076_S	1.20	0.08	Q	0.90	Q	0.92
40	AGAL001.266+00.056_A	1.27	0.06	Q	0.96	Q	0.96
41	AGAL001.266+00.056_B	1.27	0.06	Q	0.57	Q	0.78
42	AGAL001.278-00.151_A	1.28	-0.15	Q	0.96	Q	0.96
43	AGAL001.278-00.151_B	1.28	-0.15	Q	0.70	Q	0.75
44	AGAL001.303-00.062_A	1.30	-0.06	Q	0.95	Q	0.97
45	AGAL001.303-00.062_B	1.30	-0.06	Q	0.70	Q	0.82
46	AGAL001.318+00.266_S	1.32	0.27	Q	0.97	Q	0.96
47	AGAL001.321-00.071_S	1.32	-0.07	Q	0.92	Q	0.94
48	AGAL001.343-00.082_A	1.34	-0.08	Q	0.96	Q	0.96
49	AGAL001.343-00.082_B	1.34	-0.08	Q	0.71	Q	0.79
50	AGAL001.359+00.101_S	1.36	0.10	Q	0.85	Q	0.94
51	AGAL001.359+00.127_A	1.36	0.13	Q	0.73	Q	0.93
52	AGAL001.361+00.216_S	1.36	0.22	Q	0.93	Q	0.96
53	AGAL001.381+00.199_S	1.38	0.20	Q	0.98	Q	0.97
54	AGAL001.419-00.237_S	1.42	-0.24	Q	0.86	Q	0.92
55	AGAL001.446+00.067_S	1.45	0.07	Q	0.94	Q	0.96
56	AGAL001.508-00.247_A	1.51	-0.25	Q	0.75	Q	0.77
57	AGAL001.508-00.247_B	1.51	-0.25	Q	0.69	Q	0.74
58	AGAL001.539-00.206_A	1.54	-0.21	Q	0.91	Q	0.92
59	AGAL001.539-00.206_B	1.54	-0.21	Q	0.83	Q	0.80
60	AGAL001.544-00.274_A	1.54	-0.27	Q	0.89	Q	0.96
61	AGAL001.544-00.274_B	1.54	-0.27	Q	0.68	Q	0.83
62	AGAL001.642-00.034_A	1.64	-0.03	Q	0.89	Q	0.93
63	AGAL001.642-00.034_B	1.64	-0.03	Q	0.84	Q	0.79
64	AGAL001.662-00.174_S	1.66	-0.17	Q	0.88	Q	0.97
65	AGAL001.674-00.127_S	1.67	-0.13	Q	0.58	Q	0.88
66	AGAL001.684-00.379_A	1.68	-0.38	Q	0.89	Q	0.96
67	AGAL001.684-00.379_B	1.68	-0.38	Q	0.86	Q	0.90

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
68	AGAL001.716-00.056_S	1.72	-0.06	Q	0.96	Q	0.96
69	AGAL001.717-00.336_A	1.72	-0.34	Q	0.81	Q	0.94
70	AGAL001.717-00.336_B	1.72	-0.34	Q	0.80	Q	0.81
71	AGAL001.749-00.102_S	1.75	-0.10	Q	0.95	Q	0.95
72	AGAL001.796-00.126_S	1.80	-0.13	Q	0.92	Q	0.96
73	AGAL001.891-00.071_S	1.89	-0.07	Q	0.94	Q	0.96
74	AGAL001.907-00.059_S	1.91	-0.06	Q	0.90	Q	0.92
75	AGAL002.866+00.067_S	2.87	0.07	Q	0.92	Q	0.93
76	AGAL002.899+00.066_S	2.90	0.07	Q	0.93	Q	0.98
77	AGAL003.021-00.067_A	3.02	-0.07	Q	0.96	Q	0.98
78	AGAL003.021-00.067_B	3.02	-0.07	Q	0.89	Q	0.94
79	AGAL003.029-00.072_A	3.03	-0.07	Q	0.86	Q	0.80
80	AGAL003.029-00.072_B	3.03	-0.07	Q	0.85	Q	0.90
81	AGAL003.038-00.057_A	3.04	-0.06	Q	0.94	Q	0.94
82	AGAL003.038-00.057_B	3.04	-0.06	Q	0.88	Q	0.87
83	AGAL003.039+00.144_A	3.04	0.14	Q	0.86	Q	0.92
84	AGAL003.039+00.144_B	3.04	0.14	Q	0.87	Q	0.90
85	AGAL003.049+00.392_S	3.05	0.39	Q	0.82	Q	0.78
86	AGAL003.056+00.151_A	3.06	0.15	Q	0.88	Q	0.91
87	AGAL003.056+00.151_B	3.06	0.15	Q	0.91	Q	0.91
88	AGAL003.059-00.077_A	3.06	-0.08	Q	0.94	Q	0.96
89	AGAL003.059-00.077_B	3.06	-0.08	Q	0.78	Q	0.71
90	AGAL003.093+00.422_S	3.09	0.42	Q	0.91	Q	0.94
91	AGAL003.101+00.294_A	3.10	0.29	Q	0.78	Q	0.93
92	AGAL003.101+00.294_B	3.10	0.29	Q	0.68	Q	0.73
93	AGAL003.121+00.306_S	3.12	0.31	Q	0.76	Q	0.86
94	AGAL003.121+00.416_S	3.12	0.42	Q	0.91	Q	0.96
95	AGAL003.131+00.426_S	3.13	0.43	Q	0.85	Q	0.91
96	AGAL003.141+00.427_A	3.14	0.43	Q	0.80	Q	0.89
97	AGAL003.141+00.427_B	3.14	0.43	Q	0.88	Q	0.95
98	AGAL003.158+00.391_A	3.16	0.39	Q	0.83	Q	0.89
99	AGAL003.158+00.391_B	3.16	0.39	Q	0.81	Q	0.85
100	AGAL003.163+00.559_A	3.16	0.56	Q	0.90	Q	0.94
101	AGAL003.163+00.559_B	3.16	0.56	Q	0.75	Q	0.87
102	AGAL003.179+00.542_A	3.18	0.54	Q	0.94	Q	0.95
103	AGAL003.179+00.542_B	3.18	0.54	Q	0.84	Q	0.89

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
104	AGAL003.199+00.639_S	3.20	0.64	Q	0.95	Q	0.93
105	AGAL003.203+00.502_S	3.20	0.50	Q	0.91	Q	0.92
106	AGAL003.213+00.646_S	3.21	0.65	Q	0.91	Q	0.94
107	AGAL003.219+00.264_S	3.22	0.26	Q	0.87	Q	0.93
108	AGAL003.219+00.619_S	3.22	0.62	Q	0.88	Q	0.92
109	AGAL003.228+00.491_A	3.23	0.49	Q	0.93	Q	0.92
110	AGAL003.228+00.491_B	3.23	0.49	Q	0.80	Q	0.90
111	AGAL003.233+00.264_A	3.23	0.26	Q	0.92	Q	0.93
112	AGAL003.233+00.264_B	3.23	0.26	Q	0.87	Q	0.88
113	AGAL003.264+00.482_S	3.26	0.48	Q	0.91	Q	0.96
114	AGAL003.271+00.444_A	3.27	0.44	Q	0.96	Q	0.96
115	AGAL003.271+00.444_B	3.27	0.44	Q	0.73	Q	0.86
116	AGAL003.274+00.581_S	3.27	0.58	Q	0.88	Q	0.91
117	AGAL003.283+00.591_S	3.28	0.59	Q	0.83	Q	0.83
118	AGAL003.288+00.454_S	3.29	0.45	Q	0.94	Q	0.96
119	AGAL003.289+00.574_S	3.29	0.57	Q	0.82	Q	0.81
120	AGAL003.306+00.346_S	3.31	0.35	Q	0.62	Q	0.67
121	AGAL003.326+00.441_A	3.33	0.44	Q	0.96	Q	0.95
122	AGAL003.326+00.441_B	3.33	0.44	Q	0.72	Q	0.82
123	AGAL003.348+00.436_A	3.35	0.44	Q	0.98	Q	0.96
124	AGAL003.348+00.436_B	3.35	0.44	Q	0.70	Q	0.77
125	AGAL003.386+00.307_S	3.39	0.31	Q	0.86	Q	0.91
126	AGAL004.091+00.047_S	4.09	0.05	Q	0.70	Q	0.73
127	AGAL004.498-00.811_S	4.50	-0.81	Q	0.64	Q	0.77
128	AGAL006.221-00.116_S	6.22	-0.12	Q	0.66	Q	0.80
129	AGAL006.498-00.322_S	6.50	-0.32	Q	0.70	Q	0.71
130	AGAL006.556-00.259_S	6.56	-0.26	Q	0.90	Q	0.87
131	AGAL006.581-00.306_S	6.58	-0.31	Q	0.73	Q	0.85
132	AGAL007.346-00.001_S	7.35	-0.00	Q	0.78	Q	0.62
133	AGAL007.436-00.281_S	7.44	-0.28	Q	0.76	Q	0.83
134	AGAL008.384-00.267_S	8.38	-0.27	Q	0.59	Q	0.64
135	AGAL008.965-00.536_S	8.96	-0.54	Q	0.75	Q	0.83
136	AGAL009.858-00.102_S	9.86	-0.10	Q	0.68	Q	0.66
137	*AGAL010.051-00.211_S	10.05	-0.21	A	0.58	Q	0.66
138	AGAL010.224-00.186_S	10.22	-0.19	Q	0.79	Q	0.78
139	AGAL010.444-00.017_S	10.44	-0.02	A	0.56	A	0.63

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
140	AGAL010.579-00.349_S	10.58	-0.35	Q	0.87	Q	0.84
141	AGAL010.659-00.326_S	10.66	-0.33	Q	0.57	Q	0.68
142	AGAL010.982-00.367_S	10.98	-0.37	Q	0.65	Q	0.68
143	AGAL011.001-00.372_S	11.00	-0.37	Q	0.88	Q	0.87
144	AGAL012.661-00.166_A	12.66	-0.17	Q	0.70	Q	0.76
145	AGAL012.661-00.166_B	12.66	-0.17	Q	0.77	Q	0.84
146	AGAL012.776-00.337_A	12.78	-0.34	Q	0.82	Q	0.84
147	AGAL012.776-00.337_B	12.78	-0.34	Q	0.88	Q	0.81
148	AGAL012.929-00.319_S	12.93	-0.32	Q	0.52	Q	0.55
149	AGAL013.891-00.121_A	13.89	-0.12	Q	0.62	Q	0.72
150	AGAL013.891-00.121_B	13.89	-0.12	Q	0.55	Q	0.70
151	AGAL014.192-00.166_S	14.19	-0.17	A	0.53	A	0.60
152	AGAL014.776-00.457_S	14.78	-0.46	Q	0.89	Q	0.88
153	AGAL284.252-00.337_S	284.25	-0.34	Q	0.51	Q	0.57
154	AGAL301.081+00.936_S	301.08	0.94	Q	0.74	Q	0.59
155	AGAL301.668-00.246_S	301.67	-0.25	Q	0.92	Q	0.83
156	*AGAL301.701+01.109_S	301.70	1.11	Q	0.53	A	0.50
157	AGAL301.724+01.099_S	301.72	1.10	Q	0.79	Q	0.70
158	AGAL304.712+00.601_S	304.71	0.60	Q	0.68	Q	0.51
159	AGAL305.174+00.221_S	305.17	0.22	Q	0.67	Q	0.75
160	AGAL305.259+00.326_S	305.26	0.33	Q	0.53	Q	0.54
161	AGAL305.271-00.029_S	305.27	-0.03	P	0.60	P	0.68
162	AGAL305.346+00.212_S	305.35	0.21	P	0.63	P	0.72
163	AGAL305.589+00.462_S	305.59	0.46	Q	0.58	Q	0.67
164	AGAL306.339-00.309_S	306.34	-0.31	Q	0.59	Q	0.65
165	AGAL309.146-00.389_S	309.15	-0.39	Q	0.73	Q	0.79
166	AGAL309.169-00.344_S	309.17	-0.34	Q	0.57	Q	0.64
167	AGAL311.449+00.379_A	311.45	0.38	Q	0.83	Q	0.82
168	AGAL311.449+00.379_B	311.45	0.38	Q	0.71	Q	0.78
169	AGAL311.834+00.074_S	311.83	0.07	Q	0.76	Q	0.67
170	AGAL311.924+00.224_S	311.92	0.22	P	0.62	P	0.70
171	AGAL314.296+00.101_S	314.30	0.10	A	0.60	A	0.73
172	AGAL317.339+00.106_S	317.34	0.11	Q	0.55	Q	0.62
173	*AGAL317.441-00.374_S	317.44	-0.37	Q	0.54	A	0.58
174	AGAL320.249+00.444_S	320.25	0.44	H	0.64	H	0.57
175	AGAL320.322-00.194_S	320.32	-0.19	P	0.66	P	0.89

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
176	AGAL321.069-00.514_S	321.07	-0.51	P	0.79	P	0.91
177	AGAL323.801+00.004_S	323.80	0.00	Q	0.80	Q	0.85
178	AGAL326.282-00.592_S	326.28	-0.59	Q	0.64	Q	0.72
179	AGAL326.491+00.882_S	326.49	0.88	Q	0.57	Q	0.78
180	AGAL326.632+00.532_S	326.63	0.53	P	0.76	P	0.87
181	AGAL326.762+00.542_S	326.76	0.54	Q	0.85	Q	0.84
182	AGAL326.789-00.127_S	326.79	-0.13	Q	0.75	Q	0.79
183	AGAL326.932-00.312_S	326.93	-0.31	Q	0.66	Q	0.81
184	AGAL326.954-00.012_S	326.95	-0.01	A	0.80	A	0.73
185	AGAL327.129+00.526_S	327.13	0.53	Q	0.88	Q	0.80
186	AGAL327.231-00.504_S	327.23	-0.50	P	0.56	P	0.60
187	AGAL327.746-00.409_S	327.75	-0.41	Q	0.58	Q	0.60
188	AGAL327.804-00.661_S	327.80	-0.66	Q	0.85	Q	0.80
189	AGAL328.136+00.564_S	328.14	0.56	Q	0.56	Q	0.67
190	AGAL328.208-00.586_S	328.21	-0.59	P	0.74	P	0.80
191	AGAL328.296-00.549_S	328.30	-0.55	A	0.68	A	0.74
192	AGAL328.316-00.564_S	328.32	-0.56	Q	0.58	Q	0.73
193	AGAL328.326-00.544_S	328.33	-0.54	Q	0.55	Q	0.74
194	AGAL328.368-00.559_S	328.37	-0.56	A	0.53	A	0.59
195	AGAL328.371-00.536_S	328.37	-0.54	Q	0.66	Q	0.64
196	AGAL330.001+01.037_A	330.00	1.04	Q	0.77	Q	0.86
197	AGAL330.001+01.037_B	330.00	1.04	Q	0.79	Q	0.84
198	AGAL330.043+00.920_S	330.04	0.92	Q	0.69	Q	0.56
199	AGAL330.369+00.524_S	330.37	0.52	Q	0.60	Q	0.64
200	AGAL330.588+00.006_S	330.59	0.01	Q	0.65	Q	0.63
201	AGAL330.646-00.176_S	330.65	-0.18	Q	0.63	Q	0.75
202	AGAL330.929-00.287_S	330.93	-0.29	A	0.71	A	0.75
203	AGAL330.966-00.207_S	330.97	-0.21	Q	0.88	Q	0.87
204	AGAL330.971-00.154_S	330.97	-0.15	Q	0.53	Q	0.54
205	AGAL330.979-00.192_S	330.98	-0.19	Q	0.62	Q	0.54
206	AGAL331.051-00.419_S	331.05	-0.42	Q	0.66	Q	0.87
207	AGAL331.076-00.179_S	331.08	-0.18	Q	0.63	Q	0.52
208	AGAL331.104-00.227_S	331.10	-0.23	Q	0.80	Q	0.79
209	AGAL331.188-00.462_S	331.19	-0.46	Q	0.59	Q	0.68
210	AGAL331.229-00.226_A	331.23	-0.23	Q	0.64	Q	0.63
211	AGAL331.229-00.226_B	331.23	-0.23	Q	0.62	Q	0.57

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
212	AGAL331.392-00.114_S	331.39	-0.11	Q	0.73	Q	0.74
213	AGAL331.394-00.394_S	331.39	-0.39	Q	0.74	Q	0.69
214	AGAL331.396-00.001_S	331.40	-0.00	Q	0.75	Q	0.80
215	AGAL331.402-00.189_S	331.40	-0.19	Q	0.53	Q	0.52
216	AGAL331.418-00.262_S	331.42	-0.26	Q	0.65	Q	0.74
217	AGAL331.419-00.161_S	331.42	-0.16	Q	0.74	Q	0.80
218	AGAL331.419-00.156_S	331.42	-0.16	Q	0.84	Q	0.82
219	AGAL331.422-00.279_S	331.42	-0.28	Q	0.66	Q	0.68
220	AGAL331.429-00.137_S	331.43	-0.14	Q	0.72	Q	0.74
221	AGAL331.472-00.102_S	331.47	-0.10	Q	0.68	Q	0.81
222	AGAL331.524-00.289_A	331.52	-0.29	Q	0.68	Q	0.72
223	AGAL331.524-00.289_B	331.52	-0.29	Q	0.78	Q	0.75
224	AGAL331.989-00.126_S	331.99	-0.13	Q	0.94	Q	0.90
225	*AGAL332.112+00.926_S	332.11	0.93	Q	0.62	A	0.52
226	AGAL332.129+00.102_A	332.13	0.10	Q	0.71	Q	0.79
227	AGAL332.129+00.102_B	332.13	0.10	Q	0.64	Q	0.77
228	AGAL332.199+00.597_S	332.20	0.60	Q	0.62	Q	0.63
229	AGAL332.571-00.581_S	332.57	-0.58	Q	0.77	Q	0.74
230	AGAL332.751-00.597_S	332.75	-0.60	P	0.83	P	0.93
231	AGAL332.751-00.562_S	332.75	-0.56	P	0.64	P	0.82
232	AGAL332.757-00.466_S	332.76	-0.47	Q	0.80	Q	0.86
233	AGAL332.957-00.011_S	332.96	-0.01	Q	0.85	Q	0.73
234	AGAL332.974-00.411_S	332.97	-0.41	P	0.61	P	0.63
235	AGAL332.976-00.032_S	332.98	-0.03	Q	0.76	Q	0.85
236	AGAL332.980-00.031_S	332.98	-0.03	Q	0.84	Q	0.73
237	AGAL332.989-00.417_S	332.99	-0.42	P	0.67	P	0.83
238	AGAL333.029-00.026_S	333.03	-0.03	P	0.63	P	0.66
239	AGAL333.069+00.056_S	333.07	0.06	Q	0.58	Q	0.62
240	AGAL333.073-00.572_S	333.07	-0.57	Q	0.75	Q	0.77
241	AGAL333.091-00.554_S	333.09	-0.55	Q	0.60	Q	0.86
242	AGAL333.124+00.006_S	333.12	0.01	Q	0.95	Q	0.76
243	AGAL333.391+00.059_A	333.39	0.06	Q	0.91	Q	0.78
244	AGAL333.391+00.059_B	333.39	0.06	Q	0.92	Q	0.78
245	AGAL333.471-00.486_S	333.47	-0.49	A	0.67	A	0.75
246	AGAL333.568+00.029_S	333.57	0.03	A	0.52	A	0.59
247	AGAL333.583+00.089_S	333.58	0.09	Q	0.78	Q	0.79

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
248	AGAL333.711-00.406_S	333.71	-0.41	Q	0.71	Q	0.78
249	AGAL333.711-00.217_S	333.71	-0.22	Q	0.64	Q	0.60
250	AGAL333.991+00.086_S	333.99	0.09	Q	0.55	Q	0.51
251	AGAL334.182+00.044_S	334.18	0.04	Q	0.66	Q	0.70
252	AGAL334.666+00.454_S	334.67	0.45	Q	0.70	Q	0.72
253	AGAL334.668+00.474_S	334.67	0.47	Q	0.79	Q	0.69
254	AGAL334.669+00.441_S	334.67	0.44	Q	0.56	Q	0.68
255	AGAL334.949-00.067_S	334.95	-0.07	Q	0.61	Q	0.55
256	AGAL334.994-00.042_S	334.99	-0.04	Q	0.76	Q	0.80
257	AGAL335.331+00.391_S	335.33	0.39	Q	0.80	Q	0.83
258	AGAL335.364+00.406_S	335.36	0.41	Q	0.86	Q	0.82
259	AGAL335.702-00.819_S	335.70	-0.82	Q	0.56	Q	0.59
260	AGAL335.841-00.097_S	335.84	-0.10	Q	0.92	Q	0.80
261	AGAL336.341-00.164_S	336.34	-0.16	Q	0.70	Q	0.80
262	AGAL336.446-00.219_S	336.45	-0.22	Q	0.76	Q	0.64
263	AGAL336.619+00.211_S	336.62	0.21	H	0.52	H	0.59
264	AGAL336.743+00.107_S	336.74	0.11	P	0.57	P	0.73
265	AGAL336.771+00.047_S	336.77	0.05	P	0.58	P	0.64
266	AGAL336.831+00.131_S	336.83	0.13	Q	0.61	Q	0.57
267	AGAL336.841+00.021_S	336.84	0.02	P	0.81	P	0.79
268	AGAL336.859+00.291_S	336.86	0.29	Q	0.89	Q	0.87
269	AGAL336.958-00.224_S	336.96	-0.22	Q	0.55	Q	0.67
270	AGAL336.964-00.247_S	336.96	-0.25	Q	0.89	Q	0.85
271	AGAL336.969-00.156_S	336.97	-0.16	P	0.59	P	0.83
272	AGAL336.973+00.142_S	336.97	0.14	Q	0.56	Q	0.72
273	AGAL336.976-00.219_S	336.98	-0.22	Q	0.58	Q	0.57
274	AGAL337.141-00.152_S	337.14	-0.15	Q	0.56	Q	0.69
275	AGAL337.152-00.062_S	337.15	-0.06	Q	0.80	Q	0.83
276	AGAL337.176+00.126_S	337.18	0.13	Q	0.70	Q	0.64
277	AGAL337.192-00.037_S	337.19	-0.04	Q	0.72	Q	0.80
278	AGAL337.206-00.074_S	337.21	-0.07	Q	0.75	Q	0.87
279	AGAL337.272-00.071_S	337.27	-0.07	Q	0.78	Q	0.75
280	AGAL337.334-00.111_S	337.33	-0.11	Q	0.68	Q	0.59
281	AGAL337.341-00.141_S	337.34	-0.14	Q	0.84	Q	0.77
282	AGAL337.342-00.119_S	337.34	-0.12	Q	0.78	Q	0.81
283	AGAL337.348-00.159_S	337.35	-0.16	Q	0.68	Q	0.58

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
284	AGAL337.451-00.382_S	337.45	-0.38	A	0.73	A	0.69
285	AGAL337.511+00.091_S	337.51	0.09	Q	0.72	Q	0.76
286	AGAL337.602-00.034_S	337.60	-0.03	A	0.57	A	0.55
287	AGAL337.632+00.144_S	337.63	0.14	Q	0.70	Q	0.58
288	AGAL337.669-00.044_S	337.67	-0.04	Q	0.66	Q	0.69
289	AGAL337.739+00.092_S	337.74	0.09	Q	0.68	Q	0.79
290	*AGAL337.794-00.002_S	337.79	-0.00	Q	0.56	A	0.52
291	AGAL337.942-00.006_S	337.94	-0.01	H	0.61	H	0.59
292	AGAL337.946+00.012_S	337.95	0.01	Q	0.61	Q	0.58
293	AGAL337.987+00.024_S	337.99	0.02	Q	0.51	Q	0.53
294	AGAL338.024-00.019_S	338.02	-0.02	Q	0.86	Q	0.83
295	AGAL338.036-00.042_S	338.04	-0.04	Q	0.64	Q	0.79
296	AGAL338.091-00.191_S	338.09	-0.19	Q	0.62	Q	0.61
297	AGAL338.091-00.149_S	338.09	-0.15	Q	0.50	Q	0.63
298	AGAL338.094-00.011_S	338.09	-0.01	Q	0.88	Q	0.79
299	AGAL338.096-00.001_S	338.10	-0.00	Q	0.51	Q	0.54
300	AGAL338.114+00.006_S	338.11	0.01	Q	0.62	Q	0.53
301	AGAL338.131+00.099_S	338.13	0.10	Q	0.73	Q	0.88
302	AGAL338.147+00.109_S	338.15	0.11	Q	0.75	Q	0.87
303	AGAL338.446-00.006_A	338.45	-0.01	P	0.61	P	0.61
304	AGAL338.446+00.044_A	338.45	0.04	A	0.62	A	0.58
305	AGAL338.552+00.011_A	338.55	0.01	Q	0.61	Q	0.65
306	AGAL338.552+00.011_B	338.55	0.01	Q	0.52	Q	0.64
307	AGAL338.561-00.012_A	338.56	-0.01	Q	0.76	Q	0.81
308	AGAL338.561-00.012_B	338.56	-0.01	Q	0.78	Q	0.79
309	AGAL338.621+00.022_S	338.62	0.02	Q	0.68	Q	0.80
310	AGAL338.786+00.476_S	338.79	0.48	Q	0.92	Q	0.89
311	AGAL338.834+00.479_S	338.83	0.48	Q	0.81	Q	0.71
312	AGAL338.889+00.394_A	338.89	0.39	Q	0.84	Q	0.91
313	AGAL338.889+00.394_B	338.89	0.39	Q	0.87	Q	0.91
314	AGAL338.929-00.081_S	338.93	-0.08	P	0.62	P	0.57
315	AGAL338.949+00.531_S	338.95	0.53	Q	0.75	Q	0.87
316	AGAL339.444+00.092_S	339.44	0.09	Q	0.68	Q	0.55
317	AGAL339.608-00.116_S	339.61	-0.12	Q	0.62	Q	0.73
318	AGAL340.094-00.316_S	340.09	-0.32	A	0.60	A	0.69
319	AGAL340.096-00.022_S	340.10	-0.02	Q	0.59	Q	0.68

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
320	AGAL340.206-00.049_S	340.21	-0.05	Q	0.65	Q	0.76
321	AGAL340.226-00.017_S	340.23	-0.02	Q	0.64	Q	0.69
322	AGAL340.274-00.029_S	340.27	-0.03	Q	0.63	Q	0.59
323	AGAL340.284-00.072_S	340.28	-0.07	Q	0.60	Q	0.64
324	AGAL340.299-00.222_S	340.30	-0.22	A	0.53	A	0.57
325	AGAL340.311+00.557_S	340.31	0.56	Q	0.61	Q	0.67
326	AGAL340.618-00.646_S	340.62	-0.65	Q	0.86	Q	0.81
327	AGAL340.636-00.664_S	340.64	-0.66	Q	0.74	Q	0.78
328	AGAL340.719-00.976_S	340.72	-0.98	Q	0.64	Q	0.66
329	AGAL340.724-00.979_S	340.72	-0.98	Q	0.73	Q	0.77
330	AGAL340.901-00.346_S	340.90	-0.35	Q	0.78	Q	0.77
331	AGAL340.984-00.352_S	340.98	-0.35	Q	0.87	Q	0.81
332	AGAL341.009-00.361_S	341.01	-0.36	Q	0.60	Q	0.73
333	AGAL341.172-00.256_S	341.17	-0.26	Q	0.84	Q	0.86
334	AGAL341.211-00.271_S	341.21	-0.27	Q	0.76	Q	0.86
335	AGAL341.267-00.287_S	341.27	-0.29	Q	0.64	Q	0.84
336	AGAL341.721+00.059_S	341.72	0.06	Q	0.84	Q	0.81
337	AGAL342.156+00.436_S	342.16	0.44	Q	0.90	Q	0.92
338	AGAL342.273+00.489_A	342.27	0.49	Q	0.69	Q	0.75
339	AGAL342.273+00.489_B	342.27	0.49	Q	0.60	Q	0.73
340	AGAL342.916-00.141_S	342.92	-0.14	Q	0.55	Q	0.53
341	AGAL343.498+00.009_S	343.50	0.01	P	0.73	P	0.86
342	AGAL343.522-00.077_S	343.52	-0.08	Q	0.72	Q	0.66
343	AGAL343.877+00.106_S	343.88	0.11	Q	0.88	Q	0.90
344	AGAL344.194-00.617_S	344.19	-0.62	Q	0.74	Q	0.77
345	AGAL344.224-00.674_S	344.22	-0.67	Q	0.82	Q	0.79
346	AGAL344.809-00.632_S	344.81	-0.63	Q	0.64	Q	0.80
347	AGAL345.196-00.744_S	345.20	-0.74	A	0.58	A	0.79
348	AGAL345.389-00.932_S	345.39	-0.93	P	0.54	P	0.70
349	AGAL345.439-00.941_S	345.44	-0.94	H	0.70	H	0.71
350	AGAL345.503-00.032_S	345.50	-0.03	Q	0.65	Q	0.65
351	AGAL345.639-00.006_S	345.64	-0.01	Q	0.84	Q	0.81
352	AGAL346.486+00.146_S	346.49	0.15	Q	0.80	Q	0.80
353	AGAL347.234+00.032_S	347.23	0.03	P	0.54	P	0.62
354	AGAL347.611+00.256_S	347.61	0.26	Q	0.60	Q	0.61
355	AGAL347.627+00.122_S	347.63	0.12	Q	0.55	Q	0.74

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
356	AGAL347.993-00.431_S	347.99	-0.43	Q	0.77	Q	0.57
357	AGAL348.121+00.271_S	348.12	0.27	Q	0.64	Q	0.54
358	AGAL348.148+00.469_S	348.15	0.47	Q	0.65	Q	0.78
359	AGAL348.156+00.506_S	348.16	0.51	Q	0.72	Q	0.75
360	AGAL348.419+00.106_S	348.42	0.11	A	0.52	A	0.56
361	AGAL348.676-01.051_S	348.68	-1.05	P	0.61	P	0.67
362	AGAL348.896+00.111_S	348.90	0.11	Q	0.74	Q	0.84
363	AGAL349.168+00.072_S	349.17	0.07	Q	0.74	Q	0.76
364	AGAL349.812-00.517_S	349.81	-0.52	P	0.70	P	0.69
365	AGAL350.002-00.552_S	350.00	-0.55	Q	0.75	Q	0.87
366	AGAL350.016-00.534_S	350.02	-0.53	Q	0.69	Q	0.77
367	AGAL350.126+00.112_S	350.13	0.11	Q	0.72	Q	0.79
368	AGAL350.154+00.009_S	350.15	0.01	Q	0.83	Q	0.86
369	AGAL350.176+00.036_S	350.18	0.04	Q	0.69	Q	0.81
370	AGAL350.184+00.002_S	350.18	0.00	Q	0.51	Q	0.81
371	AGAL350.354+00.144_S	350.35	0.14	Q	0.68	Q	0.81
372	AGAL350.367+00.189_S	350.37	0.19	Q	0.66	Q	0.83
373	AGAL350.499-00.394_S	350.50	-0.39	Q	0.73	Q	0.77
374	AGAL350.539-00.369_S	350.54	-0.37	Q	0.76	Q	0.79
375	AGAL350.544+00.957_S	350.54	0.96	Q	0.62	Q	0.84
376	AGAL350.566+00.949_S	350.57	0.95	Q	0.78	Q	0.87
377	AGAL350.581+00.367_S	350.58	0.37	Q	0.67	Q	0.83
378	AGAL350.729+00.927_S	350.73	0.93	Q	0.69	Q	0.74
379	AGAL350.736+00.859_S	350.74	0.86	Q	0.53	Q	0.63
380	AGAL350.961+00.741_S	350.96	0.74	Q	0.65	Q	0.66
381	AGAL350.967+00.546_S	350.97	0.55	Q	0.54	Q	0.57
382	AGAL351.018+00.736_S	351.02	0.74	P	0.54	P	0.73
383	AGAL351.141+00.776_S	351.14	0.78	P	0.63	P	0.80
384	AGAL351.159+00.749_S	351.16	0.75	P	0.69	P	0.77
385	AGAL351.173+00.661_S	351.17	0.66	P	0.56	P	0.81
386	AGAL351.308+00.684_S	351.31	0.68	P	0.89	P	0.96
387	AGAL351.353+00.696_S	351.35	0.70	P	0.63	P	0.55
388	AGAL351.414+00.594_S	351.41	0.59	P	0.63	P	0.85
389	AGAL351.456+00.666_S	351.46	0.67	Q	0.60	Q	0.86
390	AGAL351.461+00.644_S	351.46	0.64	Q	0.54	Q	0.65
391	AGAL351.466+00.591_S	351.47	0.59	Q	0.63	Q	0.82

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
392	AGAL351.466+00.682_S	351.47	0.68	Q	0.54	Q	0.87
393	AGAL351.498+00.646_S	351.50	0.65	Q	0.53	Q	0.79
394	AGAL351.766+00.212_S	351.77	0.21	Q	0.77	Q	0.80
395	AGAL351.784+00.212_S	351.78	0.21	Q	0.70	Q	0.58
396	AGAL351.804+00.622_S	351.80	0.62	Q	0.65	Q	0.74
397	AGAL352.113+00.191_S	352.11	0.19	Q	0.74	Q	0.83
398	AGAL352.181-00.154_S	352.18	-0.15	Q	0.88	Q	0.78
399	AGAL352.219-00.087_S	352.22	-0.09	Q	0.59	Q	0.55
400	AGAL352.226-00.171_S	352.23	-0.17	Q	0.52	Q	0.53
401	AGAL352.442-00.182_S	352.44	-0.18	Q	0.74	Q	0.78
402	AGAL352.471+00.794_S	352.47	0.79	Q	0.83	Q	0.86
403	AGAL352.472-00.187_A	352.47	-0.19	Q	0.78	Q	0.77
404	AGAL352.472-00.187_B	352.47	-0.19	Q	0.73	Q	0.77
405	AGAL352.992+00.921_S	352.99	0.92	P	0.86	P	0.92
406	AGAL352.996+00.554_S	353.00	0.55	Q	0.65	Q	0.78
407	AGAL352.999+00.574_S	353.00	0.57	P	0.78	P	0.91
408	AGAL353.019+00.547_S	353.02	0.55	Q	0.62	Q	0.66
409	AGAL353.051+00.446_S	353.05	0.45	P	0.82	P	0.96
410	AGAL353.062+00.406_S	353.06	0.41	P	0.65	P	0.72
411	AGAL353.076+00.441_S	353.08	0.44	Q	0.61	Q	0.66
412	AGAL353.079+00.981_S	353.08	0.98	Q	0.53	Q	0.65
413	AGAL353.121+00.952_S	353.12	0.95	P	0.86	P	0.93
414	AGAL353.127+00.614_S	353.13	0.61	P	0.50	P	0.84
415	AGAL353.142+00.631_S	353.14	0.63	P	0.73	P	0.85
416	AGAL353.149+00.961_S	353.15	0.96	P	0.56	P	0.73
417	AGAL353.229+00.672_S	353.23	0.67	P	0.88	P	0.94
418	AGAL353.292+00.631_S	353.29	0.63	P	0.51	P	0.77
419	AGAL353.296+00.637_S	353.30	0.64	P	0.64	P	0.86
420	AGAL353.309+00.661_S	353.31	0.66	P	0.83	P	0.93
421	AGAL353.354-00.109_A	353.35	-0.11	Q	0.75	Q	0.84
422	AGAL353.354-00.109_B	353.35	-0.11	Q	0.77	Q	0.83
423	AGAL353.429-00.097_A	353.43	-0.10	Q	0.79	Q	0.78
424	AGAL353.429-00.097_B	353.43	-0.10	Q	0.78	Q	0.74
425	AGAL353.556+00.652_S	353.56	0.65	Q	0.70	Q	0.67
426	AGAL354.326+00.466_S	354.33	0.47	Q	0.88	Q	0.92
427	AGAL354.341+00.474_S	354.34	0.47	Q	0.89	Q	0.95

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект	l	b	RF	RF	GB	GB
				Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
428	AGAL354.363+00.476_S	354.36	0.48	Q	0.89	Q	0.96
429	AGAL354.554+00.019_S	354.55	0.02	Q	0.57	Q	0.85
430	AGAL354.659+00.507_S	354.66	0.51	Q	0.82	Q	0.77
431	AGAL354.688+00.544_S	354.69	0.54	Q	0.75	Q	0.76
432	AGAL354.714+00.322_A	354.71	0.32	Q	0.65	Q	0.50
433	AGAL354.714+00.322_B	354.71	0.32	Q	0.69	Q	0.58
434	AGAL354.716+00.554_S	354.72	0.55	Q	0.74	Q	0.65
435	AGAL354.766+00.359_A	354.77	0.36	Q	0.72	Q	0.80
436	AGAL354.766+00.359_B	354.77	0.36	Q	0.74	Q	0.75
437	AGAL354.769+00.394_S	354.77	0.39	Q	0.71	Q	0.80
438	AGAL354.834+00.377_A	354.83	0.38	Q	0.85	Q	0.95
439	AGAL354.834+00.377_B	354.83	0.38	Q	0.86	Q	0.89
440	AGAL354.838+00.372_S	354.84	0.37	Q	0.88	Q	0.96
441	AGAL354.843+00.351_A	354.84	0.35	Q	0.77	Q	0.85
442	AGAL354.843+00.351_B	354.84	0.35	Q	0.63	Q	0.74
443	AGAL354.854+00.341_S	354.85	0.34	Q	0.79	Q	0.88
444	AGAL355.514-00.097_S	355.51	-0.10	Q	0.55	Q	0.80
445	AGAL355.606-00.054_S	355.61	-0.05	Q	0.75	Q	0.83
446	AGAL355.628-00.067_S	355.63	-0.07	Q	0.77	Q	0.86
447	AGAL355.638-00.057_S	355.64	-0.06	Q	0.76	Q	0.69
448	AGAL356.226+00.706_S	356.23	0.71	Q	0.56	Q	0.70
449	AGAL356.367+00.239_S	356.37	0.24	Q	0.79	Q	0.80
450	AGAL358.186-00.012_S	358.19	-0.01	Q	0.74	Q	0.75
451	AGAL358.564-00.797_S	358.56	-0.80	Q	0.75	Q	0.76
452	AGAL358.576-00.191_S	358.58	-0.19	Q	0.61	Q	0.70
453	AGAL358.704-00.101_S	358.70	-0.10	Q	0.66	Q	0.65
454	AGAL358.721-00.109_S	358.72	-0.11	Q	0.56	Q	0.68
455	AGAL358.734-00.116_S	358.73	-0.12	Q	0.73	Q	0.51
456	AGAL358.779-00.117_A	358.78	-0.12	Q	0.84	Q	0.84
457	AGAL358.779-00.117_B	358.78	-0.12	Q	0.90	Q	0.87
458	AGAL358.796-00.136_A	358.80	-0.14	Q	0.81	Q	0.86
459	AGAL358.796-00.136_B	358.80	-0.14	Q	0.89	Q	0.83
460	AGAL358.796-00.102_A	358.80	-0.10	Q	0.54	Q	0.80
461	AGAL358.798-00.117_A	358.80	-0.12	Q	0.79	Q	0.75
462	AGAL358.798-00.117_B	358.80	-0.12	Q	0.87	Q	0.85
463	AGAL358.808-00.131_A	358.81	-0.13	Q	0.91	Q	0.90

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
464	AGAL358.808-00.131_B	358.81	-0.13	Q	0.82	Q	0.91
465	AGAL358.887-00.354_S	358.89	-0.35	Q	0.80	Q	0.82
466	AGAL359.196+00.174_A	359.20	0.17	Q	0.86	Q	0.92
467	AGAL359.196+00.174_B	359.20	0.17	Q	0.85	Q	0.87
468	AGAL359.199+00.171_S	359.20	0.17	Q	0.76	Q	0.83
469	AGAL359.201-00.076_A	359.20	-0.08	Q	0.86	Q	0.97
470	AGAL359.201-00.076_B	359.20	-0.08	Q	0.83	Q	0.90
471	AGAL359.217+00.181_A	359.22	0.18	Q	0.72	Q	0.74
472	AGAL359.217+00.181_B	359.22	0.18	Q	0.58	Q	0.70
473	AGAL359.281-00.079_A	359.28	-0.08	Q	0.79	Q	0.87
474	AGAL359.361-00.009_S	359.36	-0.01	Q	0.78	Q	0.87
475	AGAL359.369-00.029_A	359.37	-0.03	Q	0.72	Q	0.81
476	AGAL359.369-00.029_B	359.37	-0.03	Q	0.54	Q	0.64
477	AGAL359.422+00.024_S	359.42	0.02	Q	0.57	Q	0.59
478	AGAL359.424-00.171_A	359.42	-0.17	Q	0.76	Q	0.89
479	AGAL359.424-00.171_B	359.42	-0.17	Q	0.78	Q	0.89
480	AGAL359.477+00.136_S	359.48	0.14	Q	0.72	Q	0.73
481	AGAL359.482+00.132_S	359.48	0.13	Q	0.93	Q	0.96
482	AGAL359.489-00.214_A	359.49	-0.21	Q	0.84	Q	0.90
483	AGAL359.489-00.214_B	359.49	-0.21	Q	0.82	Q	0.82
484	AGAL359.502+00.116_S	359.50	0.12	Q	0.70	Q	0.59
485	AGAL359.524+00.134_S	359.52	0.13	Q	0.77	Q	0.83
486	AGAL359.536-00.184_S	359.54	-0.18	Q	0.83	Q	0.93
487	AGAL359.566-00.161_A	359.57	-0.16	Q	0.85	Q	0.93
488	AGAL359.566-00.161_B	359.57	-0.16	Q	0.66	Q	0.71
489	AGAL359.572-00.174_A	359.57	-0.17	Q	0.76	Q	0.90
490	AGAL359.572-00.174_B	359.57	-0.17	Q	0.78	Q	0.62
491	AGAL359.597+00.016_A	359.60	0.02	Q	0.68	Q	0.81
492	AGAL359.599-00.221_A	359.60	-0.22	Q	0.50	Q	0.73
493	AGAL359.599-00.221_B	359.60	-0.22	Q	0.66	Q	0.92
494	AGAL359.704-00.036_A	359.70	-0.04	Q	0.64	Q	0.85
495	AGAL359.742+00.031_A	359.74	0.03	Q	0.70	Q	0.88
496	AGAL359.742+00.031_B	359.74	0.03	Q	0.84	Q	0.94
497	AGAL359.764-00.119_S	359.76	-0.12	Q	0.78	Q	0.93
498	AGAL359.887+00.031_A	359.89	0.03	Q	0.56	Q	0.86
499	AGAL359.912-00.129_S	359.91	-0.13	Q	0.79	Q	0.90

Продолжение на следующей странице

Таблица 8 – Продолжение

№	Объект			RF	RF	GB	GB
		l	b	Класс.	Вероят.	Класс.	Вероят.
500	AGAL359.916-00.047_B	359.92	-0.05	P	0.62	P	0.84
501	AGAL359.962+00.129_A	359.96	0.13	Q	0.83	Q	0.88
502	*AGAL359.962+00.129_B	359.96	0.13	Q	0.59	A	0.51
503	AGAL359.972-00.072_S	359.97	-0.07	Q	0.70	Q	0.80
504	AGAL359.989+00.087_S	359.99	0.09	Q	0.84	Q	0.92
505	AGAL359.990+00.107_S	359.99	0.11	Q	0.94	Q	0.94

3.7 Обсуждение

В работе [117] отмечались планы по дальнейшей работой над уточнением классификаций объектов и были высказаны идеи о включение в рассмотрение мазерного излучения. Как было показано в разделе 3.5.2 добавление маркеров мазеров метанола второго класса действительно позволило улучшить разделение кластеров и выделить кластер с преобладающим количеством протозвезд. Помимо этого в работе [128] отмечалось, что средняя температура пыли найдена по данным Herschel, для каждой категории монотонно увеличивается от молекулярных облаков без активного звездообразования к протозвездам и областям II. Однако, добавление этого параметра на кластеризацию не повлияло скорее всего вследствие того, что в данных присутствуют данные по интегральным интенсивностям линий молекул HNC и HCN, а как известно, отношения их интегральных интенсивностей является индикатором температуры пыли и газа в молекулярных облаках. В работе же, использованы алгоритмы машинного обучения t-SNE, которые способны находить скрытые нелинейные зависимости между признаками.

3.8 Резюме Главы 3

В настоящей главе был проведен комплексный анализ классификации и кластеризации молекулярных облаков с различными эволюционными стадиями звездообразования, представленных в каталоге MALT90.

Было показано, что алгоритмы кластеризации способны выделить молекулярные облака с протозвездами и без активного звездообразования лишь на основании интегральных интенсивностей пяти молекул: HCO⁺, HNC, N₂H⁺, HCN и C₂H. Добавление к этим признакам значений ИК-поток на 3.6, 4.5, 8.0 и 24 мкм, включение значений интегральных интенсивностей всех шестнадцати молекул из каталога MALT90 (HCO⁺, HNC, N₂H⁺, HCN, C₂H, H¹³CO⁺, HN¹³C, ¹³CS, ¹³C³⁴S, HC¹³CCN, HNCO, CH₃CN, HC₃N, HNCO, SiO), а также добавление рекомбинационной линии H 41α и бинарных маркеров наличия мазеров CH₃OH класса II

позволило выделить еще один кластер с преобладающей долей областей фотодиссоциации и областями ионизованного водорода. Показано, что во всех кластерах присутствуют все типы молекулярных облаков по каталогу MALT90. Этот результат можно объяснить двумя путями.

Во-первых, изначальная классификация объектов по типам субъективна и была выполнена только по данным ИК-поток, что отмечалось авторами каталога MALT90 в работе [117]. использованы алгоритмы машинного обучения t-SNE, которые способны находить скрытые нелинейные зависимости между признаками. В настоящей же работе использованы алгоритмы кластеризации и машинного обучения t-SNE, которые способны находить 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 четко определенными эволюционными стадиями. Поэтому вполне ожидаемо, что границы между типами объектов размыты.

Для уточнения ранее неопределенных типов облаков применялись методы машинного обучения — Random Forest и Gradient Boosting. Были определены типы более пятисот ранее неисследованных молекулярных облаков, при этом около 80% из них были отнесены к облакам без активного звездообразования. Сравнительный анализ показал высокую согласованность предсказаний двух алгоритмов, при этом различия наблюдались лишь для 6 объектов, преимущественно между протозвездами и областями без активного звездообразования.

Заключение

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

- Показано, что горячие ядра области RCW 120 демонстрируют богатое химическое разнообразие. Получены спектральные карты излучения 50 линий 24 молекул, ранее не наблюдавшиеся в этом объекте. Всего в направлении на горячее ядро RCW 120 S2 обнаружены 78 линий 34 молекул. Обнаружены как простые двухатомные, так и сложные органические молекулы: ^{13}CO , ^{13}CN , ^{33}SO , ^{34}SO , C^{18}O , C^{33}S , C^{34}S , CCH , CH_3CCH , CH_3CN , CH_3OH , CS , DCN , DCO^+ , H^{13}CN , H^{13}CO^+ , H_2^{13}CO , H_2CCO , H_2CN , H_2CO , H_2CS , HC^{15}N , HC_3N , HCOOCH_3 , HDCO , HN^{13}C , HNCO , HSO , OCS , SO , SO_2 , SiO , $\text{c-C}_3\text{H}_2$, H_2S . Построены карты распределения физических параметров молекулярного газа.
- По анализу высокоскоростных крыльев спектральных линий CH_3OH и SiO были построены карты излучения этих молекул в синих и красных скоростях и определены направления биполярных молекулярных истечений, а именно, истечение направлено вдоль луча зрения в горячем ядре RCW 120 S2, но вблизи протозвезды RCW 120 S1 истечение расположено в картинной плоскости.
- Вблизи пяти МЗО в области RCW 120 были определены физические условия в предположении ЛТР с использованием ряда переходов CH_3CN , CH_3CCH , CH_3OH , SiO , SO_2 , OCS , HC_3N , H_2CS и SO . Анализируя данные по CH_3CCH , было обнаружено, что вращательная температура для МЗО S1, S2 и S10 составляет около 40 К. Анализ CH_3CN показывает более высокие значения вращательных температур в направлении на МЗО S1, S2 и S10 до 61 К. МЗО S2 оказывается самой плотной областью. По убыванию вращательных температур молекулы выстраиваются в последовательность CH_3CN , OCS , SO_2 , CH_3CCH , HC_3N , H_2CS , SO , SiO образуя структуру, напоминающую луковницу. Определив лучевые концентрации молекул, было обнаружено, что

в южной части плотного сгустка содержание метанола превышает содержание в северной части при сравнимых содержаниях других сложных молекул, таких, например, как CH_3CN и CH_3CCH . Кроме того, содержание метанола повышено и относительно других молекул, содержащих кислород, например: SO , OCS .

- Модель Presta воспроизводит наблюдаемые обилия CH_3CCH и CH_3OH 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 ускоряется десорбция метанола, при этом молекулы, попадая в газ, выживают и не разрушаются УФ-излучением, как это происходит уже при $A_V \sim 2^m$.
- 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, а вторая в пылевых мантиях, например, CCH и CH_3OH . Слабая корреляция между метанолом и другими кислородсодержащими молекулами (SO , OCS , 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 , N_2H^+ , HCN , HNC , HCO^+ и CH_3OH в молекулярных облаках из каталога MALT90 выделены три устойчивых кластера объектов: (1) протозвезды, (2) НП-области и ФДО и (3) облака без активного звездообразования. Показано, что деление на кластеры не зависит от потоков в дальнем ИК-диапазоне, что говорит об астрохимической схожести молекулярных облаков разных масс.
- Для уточнения ранее неопределенных типов облаков из каталога MALT90 применялись методы машинного обучения — классификаторы Random Forest и Gradient Boosting. Были определены типы более пятисот ранее неисследованных молекулярных облаков, при этом около 80% из них были отнесены к облакам без активного звездообразования.

В заключении стоит отметить перспективные направления для дальнейшего развития работы.

На сегодняшний день все больший интерес представляют мультиволновые исследования. Поскольку разные диапазоны длин волн отражают различные физические и химические процессы в молекулярных облаках. Так, в миллиметровом и

субмиллиметровом диапазоне (ALMA, NOEMA) регистрируются линии метанола, метилцианида, и других органических молекул, что дает возможность проследить 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/разрушения. В дальнем инфракрасном диапазоне (Herschel) регистрируется непрерывное излучение пыли, по которому определяется распределение температуры и плотности, а также выделяются компактные области, связанные с протозвездами.

Дополнительную информацию предоставляют ультрафиолетовые и рентгеновские данные. Спектр-УФ сможет наблюдать линии высоко-ионизованных элементов (например, C IV, Si IV), которые коррелируют со скоростью аккреции массы на протозвезды. Эти линии отражают кинематику аккреции вещества на протозвезду и позволяют оценить темп аккреции, что недоступно в других диапазонах длин волн. В свою очередь, рентгеновские данные позволяют более эффективно находить области звездообразования. Например, карты обсерватории Chandra обычно содержат около 10% загрязнения звездами поля, в то время как на многих картах ближнего или среднего инфракрасного диапазона оно превышает 10-кратное. Это связано с тем, что магнитная активность звезд солнечного типа, ответственных за рентгеновские вспышки, высока на протяжении всех стадий эволюции до выхода на главную последовательность, однако в дальнейшем уменьшается примерно в 100 раз в течение первого миллиарда лет. Таким образом, рентгеновские наблюдения позволяют выделять молодые звездные объекты на фоне поля и исследовать процессы звездообразования в различных условиях, включая сценарии триггерного звездообразования на периферии расширяющихся оболочек H 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, которые могут 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 искусственного интеллекта откроет новые возможности для построения обобщенной 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 за теплую атмосферу сотрудничества, особенно на начальном этапе работы диссертанта. Автор благодарит коллег и друзей из ИНАСАН за полезные дискуссии и атмосферу дружеского взаимодействия.

Автор искренне благодарит своих родных и близких за веру на всём протяжении работы над диссертацией. Наконец, особая благодарность супругу соискателя, Плакитину И. Д., чье понимание и поддержка, стали опорой и источником вдохновения на протяжении всего периода проведения исследований.

Литература

- [1] *Zinnecker H., Yorke H. W.* Toward Understanding Massive Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45, № 1. — P. 481–563. [0707.1279](#).
- [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. [1704.08115](#).
- [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. [2105.03554](#).
- [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. [2303.05630](#).
- [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] *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. [1005.1615](#).
- [19] *Kirsanova M. S., Salii 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. [2102.09145](#).
- [20] *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. [1611.03587](#).

- [21] *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.
- [22] *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.
- [23] *Elmegreen B. G., Lada C. J.* Sequential formation of subgroups in OB associations. // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.
- [24] *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. [1407.2048](#).
- [25] *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. [1609.00650](#).
- [26] *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.
- [27] *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.
- [28] *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. [2205.01735](#).
- [29] *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 // *arXiv e-prints*. — 2023. — P. arXiv:2302.07853. [2302.07853](#).
- [30] *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. [1502.05865](#).
- [31] *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. [1611.04037](#).

- [32] *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. [1710.07288](#).
- [33] *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. [2108.05387](#).
- [34] *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. [0905.3822](#).
- [35] *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. [2108.08484](#).
- [36] *Deng Y., Zhang Z.-Y., Zhou P. et al.* Multiple gas phases in supernova remnant IC 443: mapping shocked H₂ with VLT/KMOS // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2023. — Vol. 518, № 2. — P. 2320–2340. [2210.16909](#).
- [37] *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. [2306.12264](#).
- [38] *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. [astro-ph/9812083](#).
- [39] *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. [0902.0903](#).
- [40] *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. [1612.08862](#).
- [41] *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. [1412.6470](#).
- [42] *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. [1908.05394](#).

- [43] *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. [2004.05604](#).
- [44] *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. [2005.08810](#).
- [45] *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. [2212.08702](#).
- [46] *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.
- [47] *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.
- [48] *Russeil D.* Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 397. — P. 133–146.
- [49] *Astropy Collaboration, Robitaille T. P., Tollerud E. J. et al.* Astropy: A community Python package for astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 558. — P. A33. [1307.6212](#).
- [50] *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. [1801.02634](#).
- [51] *Robitaille T., Bressert E.* APLpy: Astronomical Plotting Library in Python. — Astrophysics Source Code Library. — 2012. [1208.017](#).
- [52] *Robitaille T.* APLpy v2.0: The Astronomical Plotting Library in Python. — 2019.
- [53] *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. [1310.1131](#).
- [54] *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. [1305.3471](#).

- [55] *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. [1212.0473](#).
- [56] *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.
- [57] *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. [1611.04037](#).
- [58] *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.
- [59] *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. [1701.00962](#).
- [60] *Gratier P., Pety J., Bron E. et al.* Quantitative inference of the H₂ column densities from 3 mm molecular emission: case study towards Orion B // *Astron. Astrophys.* — 2021. — Vol. 645. — P. A27. [2008.13417](#).
- [61] *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. [2007.06568](#).
- [62] *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. [2212.04993](#).
- [63] *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. [astro-ph/0501339](#).
- [64] *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. [2202.00425](#).
- [65] *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.

- [66] *Watanabe N., Kouchi A.* Efficient Formation of Formaldehyde and Methanol by the Addition of Hydrogen Atoms to CO in H₂O-CO Ice at 10 K // *Astrophys. J., Lett.* — 2002. — Vol. 571, № 2. — P. L173–L176.
- [67] *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.
- [68] *Punanova A., Vasyunin A., Caselli P. et al.* Methanol Mapping in Cold Cores: Testing Model Predictions // *Astrophys. J.* — 2022. — Vol. 927, № 2. — P. 213. [2112.04538](#).
- [69] *Agúndez M., Cabezas C., Tercero B. et al.* Discovery of the propargyl radical (CH₂CCH) 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. [2103.03807](#).
- [70] *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. [2309.07341](#).
- [71] *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. [2102.02225](#).
- [72] *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 // *Astron. Astrophys.* — 2022. — Vol. 659. — P. A36. [2112.11336](#).
- [73] *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.
- [74] *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. [1703.08485](#).
- [75] *Andron I., Gratier P., Majumdar L. et al.* Methyl cyanide (CH₃CN) and propyne (CH₃CCH) in the low-mass protostar IRAS 16293-2422 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2018. — Vol. 481, № 4. — P. 5651–5659. [1812.05416](#).
- [76] *Calcutt H., Willis E. R., Jørgensen J. K. et al.* The ALMA-PILS survey: propyne (CH₃CCH) in IRAS 16293-2422 // *Astron. Astrophys.* — 2019. — Vol. 631. — P. A137. [1909.13329](#).

- [77] *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. [2207.03537](#).
- [78] *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.
- [79] *Burrell P. M., Bjarnov E., Schwendeman R. H.* Investigation of the ν_5 band of methylacetylene by infrared laser Stark and microwave spectroscopy // *Journal of Molecular Spectroscopy.* — 1980. — Vol. 82, № 1. — P. 193–201.
- [80] *Gadhi J., Lahrouni A., Legrand J., Demaison J.* Moment dipolaire de CH₃CN // *Journal de Chimie Physique.* — 1995. — Vol. 92. — P. 1984–1992.
- [81] *Goldsmith P. F., Langer W. D.* Population Diagram Analysis of Molecular Line Emission // *Astrophys. J.* — 1999. — Vol. 517, № 1. — P. 209–225.
- [82] *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.
- [83] *Mangum J. G., Shirley Y. L.* How to Calculate Molecular Column Density // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 2015. — Vol. 127, № 949. — P. 266. [1501.01703](#).
- [84] *Wilson T. L.* Isotopes in the interstellar medium and circumstellar envelopes // *Reports on Progress in Physics.* — 1999. — Vol. 62, № 2. — P. 143–185.
- [85] *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.
- [86] *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.
- [87] *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.
- [88] *Semenov D., Wiebe D.* Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 2011. — Vol. 196, № 2. — P. 25. [1104.4358](#).

- [89] *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. [1902.07475](#).
- [90] *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. [1604.05911](#).
- [91] *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. [0903.1369](#).
- [92] *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. [1012.3488](#).
- [93] *Lilley A. E.* The Association of Gas and Dust from 21-CM Hydrogen Radio Observations. // *Astrophys. J.* — 1955. — Vol. 121. — P. 559.
- [94] *Bohlin R. C., Savage B. D., Drake J. F.* A survey of interstellar H I from L α absorption measurements. II. // *Astrophys. J.* — 1978. — Vol. 224. — P. 132–142.
- [95] *Draine B. T.* On Radiation Pressure in Static, Dusty H II Regions // *Astrophys. J.* — 2011. — Vol. 732, № 2. — P. 100. [1003.0474](#).
- [96] *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. [1502.06865](#).
- [97] *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. [1705.00269](#).
- [98] *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. [2310.03277](#).
- [99] *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.

- [100] *Harsono D., Bruderer S., van Dishoeck E. F.* Volatile snowlines in embedded disks around low-mass protostars // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 582. — P. A41. [1507.07480](#).
- [101] *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. [1807.11860](#).
- [102] *Kochina O. V., Wiebe D. S.* Methyl Formate Synthesis Pathways at Various Star Formation Stages // *Astronomy Letters.* — 2024. — Vol. 50, № 1. — P. 70–80.
- [103] *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. [0803.1805](#).
- [104] *Sakai N., Yamamoto S.* Warm Carbon-Chain Chemistry // *Chemical Reviews.* — 2013. — Vol. 113, № 12. — P. 8981–9015.
- [105] *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. [astro-ph/0502214](#).
- [106] *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. [astro-ph/0603071](#).
- [107] *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. [1507.05642](#).
- [108] *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. [1401.5179](#).
- [109] *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. [1203.5492](#).
- [110] *Öberg K. I., Bergin E. A.* Astrochemistry and compositions of planetary systems // *Phys. Rep.* — 2021. — Vol. 893. — P. 1–48. [2010.03529](#).

- [111] *Santos J. C., van Gelder M. L., Nazari P. et al.* SO₂ and OCS toward high-mass protostars: A comparative study of ice and gas // *Astron. Astrophys.* — 2024. — Vol. 689. — P. A248. [2407.14711](#).
- [112] *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.
- [113] *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.
- [114] *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.
- [115] *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.
- [116] *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. [2412.19934](#).
- [117] *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.
- [118] *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.
- [119] *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.
- [120] *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.
- [121] *Jolliffe I. T.* Principal component analysis for special types of data. — Springer, 2002.

- [122] *Maaten L. v. d., Hinton G.* Visualizing data using t-SNE // Journal of machine learning research. — 2008. — Vol. 9, № Nov. — P. 2579–2605.
- [123] *Breiman L.* Random forests // Machine learning. — 2001. — Vol. 45. — P. 5–32.
- [124] *Friedman J. H.* Greedy function approximation: a gradient boosting machine // Annals of statistics. — 2001. — P. 1189–1232.
- [125] *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.
- [126] *Carey S., Noriega-Crespo A., Mizuno D. et al.* MIPS GAL: A Survey of the Inner Galactic Plane at 24 and 70 μm // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2009. — Vol. 121, № 875. — P. 76.
- [127] *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.
- [128] *Guzmán A. E., Sanhueza P., Contreras Y. et al.* Far-infrared Dust Temperatures and Column Densities of the MALT90 Molecular Clump Sample // The Astrophysical Journal. — 2015. — Vol. 815, № 2. — P. 130.