

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ОБЗОР ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ DR21OH В 4-мм ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

© 2023 г. С. В. Каленский^{1,*}, Е. А. Михеева^{1,2}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
Астрокосмический центр, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: kalensky@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 02.08.2023 г.

После доработки 12.09.2023 г.

Принята к публикации 19.09.2023 г.

Представлены результаты обзора спектральных линий области звездообразования DR21OH в 4-мм диапазоне длин волн. Было обнаружено 69 молекул и их изотопологов, от простых двухатомных или трехатомных молекул, таких как SO, SiO и CCH, до сложных органических молекул, таких как CH₃OSHO или CH₃OCH₃. Заметная часть полученных результатов качественно повторяет результаты обзора этого же источника на волне 3 мм. Списки молекул, обнаруженных на волнах 3 и 4 мм, в значительной степени пересекаются. Однако на волне 4 мм были обнаружены молекулы, которые не обладают разрешенными переходами в 3-мм диапазоне, например, DCN, DNC или SO⁺. Основную часть молекул, найденных на волне 4 мм, составляют те, которые часто наблюдаются в плотных ядрах областей звездообразования, например, HC₃N или CH₃CCH, однако некоторые обнаруженные молекулы характерны для горячих ядер. К последним относятся сложные органические молекулы CH₃OSHO, CH₃CH₂OH, CH₃OCH₃ и др. Однако излучение этих молекул, зарегистрированное в данном обзоре, вероятно, возникает в газе, имеющем температуру ~30 К. Девять молекул, в том числе сложные соединения CH₃C₃N, CH₃CH₂CN, CH₃COCH₃ и др., найдены с помощью сложения спектральных линий. Это демонстрирует большие возможности данного метода при исследовании молекулярных облаков.

Ключевые слова: спектры, области звездообразования, молекулярные облака, радиоволны, сложные органические молекулы

DOI: 10.31857/S0004629923120034, **EDN:** DAVJRY

1. ВВЕДЕНИЕ

Область образования звезд большой массы DR21OH расположена в гигантском молекулярном облаке в комплексе Cygnus X. Расстояние до комплекса, полученное при помощи измерений тригонометрических параллаксов мазеров H₂O и CH₃OH, составляет 1.4 кпк [1]. DR21OH является частью массивного плотного облака длиной около 4 пк, вытянутого в направлении север-юг [2, 3]. В облаке расположена цепочка молодых звездных объектов (МЗО), также вытянутая в направлении север-юг. Помимо DR21OH, в состав этой цепочки МЗО входит мощный источник радиоcontinuum — яркая H II зона DR21, по названию которой все облако также называют DR21 [2], а также ИК-источники W75S—FIR1, W75S—FIR2, W75S—FIR3. Боллометрическая светимость области DR21OH составляет порядка $5 \times 10^4 L_{\odot}$ [4], а пол-

ная масса — около $10^4 M_{\odot}$ ($L_{\odot}$ и $M_{\odot}$ — светимость и масса Солнца соответственно).

Область находится на расстоянии трех угловых минут к северу от H II-зоны DR21 и состоит из четырех основных облаков, обозначенных DR21OH Main (DR21OH—M), DR21OH North (DR21OH—N), DR21OH West (DR21OH—W) и DR21OH South (DR21OH—S), окруженных молекулярным газом с клочкообразной структурой [5, 6]. Облако DR21OH M, в свою очередь, состоит из двух плотных ядер, MM1 и MM2, максимумы излучения которых расположены на расстоянии 8" в направлении “северо-восток” — “юго-запад”. Эти ядра наблюдаются как в молекулярных линиях, так и в континууме в миллиметровом, субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах [5, 6]. Запата и др. [8] с помощью интерферометрической решетки SMA провели наблюдения DR21OH—M на

волне 1.4 мм и разделили MM1 и MM2 на девять более компактных сгустков, обозначенных SMA1–SMA9. Основные физические параметры ядер MM1 и MM2 были определены Мангумом и др. [5]. Болометрическая светимость ядра MM1 составляет $1.7 \times 10^4 L_{\odot}$, масса – $350 M_{\odot}$, температура пыли – 58 К. Верхний предел на болометрическую светимость MM2 составляет $1.3 \times 10^4 L_{\odot}$; масса MM2 – $570 M_{\odot}$; температура пыли – 30 К. Системная скорость DR21OH–М составляет примерно –3 км/с, однако в направлении этого облака наблюдаются спектральные детали, имеющие радиальную скорость относительно местного стандарта покоя около 9 км/с. Эти детали возникают в облаке, которое, вероятно, сталкивается с облаком DR21 [9, 10]. Согласно Мангуму и др. [6], лучевые скорости ядра MM1 и нескольких окрестных сгустков близки к системной скорости и попадают в интервал от –4.4 км/с до –2.2 км/с, а скорости ядра MM2 и остальных сгустков – в интервал от 0 км/с до –1 км/с. Однако, согласно спектрам, приведенным в работе [11], в направлении горячего ядра MM1b (см. следующий раздел) линии ^{34}SO , HC_3N и некоторых других молекул имеют максимумы на скорости около 0 км/с.

Признаком активного звездообразования в DR21OH–М является существование сильных мазеров OH, H_2O и CH_3OH [12–14]. Кроме того, в этой области наблюдаются биполярные истечения вещества в линиях CO, CS, SiO, H_2CO , H_2CS [8, 15, 16]. Однако, несмотря на множество признаков активно идущего процесса образования звезд большой массы, в DR21OH–М не обнаружены компактные H II-зоны, а горячие ядра, найденные Мином и др. [11] в направлении MM1 и обозначенные MM1a и MM1b, не столь ярко выражены, как горячие ядра в таких источниках, как Sgr B2, W51e1/e2, G34.26+0.15 и др. Эти факты указывают на то, что протозвезды в DR21OH–М находятся на ранних стадиях эволюции. Тем не менее и в данном источнике можно искать сложные органические молекулы (COM), которые поступают в газовую фазу за счет различных механизмов нетепловой десорбции, а также за счет испарения мантий пылинок в горячем газе за фронтами ударных волн, возникающих под воздействием высокоскоростных истечений вещества.

Спектральный обзор DR21OH в 3-мм диапазоне длин волн был проведен Каленским и Юхансоном [17] на 20-м радиотелескопе в Онсале (Швеция). В диаграмму направленности телескопа попадала область DR21OH М целиком. Обнаружены линии 78 молекул, большинство из которых типичны для плотных облаков. Вращательные температуры большинства обнаруженных

молекул составляют порядка 20–30 К, однако вращательная температура SO_2 оказалась равной 186 К. Еще более высокая вращательная температура, 252 К, получена по линиям метанола с энергией верхнего уровня выше 100 К. Среди найденных молекул есть и некоторые COM – кислородсодержащие CH_3OH , CH_3OCHO , CH_3OCH_3 , азотсодержащие CH_3CN , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ и др.

Обнаружение этих молекул показывает, что DR21OH перспективен с точки зрения поиска сложной органики. Однако ряд важных для астрохимии молекул не имеет разрешенных переходов в 3-мм диапазоне длин волн и их надо искать в других диапазонах. Некоторые молекулы – CH_2NH , DC_3N , HCCN – были найдены на волне 3 мм лишь предположительно, и их обнаружение необходимо подтвердить или опровергнуть. Поэтому, когда в Онсальской обсерватории был введен в строй приемник 4-мм диапазона длин волн, мы провели спектральный обзор DR21OH и в этом диапазоне.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проведены в апреле и мае 2018 г. на 20-м радиотелескопе миллиметрового диапазона в Онсале (Швеция) параллельно со спектральным обзором области звездообразования W51e1/e2 (проект O2017b-04) и подробно описаны в статье [18]. Диапазон обзора составлял 68–88 ГГц. Использовался режим двойной диаграммной модуляции с разнесением лучей на $11'$ по азимуту. Ширина главного луча диаграммы направленности по уровню половинной интенсивности (HPBW) на частоте 86 ГГц составляла $43''$. Антенна наводилась на ядро MM1 (R.A.(J2000) = $20^{\text{h}}39^{\text{m}}01.1^{\text{s}}$, DEC(J2000) = $42^{\circ}22'48''$). При этом все облако DR21OH–М попадало в диаграмму направленности. Ошибки наведения проверялись по наблюдениям мазеров SiO на частоте 86 ГГц и не превышали $5''$. Данные были откалиброваны с помощью метода прерывателя (chopper-wheel method). Шумовая температура системы в основном менялась в пределах ~ 200 – 500 К, но в последних циклах наблюдений она составляла ~ 300 – 1200 К. К выходу приемника подключался спектрометр на основе быстрого преобразования Фурье, состоящий из четырех секций, по две секции на каждую плоскость поляризации. Полная полоса анализа составляла 4 ГГц. Разрешение по частоте – 76.294 кГц, что соответствует разрешению по скорости 0.28 км/с на частоте 83 ГГц. В процессе обработки разрешение сглаживалось до 0.305 МГц (1.1 км/с на частоте 83 ГГц). Для 75% диапазона обзора шумы на уровне 1σ не превышали 0.003 К, слегка повышаясь (до 0.006 К) к краям диапазона.

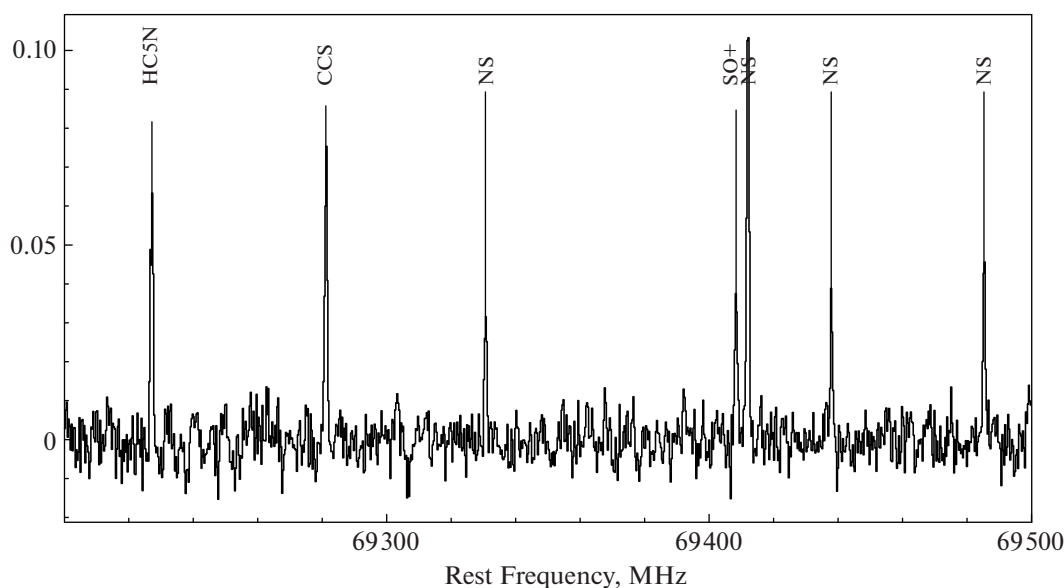


Рис. 1. Спектр DR21OH в диапазоне частот 69 200–69 500 МГц. Полностью наблюдавшийся спектр показан на рис. 5 в приложении.

Этот проект послужил в качестве тестового для новой системы Bifrost, которая управляет наблюдениями в автоматическом режиме.

Данные были обработаны с помощью специализированного пакета программ Гренобльской обсерватории CLASS¹ с использованием расширения WEEDS.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Получен спектр источника в диапазоне частот 68–88 ГГц. Частично он воспроизведен на рис. 1, а полностью — на рис. 5. Обнаружено множество радиолиний различных молекул. Первичная идентификация обнаруженных линий проводилась с использованием базы данных молекулярных радиолиний [19], обнаруженных в космосе². Однако некоторые обнаруженные линии в этой базе данных отсутствовали. Часть этих линий была найдена ранее и идентифицирована Каленским и др. [18]. Для идентификации остальных были использованы каталоги спектральных линий CDMS [20, 21] и JPL [22]. Восемь линий идентифицировать не удалось.

Практически все обнаруженные тепловые линии имеют максимумы на скорости около –3 км/с. Линий с максимумами вблизи 9 км/с обнаружить не удалось. Линии H₂CO на частоте 72837.948 МГц и HC₃N на частоте 85201.346 МГц имеют негауссову форму и были аппроксимиро-

ваны двумя компонентами каждая, причем лучевые скорости более сильных компонентов находятся вблизи системной скорости, а скорости более слабых компонентов — вблизи значения –1 км/с. Возможно, остальные линии этих и некоторых других молекул также являются двойными, однако достигнутое соотношение сигнал/шум не позволяет разделить их на составляющие.

На частоте 80 578.283 МГц обнаружена линия HDO 1_{1,0}–1_{1,1}, у которой лучевая скорость в максимуме составляет 0.066 км/с. Однако идентификацию линии нельзя считать надежной, так как обнаружена всего одна линия этой молекулы. Для проверки идентификации лучше всего пронаблюдать линию HDO 2_{1,1}–2_{1,2} на частоте 241 561.550 МГц.

Лучевая скорость линии $N, J = 2, 2 - 1, 1$ ³⁴SO составляет –0.92 км/с, однако ширина этой линии очень велика (9.28 км/с). Вероятно, она blendируется с какой-нибудь неотожествленной линией, и приведенные в таблицах параметры относятся ко всей бленде.

Таким образом, по нашим данным разделить вклады различных источников не представляется возможным. Можно лишь сделать вывод, что большая часть обнаруженного излучения возникает в ядре MM1 и/или других объектах, у которых лучевые скорости близки к системной. Для того, чтобы выделить вклады отдельных ядер, надо пронаблюдать DR21OH с высоким пространственным разрешением.

¹ <https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>

² <http://physics.nist.gov/restfreq>

Таблица 1. Молекулы, обнаруженные в результате обзора

Тип молекул	Название молекул
Двухатомные	NS, SiO, ²⁹ SiO, ³⁰ SiO, ³⁰ Si ¹⁸ O?, ³⁴ SO, SO, SO ⁺
Трехатомные	CCH, ¹³ CCH, C ¹³ CH, CCD, CCS, DCO ⁺ , DCN, DNC, HCO, HDO?, HNO, HC ¹⁸ O ⁺ , HC ¹⁷ O ⁺ , HCS ⁺ , H ¹³ CN, HC ¹⁵ N, H ¹³ CO ⁺ , N ₂ O, N ₂ D ⁺ , OCS, O ¹³ CS?, OC³⁴S? , SO ₂
Четырехатомные	l-C ₃ H, C₃S? , H ₂ CO, H ₂ ¹³ CO, H ₂ CS, HOCO ⁺ , HOCN?, D ₂ CS, NH ₂ D
Пятиатомные	c-C ₃ H ₂ , l-C ₃ H ₂ , C ₄ H, CH ₂ CO, CH ₂ CN, DC ₃ N, H ¹³ CCCN, HC ¹³ CCN, HCC ¹³ CN, t-HCOOH, HC ₃ N
Шестиатомные	CH ₃ CN, CH ₃ OH, ¹³CH₃OH , CH ₃ SH, NH ₂ CHO
Семиатомные	CH ₃ CCH, CH ₃ CHO, CH ₂ CHCN, CH₃NH₂ , HC ₅ N
Восьмиатомные	CH ₃ OCHO, C₂H₃CHO , CH₃C₃N ,
Девятиатомные	C ₂ H ₅ OH, CH ₃ OCH ₃ , CH₃CH₂CN , CH₃C₄H?
Десятиатомные	CH₃COCH₃

Примечание. Жирным шрифтом отмечены названия молекул, обнаруженных с помощью сложения спектральных линий. Вопросительным знаком — молекулы, обнаружение которых нельзя считать надежным.

Всего на волне 4 мм найдено 69 молекул и их изотопических разновидностей, начиная от простых двух- и трехатомных молекул, таких как SO, SiO, CCH, до сложных органических соединений, CH₃CN, CH₃OCH₃ или CH₃CH₂OH. Список обнаруженных молекул приведен в табл. 1; молекулы, найденные с помощью сложения спектральных линий (см. раздел 4), выделены жирным шрифтом.

Значительная часть полученных результатов качественно повторяет результаты обзора на волне 3 мм. Списки молекул, обнаруженных на волнах 3 и 4 мм, в большой степени пересекаются. Основную часть составляют молекулы, которые часто наблюдаются в плотных ядрах областей звездообразования, такие, как HC₃N, SO, OCS и т.д. Однако заметную долю всех обнаруженных молекул составляют те, которые характерны для горячих ядер. В частности, зарегистрировано излучение СОМ, например, CH₃OCHO, CH₃OCH₃, CH₃CH₂OH, CH₃COCH₃, которые, по современным представлениям, образуются в ледяных мантиях пылинок и поступают в газовую фазу при испарении мантий в горячих ядрах или их разрушении ударными волнами. Однако хорошо известно, что метанол, который также образуется в мантиях пылинок, наблюдается и в плотных ядрах, и даже в холодных облаках. Все зарегистрированные нами линии обнаруженных СОМ (кроме некоторых линий метанола) возникают при переходах между уровнями с энергией возбуждения меньше 100 К. Поэтому возможно, что зарегистрированное излучение возникает в плотных ядрах, а не в горячих областях (см. обсуждение в разделе 3.1).

Кроме линий нейтральных молекул, обнаружены линии различных молекулярных ионов — HC¹⁸O⁺, HC¹⁷O⁺, H¹³CO⁺, DCO⁺ и др. Эти ионы, наряду с диффузными облаками, часто присутствуют в плотных облаках с большим поглощением в видимой области спектра, где первичными источниками ионизации служат космические лучи и рентгеновское излучение протозвезд (см. [23] и ссылки в этой статье).

Найдены несколько дейтерированных соединений, в том числе дейтерированный цианоацетилен DC₃N, который был лишь предположительно найден на волне 3 мм. Обнаружение двух других молекул, предположительно также найденных на 3 мм, CH₂NH и HCCN, подтверждено не было.

3.1. Вращательные диаграммы

Вращательные диаграммы (ВД) являются широко распространенным методом оценки температуры межзвездного газа и описаны в большом числе работ (см., напр., [24]). Если обнаружено несколько оптически тонких линий одной и той же молекулы, то можно оценить лучевые концентрации молекулы на верхних уровнях этих линий, деленные на статистические веса уровней (N_u/g_u). При условии локального термодинамического равновесия (ЛТР) точки на графике зависимости $\log(N_u/g_u)$ от величины E_u/k , где E_u — энергия верхнего уровня, k — постоянная Больцмана, ложатся на прямую, тангенс угла наклона которой обратно пропорционален температуре. Эту температуру называют вращательной температурой (T_{rot}). Так как в молекулярных облаках ЛТР, если существует, достигается за счет столк-

новений с молекулами H_2 , вращательная температура нередко оказывается близкой к кинетической. Точка пересечения с осью Y дает возможность оценить лучевую концентрацию молекулы.

Мы построили ВД для каждой молекулы с четырьмя или более обнаруженными одиночными спектральными линиями³. Эти диаграммы показаны на рис. 2, а вычисленные параметры с их погрешностями представлены в табл. 2. ВД для четырех молекул (CH_3CCH , CH_3CN , HC_5N и CH_2CO) демонстрируют слабый разброс точек относительно аппроксимирующих прямых; при этом значения вращательной температуры попадают в узкий интервал, 27–42 К, что соответствует оценкам кинетической температуры ядра ММ2 (32 К), а также всех остальных ядер в DR21ОН, кроме ММ1, полученным Мангумом и др. [6] по наблюдениям линий аммиака. Так как молекулы типа симметричного волчка CH_3CCH и CH_3CN являются хорошими “термометрами” межзвездного газа [25, 26], мы считаем, что температура основной массы газа в протяженных облаках DR21ОН составляет порядка 30–40 К.

Вращательная диаграмма для метанола показывает существование двух компонентов. Первый из них образуют линии со значениями $E_u/k < 100$ К (низкоэнергетический компонент), а второй — линии со значениями $E_u/k > 100$ К (высокоэнергетический компонент). Низкоэнергетический компонент аппроксимируется прямой, соответствующей $T_{rot} = 19$ К, а высокоэнергетический — прямой, соответствующей $T_{rot} = 298$ К. Естественно интерпретировать эту диаграмму таким образом, что низкоэнергетические линии возникают в холодных областях, а высокоэнергетические — в горячих. Такая интерпретация согласуется с результатами интерферометрических наблюдений Мина и др. [11] и Ороско-Агилеры и др. [16] на антенной решетке SMA, которые показали, что излучение в линиях метанола возникает в горячих ядрах ММ1а и ММ1б, а также в крыльях биполярного истечения вещества к югу от ММ1, вытянутого в направлении запад-восток на расстояние примерно 24", что при расстоянии до источника 1.4 кпк соответствует проекции расстояния на картинную плоскость 0.15 пк. Низкоэнергетические линии, которые для своего возникновения не требуют высоких температур, вероятно, возникают в обеих этих областях; возможно, существует также более протяженное излучение, отфильтрованное интерферометром. Высокоэнергетические линии могут воз-

Таблица 2. Вращательные температуры и лучевые концентрации молекул, полученные с помощью вращательных диаграмм. В скобках приведены погрешности на уровне 1σ

Молекула	T_{rot} , К	N_{mol} , 10^{13} см^{-2}	$N_{mol}/N_{H_2}^*$, 10^{-10}
C_4H	8.9 (0.8)	15 (3.0)	5 (1)
c- C_3H_2	7.1 (0.9)	1.3 (0.53)	0.4 (0.2)
CCS	11.4 (2.0)	0.73 (0.28)	0.2 (0.1)
CH_3CCH	35.6 (3.9)	66 (9.4)	22 (3)
HC_5N	28.7 (1.6)	0.68 (0.08)	0.2 (0.02)
CH_3CN	31.3 (1.6)	2.5 (0.18)	0.8 (0.06)
CH_3CHO	9.7 (2.2)	2.5 (0.86)	0.8 (0.3)
CH_3OH	19 (4)	110 (100)	37 (33)
CH_3OH^{**}	298 (196)	170 (170)	—
CH_2CO	46.1 (3.8)	4.5 (0.35)	1.5 (0.1)
SO_2	49.4 (7.4)	21 (4.1)	—

Примечание. * $N_{H_2} = 3 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$ (см. раздел 3.2). ** — обилие не приведено, т.к. размеры горячей области и лучевая концентрация водорода в ней неизвестны.

никать в газе с температурой порядка 300 К, т. е., в горячих ядрах, обнаруженных Мином и др. [11]. Однако возможна и несколько иная интерпретация. На рис. 2 снизу слева приведена модельная ВД, построенная по наблюдавшимся нами линиям метанола для того случая, когда все линии возникают в одной области, но их оптические толщи велики, и из-за этого яркостные температуры одинаковы. Размеры области выбраны равными размерам горячего ядра ММ1а (1.6"×1.1") [11], температуру области выбрали равной 100 К. Заметим, что полученная вращательная температура не зависит от кинетической температуры источника, зато от кинетической температуры зависит положение точек по оси Y : чем выше температура, тем выше расположены точки. Эта ВД весьма сильно напоминает диаграмму, построенную по реально наблюдавшимся высокоэнергетическим линиям, а полученное значение T_{rot} практически совпадает с вращательной температурой высокоэнергетического компонента. Поэтому высокоэнергетические линии, возможно, не являются оптически тонкими. Температура источника должна быть высокой, так как в противном случае проблематично получить большую оптическую толщину линий со значениями E_u/k порядка 300–400 К, однако она может очень сильно отличаться от полученного значения $T_{rot} = 298$ К.

³ В их число не вошли молекулы, у которых отдельные спектральные линии являются сверхтонкими компонентами одного и того же вращательного перехода с практически совпадающими значениями энергии верхнего уровня разных компонентов.

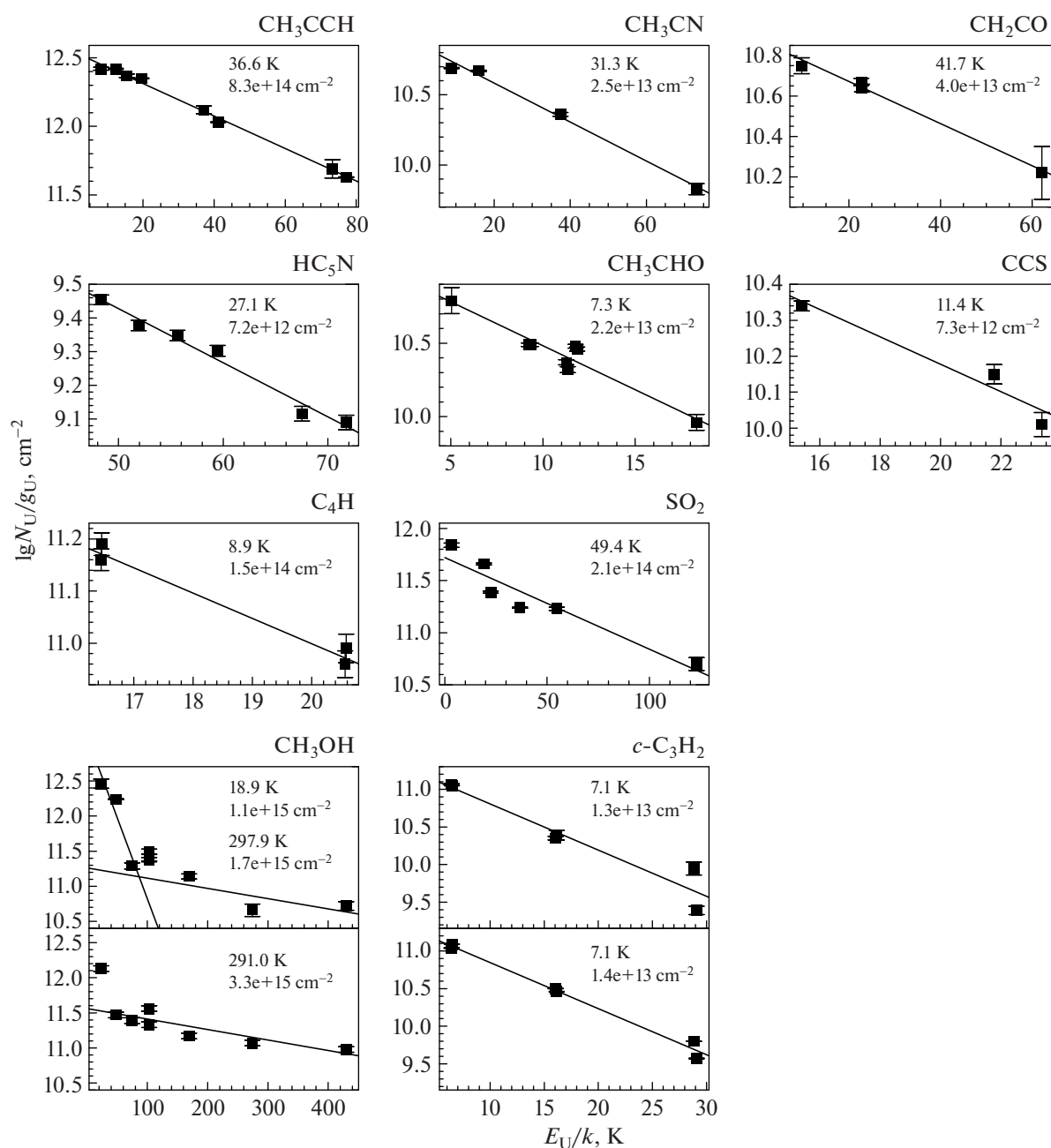


Рис. 2. 8 вращательных диаграмм, построенных по результатам обзора (в верхней части рисунка). Внизу слева: ВД для метанола (CH_3OH), построенная по наблюдавшимся линиям (верхняя панель) и модельная ВД, построенная по тем же линиям для случая, когда все они обладают большой оптической толщиной (нижняя панель). Внизу справа: ВД для циклопропенилидена ($c\text{-C}_3\text{H}_2$), построенная по наблюдавшимся линиям (верхняя панель) и построенная по результатам моделирования с помощью программы RADEX (нижняя панель) для набора параметров $T_{\text{kin}} = 32$ K, $N_{c\text{-C}_3\text{H}_2} = 6.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $n_{\text{H}_2} = 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$.

Значения вращательной температуры для CH_3CHO , CCS и $c\text{-C}_3\text{H}_2$ попадают в диапазон 7–11 K. Это может означать либо то, что эти молекулы существуют в более холодной среде, чем CH_3CSH , CH_3CN и HC_5N , либо то, что населен-

ности вращательных уровней этих молекул не термализованы за счет столкновений с молекулами H_2 . Чтобы разобраться с этим вопросом, мы промоделировали излучение $c\text{-C}_3\text{H}_2$ (циклопропенилидена) для ряда наборов параметров источ-

ника методом Большого Градиента Скорости (БГС) с помощью программы RADEX [27]. Температура была фиксирована и составляла 32 К. Наилучшее согласие с наблюдениями получено для $n_{\text{H}_2} = 2 \times 10^5 \text{ см}^3$ и $N_{\text{с-С}_3\text{H}_2} = 6.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Вращательная диаграмма для этого набора параметров приведена на рис. 2 снизу справа. Она очень похожа на вращательную диаграмму, построенную по наблюдавшимся линиям с-С₃H₂, и дает то же значение вращательной температуры (7 К). Поэтому мы считаем, что излучение с-С₃H₂ возникает в той же области, что и излучение CH₃CCH, CH₃CN и HC₅N, причем концентрация H₂ в этой области составляет порядка $2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, а лучевая концентрация с-С₃H₂ — около $6.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что примерно в два раза меньше значения, полученного по ВД.

К сожалению, провести подобное моделирование излучения этанала (CH₃CHO) и дикарбон моносульфида (CCS) невозможно из-за отсутствия столкновительных констант для этих молекул. Что касается CH₃CHO, мы предполагаем, что низкая вращательная температура этой молекулы вызвана отклонениями населенностей уровней от ЛТР. Этаналь является молекулой типа вытянутого слегка асимметричного волчка. Такой же молекулой является метанол (CH₃OH), возбуждение которого изучалось в работе Каленского и Куртца [28]. Мы полагаем, что вращательные диаграммы двух молекул одного и того же типа могут иметь одни и те же закономерности. Каленский и Куртц [28] показали, что вращательная температура, полученная по линиям метанола $J_K - (J - 1)_K$ с одним и тем же значением J и разными значениями K при концентрации H₂ ниже $\lesssim 10^8 \text{ см}^{-3}$, бывает ниже кинетической температуры и зависит не от температуры, а от концентрации молекул водорода. В нашем обзоре были обнаружены лишь такие линии CH₃CHO⁴, поэтому естественно предположить, что именно набор линий явился причиной низкой вращательной температуры.

Излучение двуокиси серы (SO₂) на картах Мина и др. [11], полученных в результате наблюдений на антенной решетке SMA, сконцентрировано в направлении горячих ядер MM1a и MM1b. Однако мы получили вращательную температуру SO₂, равную 48 К. Поэтому можно предположить, что зарегистрированное нами излучение возникает в умеренно теплом газе. Однако, если теплая область, излучающая в линиях двуокиси серы, компактна, непонятно, почему ее не видно на картах Мина и др. [11]. Если же она протяженная, непонятно, почему она не выявляется на враща-

тельных диаграммах CH₃CN, CH₃CCH, HC₅N. Чтобы разобраться с этим вопросом, мы промоделировали излучение SO₂ с помощью программы RADEX [27] и обнаружили, что в широком диапазоне параметров молекулярного газа вращательная температура, определенная по наблюдавшимся нами переходам, оказывается существенно ниже кинетической температуры газа. Поэтому наши результаты не указывают на существование источников с температурой газа порядка 50–60 К и не противоречат предположению, что излучение двуокиси серы возникает в горячих ядрах. Однако в то время как на картах Мина и др. [11] преобладает излучение ядра MM1b, лучевые скорости линий, обнаруженных нами, близки к системной скорости, которая характерна для ядра MM1a (см. Введение). Естественно предположить, что вклад ядра MM1a в эти линии преобладает. Такое различие результатов может быть вызвано, например, тем, что Мин и др. наблюдали более высокоэнергетические переходы, чем те, которые обнаружены нами. В то время как значения энергии верхних уровней линий, наблюдавшихся Мином и др., порядка или выше 200 К, подобные значения для линий, обнаруженных нами, порядка или ниже 120 К. Если температура ядра MM1a ниже, чем температура ядра MM1b, вполне возможна ситуация, когда излучение ядра MM1a будет сильнее в низкоэнергетических линиях, а ядра MM1b — в высокоэнергетических линиях. Нужны надежные измерения температуры MM1a и MM1b, чтобы проверить это предположение⁵.

3.2. Лучевые концентрации, определенные по одиночным линиям

В случаях, когда вращательную диаграмму построить не удавалось, мы определяли лучевую концентрацию молекулы по одиночным линиям, предполагая ЛТР. Применялась та же методика, что и при анализе данных обзора DR21OH в 3-мм диапазоне длин волн [17]. Определение из наблюдений интегральной интенсивности какой-либо линии позволяет определить лучевую концентрацию молекулы на верхнем энергетическом уровне. Зная эту величину и вращательную температуру молекулы, а также предполагая ЛТР, можно рассчитать лучевую концентрацию молекулы. В данной работе мы принимали вращательную температуру каждой молекулы равной кинетической температуре газа в протяженных областях (32 К).

⁵ Альтернативное предположение о существовании, помимо MM1a, какой-либо еще горячей области газа со скоростью, близкой к системной, представляется маловероятным по тем же причинам, что и предположение о существовании области с температурой порядка 50 К.

⁴ Кроме линии $2_{1,2} - 1_{0,1}E$.

Многие обнаруженные молекулы (COM , CH_3OCHO , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, CH_3OCH_3 и др.) по современным представлениям образуются в мантиях пылинок и быстро поступают в газовую фазу в результате испарения мантий в горячих ядрах или разрушения в газе, нагретом ударными волнами. Однако такие молекулы наблюдаются не только в горячих ядрах, но, хотя и с меньшим обилием, в плотных ядрах и даже темных облаках (см., напр., [29, 30]). При наблюдениях с низким пространственным разрешением вклад холодных областей может преобладать, так как обычно их размеры многократно превышают размеры горячих ядер. По нашим данным, полученным в одном направлении, невозможно определить, где возникает излучение обнаруженных COM — в компактных горячих ядрах или в протяженных плотных облаках. В случае метанола, который также является COM , образующейся на пылинках, мы видим два компонента, холодный и горячий (см. раздел 3.1). В низкоэнергетических линиях преобладает вклад холодного газа. Все обнаруженные на волне 4 мм линии других COM — низкоэнергетические, поэтому естественно предположить, что эти линии возникают в основном в холодном газе, и принять вращательную температуру равной 32 К во всех случаях.

У ряда молекул обнаруженные линии представляют из себя сверхтонкие компоненты одного и того же вращательного перехода. По таким линиям невозможно построить вращательную диаграмму из-за того, что энергии их верхних уровней практически совпадают. У многих молекул (H_2CO , HC_3N , OCS , и т. д.) было обнаружено всего по две спектральные линии. Кроме того, для C_4H , CCS и CH_3CHO по вращательным диаграммам получены низкие значения вращательной температуры, что указывает на сильные отклонения от ЛТР, которые не могли не повлиять на корректность определения лучевых концентраций. В каждом из этих случаев мы определяли лучевую концентрацию по каждой линии, предполагая $T_{\text{rot}} = 32$ К, и находили среднее значение.

Лучевые концентрации, найденные по единичным линиям, приведены в табл. 3. В последних 11 строчках указаны лучевые концентрации молекул, определенные при помощи сложения спектральных линий. В третьем столбце приведено относительное содержание молекул. Лучевая концентрация H_2 была определена по интегральной интенсивности линии $1-0 \text{ C}^{18}\text{O}$, взятой из результатов спектрального обзора DR21OH на волне 3 мм [17]. Относительное содержание C^{18}O было принято равным 10^{-7} , что примерно соответствует среднему значению относительного содержания C^{18}O в плотных ядрах (см. [31], рис. 18). При таком относительном содержании C^{18}O

лучевая концентрация H_2 оказалась равной $3 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$.

Полученные значения относительного содержания приведены в табл. 2 и 3. Для семи молекул (H^{13}CN , H^{13}CO^+ , HC^{18}O^+ , SO , ^{34}SO , HCS^+ , OCS) эти относительные содержания можно сравнить со значениями, полученными для большого числа плотных ядер в работе [31], где приведены графики зависимости обилия молекул от различных параметров облаков, в том числе от плотности. Для всех семи молекул в работе [31] найдена отрицательная корреляция между плотностью и обилием молекулы, и полученные нами значения обилия соответствуют интервалам плотности примерно от 10^4 до 10^5 см^{-3} . Это ниже, чем плотность, полученная нами по линиям CCS (раздел 3.1), и на два порядка ниже, чем плотность, полученная Мангумом и др. [5] в ядрах MM1 и MM2 по излучению пыли. Такое расхождение результатов может отражать структуру источника. Мангум и др. оценивали плотность в направлении сгустков MM1 и MM2. Возможно, излучение CCS возникает на периферии сгустков, где плотность ниже, а излучение семи перечисленных молекул — в еще более разреженных областях. Однако тот факт, что обилие сразу всех семи молекул соответствует примерно одной и той же плотности, которая ниже полученной по линиям CCS , делает более вероятным следующее объяснение. Рисунок 18 в работе [31] показывает, что разброс значений относительного содержания C^{18}O в плотных ядрах составляет примерно порядок величины. Поэтому возможно, что в направлении DR21OH—M относительное содержание C^{18}O близко к нижней границе этого интервала, т.е. раза в три ниже среднего значения. В таком случае относительное содержание молекул в табл. 2 и 3 завышено в три раза, а настоящее обилие H^{13}CN , H^{13}CO^+ , HC^{18}O^+ , SO , ^{34}SO , HCS^+ и OCS в DR21OH, как можно показать по результатам работы [31], соответствует диапазону плотности примерно $3 \times 10^4 - 3 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$. Это не противоречит плотности, полученной по линиям CCS .

4. СЛОЖЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Если относительное содержание молекулы в типичном молекулярном облаке ниже $\sim 10^{-11} - 10^{-12}$, то при наблюдениях с современной аппаратурой обнаружить спектральные радиолнии этой молекулы за разумное время, как правило, не удастся. Однако во многих случаях число линий какой-либо молекулы, попадающих в полосу спектрального обзора, весьма велико и достигает сотен и тысяч. Особенно это касается сложных молекул. Можно сложить эти линии, и для суммарной спектральной детали получить соотношение сиг-

Таблица 3. Лучевые концентрации молекул, полученные по одиночным линиям

Молекула	Луч. конц-ция, 10^{12} см^{-2}	$N_{\text{mol}}/N_{\text{H}_2}, 10^{-11}$	Молекула	Луч. конц-ция, 10^{12} см^{-2}	$N_{\text{mol}}/N_{\text{H}_2}, 10^{-11}$
^{13}CCH	34	10.5	HCO	83.2	25.8
C^{13}CH	47	14.5	t-HCOOH	24.2	7.5
CCH	2133	660	HCS ⁺	11.5	3.6
C ₄ H	94	29.1	HDO	10.1	3.1
CCD	118	36.5	HN ¹³ C	15.9	4.9
CCS	10	3.1	HNO	16.7	5.2
CH ₂ CHCN	3	1.0	N ₂ D ⁺	1.1	0.4
CH ₂ CN	1	0.3	NH ₂ CHO	1.1	0.4
CH ₃ CHO	115.8	35.8	NS	91.6	28.4
CH ₃ OCH ₃	110	34.1	OCS	101.7	31.5
CH ₃ OCHO	100.3	31.1	²⁹ SiO	1.5	0.5
CH ₃ OH	3359.5	1040.1	³⁴ SO	25	7.8
D ₂ CS	1.9	0.6	SO	405.4	125.5
DC ₃ N	0.7	0.2	SO ⁺	36.8	11.4
DCN	24.1	7.5	SiO	24.2	7.5
DCO ⁺	3.4	1.1	l-C ₃ H	7.9	2.5
DNC	8.4	2.6	l-C ₃ H ₂	0.9	0.3
H ¹³ CCCN	1.1	0.4	CH ₃ C ₃ N	1.1	0.4
H ¹³ CN	43.9	13.6	CH ₃ CH ₂ CN	1.2	0.4
H ¹³ CO ⁺	18.3	5.6	CH ₃ CH ₂ OH	36	11.1
l-C ₃ H ₂	0.9	0.3	C ₃ S	0.3	0.1
H ₂ CO	582.2	180.2	¹³ CH ₃ OH	59	18.3
H ₂ CS	136.6	42.3	CH ₃ C ₄ H	4.5	1.4
H ₂ ¹³ CO	23.8	7.4	CH ₃ OCH ₃	125	38.7
HC ¹³ CCN	1.5	0.5	CH ₃ SH	36	11.1
HC ¹⁵ N	9.5	2.9	CH ₂ CN	1.4	0.4
HC ¹⁸ O ⁺	2.7	0.8	OC ³⁴ S	4.9	1.5
HCC ¹³ CN	1.3	0.4	C ₂ H ₃ CHO	1.8	0.5
HC ₂ N	58.4	21.9			

Примечание. В последних 11 строках указаны лучевые концентрации молекул, определенные при помощи сложения спектральных линий. В третьем столбце приведено относительное содержание молекул (см. текст).

нал/шум выше, чем то, которое достигнуто для сильнейших линий искомой молекулы в наблюдаемом диапазоне частот. Поэтому сложение спектральных линий (ССЛ) позволяет находить молекулы, линии которых не видны. Этот метод был впервые применен для поиска молекул Юханссоном и др. [32]. Каленский и Юханссон [17, 33] использовали ССЛ при анализе результатов обзоров областей звездообразования

DR21OH и W51e1/e2 в 3-мм диапазоне длин волн и расширили списки молекул, найденных в этих источниках⁶. С помощью ССЛ в космосе была впервые обнаружена 13-атомная молекула бензонитрил (C₆H₅CN) и несколько других, еще более сложных молекул [34–36].

⁶ Юханссон и др. и Каленский и Юханссон называли этот метод “составные спектры”.

Описание метода приведено в ряде работ [17, 32, 36], однако методика, использованная нами, в деталях отличается от тех, которые изложены в этих статьях. Поэтому в данном разделе мы приводим описание нашей методики.

При поиске молекул методом ССЛ линии других молекул (ЛДМ) являются помехами, которые могут привести к ложным “обнаружениям” искоемых молекул. Это может происходить за счет случайных совпадений по частоте ЛДМ с линиями искоемых молекул. Влияние ЛДМ необходимо было свести к минимуму. С этой целью мы исключили из дальнейшего рассмотрения участки спектра, занятые ЛДМ. Сделано это было следующим образом: сначала был построен модельный спектр (МС) всех обнаруженных в DR21OH молекул. Это было сделано с помощью расширения WEEDS программы CLASS, которое, в свою очередь, предполагает ЛТР. Температура источника была принята равной 32 К. Частоты и другие спектральные параметры ЛДМ были взяты из каталогов CDMS [20, 21] и JPL [22]. Лучевые концентрации для расчета интенсивностей линий были взяты из табл. 2 и 3. Ширины всех линий были приняты равными 4.24 км/с, что соответствует средней ширине спектральной линии в DR21OH по данным нашего обзора.

С помощью МС из наблюдаемого спектра были исключены все участки, занятые линиями уже обнаруженных молекул. Для этого были отмечены все области, где яркостная температура МС превышает 1σ шумов наблюдаемого спектра при условии, что максимальная яркостная температура МС в пределах диапазона превышает 2σ . Затем ширина каждой такой области была увеличена на 20%, чтобы учесть возможную разницу ширины линий. Спектральные линии искоемых молекул, попавшие в эти участки, в дальнейшем исключались из рассмотрения. Кроме того, на наблюдаемом спектре в данных частотных областях зарегистрированное излучение заменялось шумом, дисперсия которого совпадала с дисперсией шумов наблюдаемого спектра. Это нужно для правильной оценки весов, с которыми складываются линии (см. Приложение).

Далее из приготовленного таким образом широкополосного спектра источника были вырезаны узкополосные участки одинаковой ширины (200 каналов, что соответствует ширине полосы 61 МГц), центрированные на частоты линий искомой молекулы, и поканально складывались друг с другом с определенным образом выбранными весами (более подробно построение синтетических спектров описано в Приложении). Веса зависят от вращательной температуры искомой молекулы, которая заранее не известна. Поэтому на первом этапе выполнялось сложение спектральных линий для семи значений температуры:

9.375, 18.75, 37.5, 75, 150, 225 и 300 К. Такой выбор определялся тем, что именно для этих температур в каталогах JPL и CDMS приведены статистические суммы молекул⁷.

В результате для каждой искомой молекулы было получено по 7 синтетических спектров (СС), в центре каждого из которых суммируются все линии искомой молекулы, частоты которых попадают в диапазон обзора (см. рис. 3). Если искомая молекула есть в источнике, в центре спектра возникает деталь, которую мы называем составной линией (СЛ). Соотношение сигнал/шум для СЛ на синтетическом спектре выше, чем это соотношение даже для наиболее сильных линий искомой молекулы в исходном спектре.

Такая процедура была выполнена для каждой молекулы, приведенной в каталогах CDMS или JPL. В результате было обнаружено несколько десятков составных линий. Однако для каждого источника и частотного диапазона существует некоторый “уровень путаницы” (confusion level), при достижении которого наблюдатель сталкивается с ситуацией, когда практически одну и ту же частоту могут иметь слабые линии разных молекул. При наблюдениях в миллиметровом диапазоне длин волн с помощью современной аппаратуры достичь уровня путаницы или вплотную приблизиться к нему удастся довольно часто. Это может приводить к ложным открытиям, примером чего является “открытие” глицина [37], впоследствии раскритикованное Снайдером и др. [38]. Поэтому каждая обнаруженная СЛ подвергалась двум дополнительным проверкам. Одна из проверок заключалась в следующем: строился модельный синтетический спектр (МСС) с использованием МС вместо наблюдаемого спектра. Если бы СЛ возникала за счет слабых линий уже обнаруженных молекул, то СЛ должна была бы возникать и в МСС. Отсутствие же СЛ в МСС служит аргументом в пользу того, что искомая молекула действительно имеется в источнике.

Снайдер и др. [38] предложили критерий того, что молекулу можно считать надежно обнаруженной, который можно кратко сформулировать так: (1) должно быть обнаружено много линий этой молекулы, и (2) соотношение интенсивностей линий должно соответствовать некоторой вращательной температуре, зависящей от параметров источника. В частности, не должны оставаться ненайденными линии, которые по своим спектральным характеристикам должны надежно регистрироваться при данной вращательной температуре. Методика сложения спектральных линий в принципе не допускает проверки надежности

⁷ В ряде случаев в Кельнском каталоге дополнительно приведены статистические суммы для 2.725, 5.0, 500 и 1000 К, но для этих значений температуры синтетические спектры не строились.

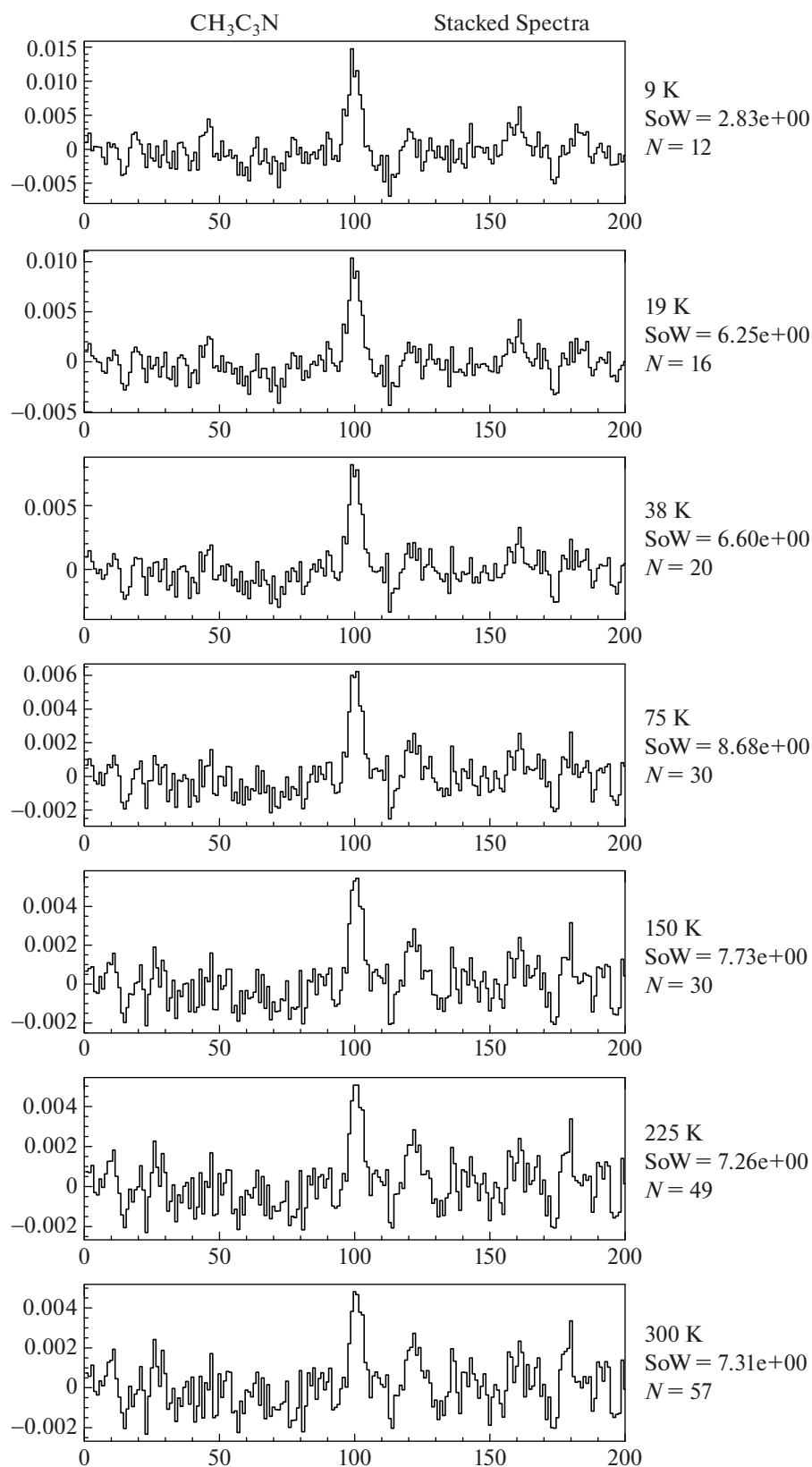


Рис. 3. Результаты сложения спектральных линий метилцианоацетилена ($\text{CH}_3\text{C}_3\text{N}$) для семи значений вращательной температуры. N — число складываемых линий, SoW — сумма весов складываемых линий.

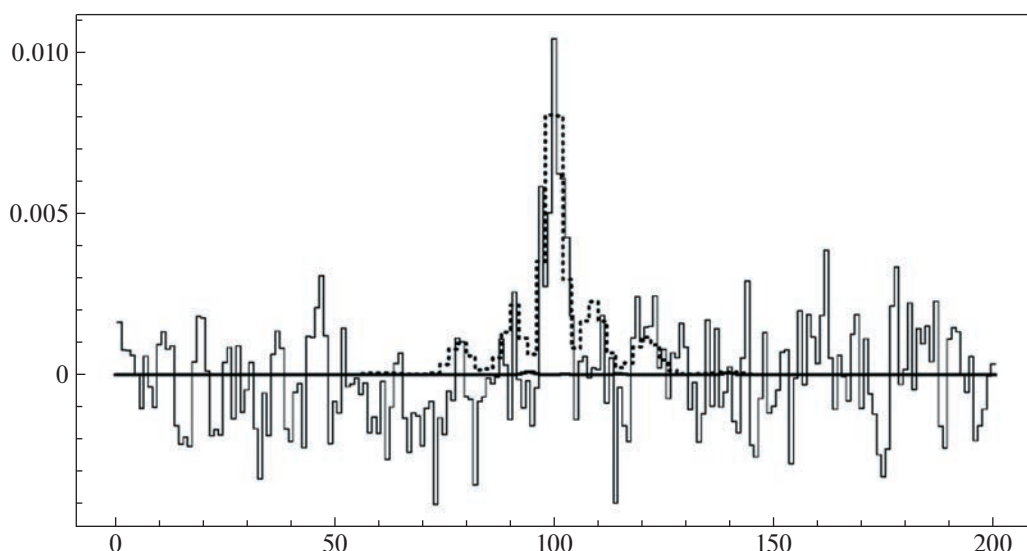


Рис. 4. Тонкая сплошная линия — синтетический спектр метилцианоацетилена ($\text{CH}_3\text{C}_3\text{N}$), построенный по наблюдательным данным. Жирная сплошная линия — аналогичный синтетический спектр (МСС), построенный по модельному спектру (МС), который включает излучение всех обнаруженных молекул, кроме метилцианоацетилена. Пунктирная линия — синтетический спектр, построенный по модельному спектру, включающему только излучение метилцианоацетилена.

обнаружения молекул с помощью этих критериев. Вместо этого мы использовали тот факт, что веса линий выбираются исходя из параметров линий и вращательной температуры, и в качестве второго теста многократно выполняли следующую процедуру: для проверяемой молекулы выполняли сложение спектральных линий со случайно подобранными весами. Если СЛ возникает за счет излучения искомой молекулы, такая процедура должна ослаблять СЛ или приводить к ее исчезновению. Если же СЛ возникает за счет случайного совпадения по частоте слабых линий других молекул, такая процедура может как ослаблять, так и усиливать СЛ.

Если СЛ успешно проходила обе проверки, соответствующая молекула считалась обнаруженной. Мы оценивали ее лучевую концентрацию и добавляли ее излучение в модельный спектр. Оценка лучевой концентрации проводилась следующим образом: выбиралось какое-нибудь априорное значение лучевой концентрации этой молекулы N^a , строился модельный спектр только этой молекулы (индивидуальный модельный спектр, ИМС), и выполнялось сложение спектральных линий ИМС. Соотношение интенсивностей “наблюдаемой” и “модельной” СЛ позволяло оценить лучевую концентрацию молекулы с помощью очевидного соотношения:

$$N_{\text{mol}} = \frac{T_R^{\text{sl}}}{T_R^{\text{sm}}} N^a, \quad (1)$$

где T_R^{sl} — яркостная температура СЛ, T_R^{sm} — яркостная температура СЛ, построенной по линиям ИМС. Пример сравнения “наблюдаемой” и “модельной” СЛ приведен на рис. 4.

Лучевые концентрации двух молекул, найденных традиционным методом, этилового спирта ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) и диметилэфира (CH_3OCH_3), определяются по одиночным линиям крайне ненадежно. Это происходит потому, что у этилового спирта была обнаружена всего одна слабая линия, параметры которой определяются ненадежно, а у диметилэфира все линии группируются в тесные блэнды, и параметры одиночных линий определить невозможно. Поэтому мы определили лучевые концентрации этих молекул тем же способом, что и лучевые концентрации молекул, найденных с помощью сложения спектральных линий. Результаты приведены в табл. 3.

В результате девять молекул прошли оба теста (табл. 1). Однако интегральная интенсивность СЛ у трех из них мала (меньше, чем пять погрешностей определения этой величины), поэтому обнаружение этих молекул находится под вопросом и требует дальнейшего подтверждения по другим данным.

4.1. Заключение

Представлены результаты обзора спектральных линий области звездообразования DR21ОН в 4-мм диапазоне длин волн (см. табл. 4). Обнаружено 69 молекул и их изотопологов, от простых

Таблица 4. Спектральные линии, зарегистрированные в результате спектрального обзора области звездообразования DR21OH M в 4-мм диапазоне длин волн

Частота, МГц	Молекула	Переход	$\int T_R dV$, К·км/с	V_{LSR} , км/с	ΔV , км/с	T_R , К	Приме- чание
68305.68	CH ₃ OH	$1_{1,0} - 2_{0,2}E$	0.27 (0.04)	-2.92 (0.61)	9.40 (1.63)	0.0265	bl
68354.502	CH ₃ CCH	$4_3 - 3_3$	0.13 (0.02)	-3.33 (0.05)	3.98 (0.00)	0.0314	
68361.035	CH ₃ CCH	$4_2 - 3_2$	0.30 (0.02)	-3.33 (0.05)	3.98 (0.00)	0.0714	
68364.955	CH ₃ CCH	$4_1 - 3_1$	0.67 (0.02)	-3.33 (0.05)	3.98 (0.00)	0.1586	
68366.262	CH ₃ CCH	$4_0 - 3_0$	0.81 (0.02)	-3.33 (0.05)	3.98 (0.06)	0.1901	
68699.381	H ₂ CS	$2_{0,2} - 1_{0,1}$	0.69 (0.02)	-3.08 (0.07)	4.27 (0.17)	0.152	rw
68972.154	SO ₂	$6_{1,5} - 6_{0,6}$	0.81 (0.02)	-3.03 (0.09)	6.00 (0.22)	0.1275	
69002.890	NS	$J = 3/2 - 1/2$ $F = 5/2 - 3/2e$	0.45 (0.02)	-2.76 (0.07)	3.73 (0.08)	0.1123	
69017.895	NS	$J = 3/2 - 1/2$ $F = 3/2 - 3/2e$	0.18 (0.02)	-2.76 (0.07)	3.73 (0.00)	0.0452	
69037.336	NS	$J = 3/2 - 1/2$ $F = 3/2 - 3/2e$	0.17 (0.02)	-2.76 (0.07)	3.73 (0.00)	0.0415	
69040.324	NS	$J = 3/2 - 1/2$ $F = 1/2 - 1/2e$	0.11 (0.01)	-2.76 (0.07)	3.73 (0.00)	0.0279	
69227.183	HC ₅ N	$26 - 25$	0.31 (0.02)	2.73 (0.14)	4.56 (0.27)	0.065	
69281.115	CCS	$N_J = 5_6 - 4_5$	0.33 (0.02)	-3.23 (0.10)	3.99 (0.24)	0.078	
69330.592	NS	$J = 3/2 - 1/2$ $F = 3/2 - 3/2f$	0.14 (0.01)	-3.38 (0.19)	3.77 (0.38)	0.035	
69408.371	SO ⁺	$^2\Pi_{1/2} J = 3/2 - 1/2e$	0.17 (0.02)	-2.92 (0.20)	4.24 (0.87)	0.0380	
69411.943	NS	$J = 3/2 - 1/2$ $F = 5/2 - 3/2f$	0.46 (0.02)	-3.36 (1.31)	3.71 (0.31)	0.1158	
69437.850	NS	$J = 3/2 - 1/2$ $F = 1/2 - 1/2f$	0.14 (0.02)	-3.33 (0.16)	3.22 (0.42)	0.040	
69485.223	NS	$J = 3/2 - 1/2$ $F = 3/2 - 1/2f$	0.17 (0.01)	-3.23 (0.11)	2.99 (0.29)	0.052	
69575.923	SO ₂	$1_{1,1} - 0_{0,0}$	0.42 (0.02)	-2.99 (0.57)	5.20 (0.05)	0.0752	
69746.720	H ₂ CS	$2_{1,1} - 1_{1,0}$	0.91 (0.01)	-3.19 (0.03)	4.10 (0.07)	0.209	
69783.846	SO ⁺	$^2\Pi_{1/2} J = 3/2 - 1/2f$	0.11 (0.01)	-3.17 (0.11)	2.55 (0.26)	4.195	
70534.033	H ¹³ CCCN	$8 - 7$	0.11 (0.01)	-3.45 (0.18)	3.72 (0.52)	0.0279	
71024.781	H ₂ ¹³ CO	$1_{0,1} - 0_{0,0}$	0.24 (0.01)	-3.19 (0.10)	4.49 (0.25)	0.0499	
71889.596	HC ₅ N	$27 - 26$	0.31 (0.01)	-3.02 (0.10)	4.51 (0.22)	0.0640	
72039.331	DCO ⁺	$1 - 0$	0.54 (0.02)	-2.99 (0.05)	3.56 (0.13)	0.1416	
72107.721	CCD	$1 - 0 J = 5/2 - 3/2$ $F = 7/2 - 5/2$	0.26 (0.02)	-3.35 (0.18)	5.19 (0.54)	0.048	new
72187.708	CCD	$1 - 0 J = 3/2 - 3/2$ $F = 5/2 - 5/2$	0.08 (0.01)	-2.87 (0.15)	3.69 (0.22)	0.021	
72189.726	CCD	$1 - 0 J = 3/2 - 1/2$ $F = 3/2 - 5/2$	0.08 (0.01)	-2.87 (0.15)	3.69 (0.22)	0.020	
72323.789	CCS	$J_N = 6_5 - 5_4$	0.11 (0.01)	-3.25 (0.14)	3.41 (0.18)	0.031	
72409.092	H ₂ CO	$5_{1,4} - 5_{1,5}$	0.28 (0.01)	-2.78 (1.98)	4.89 (0.02)	0.0544	
72413.484	DCN	$1 - 0 F = 1 - 1$	0.75 (0.01)	-3.67 (0.01)	4.30 (0.02)	0.1752	
72414.905	DCN	$1 - 0 F = 2 - 1$	1.26 (0.01)	-3.67 (0.01)	4.30 (0.02)	0.292	
72417.030	DCN	$1 - 0 F = 0 - 1$	0.25 (0.01)	-3.67 (0.01)	4.30 (0.02)	0.0584	

Таблица 4. Продолжение

Частота, МГц	Молекула	Переход	$\int T_R dV$, К·км/с	V_{LSR} , км/с	ΔV , км/с	T_R , К	Приме- чание
72475.074	HC ¹³ CCN	8 – 7	0.18 (0.01)	–3.07 (0.18)	5.90 (0.46)	0.0293	rw bw, rw new bw
72482.055	HCC ¹³ CN	8 – 7	0.14 (0.01)	–3.02 (0.19)	4.63 (0.38)	0.0290	
72758.235	SO ₂	6 _{0,6} – 5 _{1,5}	0.86 (0.02)	–3.31 (0.04)	4.77 (0.11)	0.1696	
72783.818	HC ₃ N	8 – 7	6.52 (0.02)	–3.20 (0.01)	4.32 (0.01)	1.4191	
72835	U		0.11 (0.01)	–3.38 (0.07)	2.01 (0.12)	0.052	
72837.948	H ₂ CO	1 _{0,1} – 0 _{0,0}	5.87 (0.12)	–4.19 (0.03)	2.97 (0.04)	1.86	
			3.43 (0.12)	–1.30 (0.04)	2.88 (0.05)	1.12	
72976.779	OCS	6 – 5	0.37 (0.01)	–3.05 (0.07)	4.10 (0.15)	0.0855	
73577.454	CH ₃ CN	4 ₃ – 3 ₃	0.11 (0.01)	–3.27 (0.02)	4.26 (0.00)	0.0244	
73584.545	CH ₃ CN	4 ₂ – 3 ₂	0.32 (0.01)	–3.27 (0.02)	4.26 (0.00)	0.0694	
73588.801	CH ₃ CN	4 ₁ – 3 ₁	0.81 (0.01)	–3.27 (0.02)	4.26 (0.00)	0.1787	bl
73590.220	CH ₃ CN	4 ₀ – 3 ₀	0.92 (0.01)	–3.27 (0.02)	4.26 (0.03)	0.2020	bl
73722.376	CH ₃ OCH ₃	9 _{2,7} – 9 _{1,8} EE	0.14 (0.02)	–5.12 (0.68)	11.79 (1.23)	0.0109	
+73720.490	CH ₃ OCH ₃	9 _{2,7} – 9 _{1,8} AE + EA					
+73724.261	CH ₃ OCH ₃	9 _{2,7} – 9 _{1,8} AA					
74551.988	HC ₅ N	28 – 27	0.28 (0.01)	–3.06 (1.37)	4.35 (0.08)	0.0594	
74891.681	CH ₃ CHO	4 _{1,4} – 3 _{1,3} A ⁺⁺	0.25 (0.01)	–3.27 (1.87)	4.35 (0.18)	0.0536	
74924.137	CH ₃ CHO	4 _{–1,4} – 3 _{–1,3} E	0.22 (0.01)	–3.27 (2.41)	3.59 (0.23)	0.0571	
75366	U		0.05 (0.013)	–3.27 (0.23)	2.66 (0.58)	0.018	m
75862.92	CH ₃ SH	3 ₀ – 2 ₀ A +	0.16 (0.02)	–2.63 (0.90)	13.21 (1.80)	0.0115	
+75864.43	CH ₃ SH	3 ₀ – 2 ₀ E					
75921	U		0.08 (0.02)	–3.57 (0.93)	8.05 (1.67)	0.001	m
76117.43	C ₄ H	17/2–15/2	0.21 (0.01)	–3.02 (0.08)	3.10 (0.19)	0.0620	
76156.02	C ₄ H	15/2–13/2	0.20 (0.01)	–3.06 (0.07)	3.10 (0.16)	0.0613	
76198.724	l-C ₃ H	2P1/2 J = 7/2 – 5/2 F = 4 – 3f	0.089 (0.009)	–2.96 (0.16)	3.269 (0.17)	0.0257	bl
76199.925	l-C ₃ H	2P1/2 J = 7/2 – 5/2 F = 4 – 3f	0.072 (0.008)	–2.96 (0.16)	3.269 (0.00)	0.0206	bl
76204.198	l-C ₃ H	2P1/2 3 – 2 J = 7/2 – 5/2 F = 4 – 3	0.041 (0.008)	–2.96 (0.16)	3.269 (0.00)	0.0117	
76205.108	l-C ₃ H	2P1/2 3 – 2 J = 7/2 – 5/2 F = 3 – 2	0.046 (0.008)	–2.96 (0.16)	3.269 (0.00)	0.0132	
76247.312	CH ₃ OH	11 _{1,10} – 10 _{2,9} A [–]	0.12 (0.01)	–3.15 (0.19)	4.03 (0.43)	0.0282	
76305.717	DNC	1 – 0	0.91 (0.01)	–3.20 (0.02)	4.12 (0.05)	0.2066	
76362.194	CH ₃ OCH ₃	7 _{2,5} – 7 _{1,6} AE + EA	0.044 (0.010)	–3.43 (0.35)	4.56 (0.00)	0.0090	m
76364.277	CH ₃ OCH ₃	7 _{2,5} – 7 _{1,6} EE	0.067 (0.010)	–3.43 (0.35)	4.56 (0.45)	0.0137	
76412.158	SO ₂	10 _{1,9} – 9 _{2,8}	0.27 (0.01)	–2.53 (0.17)	6.22 (0.39)	0.0402	
76460	U		0.17 (0.01)	–5.12 (0.04)	1.32 (0.12)	0.120	
			0.20 (0.02)	–2.00 (0.10)	2.69 (0.31)	0.068	
76509.628	CH ₃ OH	5 _{0,5} – 4 _{1,3} E	0.75 (0.01)	–2.99 (0.04)	5.40 (0.09)	0.1313	
76866.437	CH ₃ CHO	4 _{0,4} – 3 _{0,3} E	0.36 (0.01)	–3.21 (0.06)	4.29 (0.14)	0.0787	
76878.958	CH ₃ CHO	4 _{0,4} – 3 _{0,3} A ⁺⁺	0.36 (0.01)	–3.13 (0.06)	4.04 (0.16)	0.0832	
77038.605	CH ₃ CHO	4 _{2,3} – 3 _{2,2} A ^{––}	0.08 (0.01)	–3.62 (0.20)	3.50 (0.46)	0.0223	

Таблица 4. Продолжение

Частота, МГц	Молекула	Переход	$\int T_R dV$, К·км/с	V_{LSR} , км/с	ΔV , км/с	T_R , К	Приме- чание
77 107.86	N ₂ D ⁺	1 – 0 $F_1 = 1 - 1$	0.045 (0.008)	–3.16 (0.16)	3.20 (0.00)	0.0131	hfs
77 109.61	N ₂ D ⁺	1 – 0 $F_1 = 2 - 1$	0.074 (0.008)	–3.16 (0.16)	3.20 (0.20)	0.0215	
77 112.2	N ₂ D ⁺	1 – 0 $F_1 = 0 - 1$	0.025 (0.007)	–3.16 (0.16)	3.20 (0.00)	0.0074	
77 125.695	CH ₃ CHO	4 _{2,2} – 3 _{2,1}	0.26 (0.04)	–4.63 (0.15)	6.13 (0.38)	0.040	
+77 126.418	CH ₃ CHO	4 _{2,3} – 3 _{–2,2}					
77 214.360	HC ₅ N	29 – 28	0.28 (0.01)	–2.97 (0.09)	4.65 (0.19)	0.0556	m
77 218.295	CH ₃ CHO	4 _{2,2} – 3 _{2,1} A ⁺⁺	0.09 (0.01)	–3.05 (0.32)	5.35 (0.78)	0.0160	
77 731.725	CCS	6, 6 – 5, 5	0.16 (0.01)	–2.95 (0.13)	4.27 (0.31)	0.0348	
78 603.670	³⁰ Si ¹⁸ O	2 – 1	0.047 (0.01)	–2.98 (0.60)	5.00 (1.21)	0.009	
79 099.313	CH ₃ CHO	4 _{1,3} – 3 _{1,2} E	0.32 (0.01)	–3.34 (0.05)	4.28 (0.12)	0.0704	
79 150.172	CH ₃ CHO	4 _{1,3} – 3 _{1,2}	0.34 (0.01)	–3.37 (0.07)	4.86 (0.28)	0.0656	m
79 350.476	H ¹³ CCCN	9 – 8	0.12 (0.01)	–2.98 (0.17)	4.51 (0.33)	0.0252	
79 876.711	HC ₅ N	30 – 29	0.27 (0.01)	–2.70 (0.18)	5.12 (0.13)	0.0488	
80 076.644	CH ₂ CO	4 _{1,4} – 3 _{1,3}	0.25 (0.01)	–3.15 (0.06)	3.73 (1.69)	0.0637	
80 479.940	CH ₂ CN	4 – 3 $J = 11/2 - 9/2$	0.04 (0.006)	–4.62 (0.18)	2.37 (0.90)	0.016	
80 490	U		0.05 (0.01)	–4.89 (0.23)	2.97 (0.48)	0.015	di, bl?
80 578.283	HDO	1 _{1,0} – 1 _{1,1}	0.072 (0.010)	+0.066 (8.05)	6.76 (1.40)	0.010	
80 723.186	c-C ₃ H ₂	4 _{2,2} – 4 _{1,3}	0.046 (0.009)	–3.68 (0.44)	4.74 (0.75)	0.0091	
80 820.409	CH ₂ CO	4 _{2,3} – 3 _{2,2}	0.030 (0.007)	–3.24 (0.13)	3.50 (0.00)	0.0082	
80 824.314	CH ₂ CO	4 _{2,2} – 3 _{2,1}	0.024 (0.007)	–3.24 (0.13)	3.50 (0.00)	0.0063	
80 832.107	CH ₂ CO	4 _{0,4} – 3 _{0,3}	0.11 (0.01)	–3.24 (0.13)	3.50 (0.17)	0.0283	
80 993.257	CH ₃ OH	7 _{2,6} – 8 _{1,7} A [–]	0.14 (0.01)	–2.62 (2.04)	6.62 (3.10)	0.0192	
81 477.49	HNO	1 _{0,1} – 0 _{0,0}	0.12 (0.01)	–3.25 (1.19)	3.20 (0.42)	0.0344	
81 505.208	CCS	7, 6 – 6, 5	0.31 (0.01)	–3.23 (0.32)	3.53 (0.06)	0.0834	
81 534.125	HC ¹³ CCN	9 – 8	0.12 (0.01)	–2.68 (1.60)	4.74 (0.19)	0.0236	
81 541.981	HCC ¹³ CN	9 – 8	0.12 (0.01)	–2.66 (1.73)	3.77 (1.13)	0.0287	
81 586.229	CH ₂ CO	4 _{1,3} – 3 _{1,2}	0.24 (0.01)	–3.00 (0.42)	3.67 (3.11)	0.0617	
81 881.462	HC ₃ N	9 – 8	6.22 (0.01)	–3.12 (0.00)	4.44 (0.00)	1.3159	
82 093.555	c-C ₃ H ₂	2 _{0,2} – 1 _{1,1}	0.47 (0.01)	–3.05 (0.03)	3.45 (0.11)	0.1266	
82 395.089	l-C ₃ H ₂	4 _{1,4} – 3 _{1,3}	0.06 (0.004)	–2.59 (0.07)	2.20 (0.76)	0.0237	
82 539.375	U		0.15 (0.01)	–2.13 (0.10)	3.26 (0.26)	0.0440	
			0.049 (0.008)	+0.79 (0.10)	1.71 (0.22)	0.0267	
82 966.201	c-C ₃ H ₂	3 _{1,2} – 3 _{0,3}	0.19 (0.01)	–2.89 (0.08)	3.84 (0.17)	0.0453	
83 163	U		0.11 (0.01)	–3.78 (0.14)	3.99 (0.31)	0.0261	
83 207.51	CH ₂ CHCN	9 _{1,9} – 8 _{1,8}	0.021 (0.004)	–2.73 (0.25)	2.39 (0.52)	0.0084	
83 217	U		0.09 (0.01)	–4.03 (0.13)	3.64 (0.31)	0.024	rw di
83 584.282	CH ₃ CHO	2 _{–1,2} – 1 _{0,1} E	0.05 (0.01)	–2.88 (0.23)	3.15 (0.48)	0.0136	
83 688.086	SO ₂	8 _{1,7} – 8 _{0,8}	0.80 (0.01)	–2.79 (0.03)	6.40 (0.08)	0.1179	
83 900.570	HOCN	4 _{0,4} – 3 _{0,3}	0.04 (0.01)	–3.74 (0.22)	3.02 (0.62)	0.0139	
83 933.681	l-C ₃ H ₂	4 _{1,3} – 3 _{1,2}	0.06 (0.01)	–2.71 (0.16)	2.47 (0.59)	0.0211	
84 119.329	¹³ CCH	1 – 0 3/2 – 1/2 $F = 2, 2.5 - 1, 1.5$	0.07 (0.01)	–3.02 (0.17)	3.66 (0.33)	0.017	bl
84 410.693	³⁴ SO	$N, J = 2, 2 - 1, 1$	0.13 (0.01)	–0.92 (0.37)	9.28 (0.94)	0.0128	

Таблица 4. Продолжение

Частота, МГц	Молекула	Переход	$\int T_R dV$, К·км/с	V_{LSR} , км/с	ΔV , км/с	T_R , К	Приме- чание
84423.706	CH ₃ OH	13 _{-3,11} – 14 _{-2,13} E	0.05 (0.01)	–3.76 (0.15)	2.69 (0.35)	0.0165	
84429.815	DC ₃ N	10 – 9	0.08 (0.01)	–2.67 (0.28)	4.49 (0.73)	0.016	
84449.102	CH ₃ OCHO	7 _{2,6} – 6 _{2,5} E	0.03 (0.01)	–2.49 (0.00)	5.82 (0.00)	0.0054	m
84454.787	CH ₃ OCHO	7 _{2,6} – 6 _{2,5} A	0.04 (0.01)	–2.49 (0.43)	5.82 (0.51)	0.0065	m
84521.206	CH ₃ OH	5 _{-1,5} – 4 _{0,4} E	0.85 (0.04)	+0.43 (0.00)	0.89 (0.00)	0.9033	mas
			0.005 (0.005)	+0.16 (0.01)	0.76 (0.01)	0.0066	mas
			2.27 (0.11)	–0.70 (0.05)	2.62 (0.16)	0.8144	mas
			3.65 (0.12)	–3.84 (0.05)	3.77 (0.21)	0.9108	mas
84542.331	NH ₂ CHO	4 _{0,4} – 3 _{0,3}	0.031 (0.006)	–3.55 (0.27)	3.21 (0.75)	0.0091	
84727.691	c-C ₃ H ₂	3 _{2,2} – 3 _{1,3}	0.07 (0.01)	–3.39 (0.23)	4.14 (0.98)	0.0161	
84745.998	³⁰ SiO	2 – 1 $\nu = 0$	0.15 (0.01)	–3.97 (0.21)	7.21 (0.79)	0.0198	
84865.166	O ¹³ CS	7 – 6	0.03 (0.008)	–4.73 (0.78)	5.68 (1.40)	0.006	m
85139.104	OCS	7 – 6	0.55 (0.01)	–2.86 (0.03)	4.63 (0.07)	0.1108	
85153.931	D ₂ CS	3 _{0,3} – 2 _{0,2}	0.023 (0.007)	–3.46 (0.40)	3.00 (1.14)	0.0073	di
85162.223	HC ¹⁸ O ⁺	1 – 0	0.43 (0.01)	–3.35 (0.03)	3.93 (0.07)	0.1016	
85201.346	HC ₅ N	32 – 31	0.25 (0.02)	–3.89 (0.13)	2.72 (0.26)	0.089	
			0.14 (0.02)	–0.93 (0.22)	2.55 (0.38)	0.053	
85229.27	C ¹³ CH	1 – 0 3/2 – 1/2 $F = 2, 2.5 – 1, 1.5$	0.09 (0.01)	–2.93 (0.11)	4.26 (0.16)	0.0205	
85232.76	C ¹³ CH	1 – 0 3/2 – 1/2 $F = 2, 1.5 – 1, 0.5$	0.07 (0.01)	–2.93 (0.11)	4.26 (0.00)	0.0149	
85247.65	C ¹³ CH	1 – 0 3/2 – 1/2 $F = 1, 0.5 – 0, 0.5$	0.035 (0.006)	–2.93 (0.11)	4.26 (0.00)	0.0078	
85256.96	C ¹³ CH	1 – 0 3/2 – 1/2 $F = 1, 1.5 – 0, 0.5$	0.06 (0.01)	–2.93 (0.11)	4.26 (0.00)	0.0133	
85265.507	t-CH ₃ CH ₂ OH	6 _{0,6} – 5 _{1,5}	0.06 (0.01)	–2.12 (0.41)	5.89 (0.53)	0.0094	
85307.459	C ¹³ CH	1 – 0 1/2 – 1/2 $F = 1, 1.5 – 1, 1.5$	0.06 (0.006)	–2.62 (0.23)	4.20 (0.44)	0.014	
85338.906	c-C ₃ H ₂	2 _{1,2} – 1 _{0,1}	1.51 (0.01)	–3.08 (0.01)	3.72 (0.01)	0.3807	
85347.869	HCS ⁺	2 – 1	0.71 (0.01)	–3.01 (0.09)	3.93 (0.01)	0.1694	
85442.6	CH ₃ CCH	5 ₃ – 4 ₃	0.26 (0.00)	–3.24 (0.01)	4.09 (0.00)	0.0587	
85450.765	CH ₃ CCH	5 ₂ – 4 ₂	0.43 (0.00)	–3.24 (0.01)	4.09 (0.00)	0.0978	
85455.665	CH ₃ CCH	5 ₁ – 4 ₁	1.02 (0.00)	–3.24 (0.01)	4.09 (0.00)	0.2348	
85457.299	CH ₃ CCH	5 ₀ – 4 ₀	1.27 (0.01)	–3.24 (0.01)	4.09 (0.01)	0.2910	
85531.512	HOCO ⁺	4 _{0,4} – 4 _{1,3}	0.03 (0.006)	–3.41 (0.28)	2.78 (0.63)	0.011	m
85568.074	CH ₃ OH	6 _{-2,5} – 7 _{-1,7} E	0.10 (0.01)	–3.41 (0.14)	4.08 (0.37)	0.0238	
85634.00	C ₄ H	9 – 8 $J = 19/2 – 17/2$	0.17 (0.01)	–2.85 (0.03)	2.60 (0.04)	0.0631	
85672.57	C ₄ H	9 – 8 $J = 17/2 – 15/2$	0.16 (0.01)	–2.85 (0.03)	2.60 (0.00)	0.0561	
85656.418	c-C ₃ H ₂	4 _{3,2} – 4 _{2,3}	0.039 (0.005)	–3.67 (0.18)	3.20 (0.75)	0.0113	
85715.424	CH ₂ CHCN	9 _{2,7} – 8 _{2,6}	0.03 (0.006)	–3.42 (0.28)	2.71 (0.50)	0.010	
85759.188	²⁹ SiO	2 – 1 $\nu = 0$	0.20 (0.01)	–3.29 (0.11)	6.44 (0.01)	0.0292	
85926.270	NH ₂ D	1 _{1,1} – 1 _{0,1}	0.99 (0.02)	–2.94 (0.06)	7.09 (0.15)	0.131	hfs

Таблица 4. Окончание

Частота, МГц	Молекула	Переход	$\int T_R dV$, К·км/с	V_{LSR} , км/с	ΔV , км/с	T_R , К	Приме- чание
86054.967	HC ¹⁵ N	1 – 0	1.23 (0.01)	–3.02 (0.02)	4.60 (0.01)	0.2512	
86093.983	SO	$N, J = 2, 2 - 1, 1$	2.27 (0.01)	–2.59 (0.01)	5.33 (0.03)	0.3997	
86181.413	CCS	$N, J = 7, 6 - 6, 5$	0.13 (0.01)	–2.98 (0.13)	3.72 (0.33)	0.0337	
86338.736	H ¹³ CN	1 – 0 $F = 1 - 1$	1.95 (0.01)	–3.38 (0.00)	4.56 (0.00)	0.4028	
86340.176	H ¹³ CN	1 – 0 $F = 2 - 1$	3.06 (0.01)	–3.38 (0.00)	4.56 (0.01)	0.6308	
86342.255	H ¹³ CN	1 – 0 $F = 0 - 1$	0.71 (0.01)	–3.38 (0.00)	4.56 (0.00)	0.1474	
86546.18	t-HCOOH	$4_{1,4} - 3_{1,3}$	0.10 (0.01)	–3.11 (0.22)	4.56 (0.74)	0.0214	
86615.602	CH ₃ OH	$7_{2,6} - 6_{3,3} A^{--}$	0.11 (0.01)	–3.17 (0.23)	3.67 (0.57)	0.0283	
86670.82	HCO	$1_{0,1} - 0_{0,0} 3/2 - 1/2$ $F = 2 - 1$	0.51 (0.00)	–2.53 (0.02)	2.87 (0.03)	0.1667	
86708.35	HCO	$1_{0,1} - 0_{0,0} 3/2 - 1/2$ $F = 1 - 0$	0.36 (0.01)	–2.53 (0.02)	2.87 (0.00)	0.1172	
86754.288	H ¹³ CO ⁺	1 – 0	4.10 (0.01)	–3.35 (0.00)	4.09 (0.00)	0.9428	
86777.43	HCO	$1_{0,1} - 0_{0,0} 1/2 - 1/2$ $F = 1 - 1$	0.31 (0.01)	–2.85 (0.04)	2.92 (0.07)	0.1009	
86805.75	HCO	$1_{0,1} - 0_{0,0} 1/2 - 1/2$ $F = 0 - 1$	0.13 (0.01)	–2.85 (0.04)	2.92 (0.00)	0.0409	
86846.995	SiO	2 – 1 $v = 0$	1.70 (0.02)	–3.27 (0.26)	4.59 (0.26)	0.3483	
			1.52 (0.02)	–3.40 (0.26)	16.60 (0.26)	0.0859	
86902.947	CH ₃ OH	$7_{2,5} - 6_{3,4} A^{++}$	0.09 (0.01)	–3.34 (0.15)	3.48 (0.67)	0.0236	
87 57.258	HC ¹⁷ O ⁺	1 – 0 $F = 7/2 - 5/2$	0.14 (0.01)	–3.21 (0.30)	6.47 (0.80)	0.0200	
+87056.966	HC ¹⁷ O ⁺	1 – 0 $F = 3/2 - 5/2$					
+87058.294	HC ¹⁷ O ⁺	1 – 0 $F = 5/2 - 5/2$					
87090.859	HN ¹³ C	1 – 0 $F = 2 - 1$	1.73 (0.01)	–2.97 (0.01)	4.32 (0.03)	0.3771	
87143.198	CH ₃ OCHO	$7_{3,4} - 6_{3,3} E$	0.09 (0.01)	–3.74 (0.37)	5.66 (0.76)	0.0141	
87163	U		0.05 (0.007)	–3.42 (0.14)	1.95 (0.38)	0.024	
87284.156	C ₃ H	1 – 0 $3/2 - 1/2$ $F = 1 - 1$	1.03 (0.00)	–2.78 (0.02)	3.70 (0.01)	0.2624	
87313	U		0.17 (0.01)	–5.11 (0.09)	2.97 (0.12)	0.0539	
87316.925	C ₃ H	1 – 0 $3/2 - 1/2$ $F = 2 - 1$	7.10 (0.01)	–3.01 (0.00)	4.23 (0.00)	1.5753	
87328.624	C ₂ H	1 – 0 $3/2 - 1/2$ $F = 1 - 0$	4.19 (0.01)	–3.01 (0.00)	4.23 (0.00)	0.9312	
87398	U		0.04 (0.01)	–4.73 (0.21)	1.70 (0.43)	0.020	
87402.004	C ₂ H	1 – 0 $1/2 - 1/2$ $F = 1 - 1$	4.32 (0.01)	–3.01 (0.00)	4.23 (0.00)	0.9580	
+87407.165	C ₂ H	1 – 0 $1/2 - 1/2$ $F = 0 - 1$	2.14 (0.01)	–3.01 (0.00)	4.23 (0.00)	0.4748	
87446.512	C ₂ H	1 – 0 $1/2 - 1/2$ $F = 1 - 0$	1.18 (0.01)	–3.01 (0.00)	4.23 (0.00)	0.2615	
87863.63	HC ₅ N	33 – 32	0.20 (0.01)	–2.83 (0.12)	5.01 (1.11)	0.0381	

Примечание. m – обнаружение на пределе чувствительности; bl – линия блендируется с соседними; bw – у линии есть голубое крыло; gw – у линии есть красное крыло; di – сомнительная идентификация; hfs – линия обладает сверхтонкой структурой; new – линия отсутствует в базе данных Ловаса [19]; mas – мазерная линия.

двух- или трехатомных молекул, таких как SO, SiO и CCH, до сложных органических соединений, таких как CH₃OSHO или CH₃OCH₃. Существенная часть полученных результатов качественно повторяет результаты обзора этого же источника на волне 3 мм. Списки молекул, обнаруженных на волнах 3 и 4 мм, в значительной степени пересекаются. Основную часть составляют молекулы, типичные для плотных ядер в областях звездообразования, такие, как HC₃N или CH₃CCH. С помощью вращательных диаграмм, построенных по линиям CH₃CN, CH₃CCH, HC₃N, определена температура излучающей области, которая оказалась порядка 30–40 К.

Обнаружено 18 сложных органических молекул. По современным представлениям эти молекулы возникают в мантиях межзвездных пылинок и поступают в газовую фазу либо в результате испарения мантий в горячих ядрах вокруг протозвезд, либо за счет нетепловой десорбции в более холодном газе. К сожалению, по данным нашего обзора, проводившегося в одном направлении, невозможно однозначно установить, в каких областях возникает излучение СОМ — в горячих ядрах или в окружающем газе, там же, где и излучение остальных найденных молекул. Лишь для метанола (CH₃OH) удалось зарегистрировать ряд переходов между уровнями высокой энергии, и выделить два компонента, холодный и горячий. Холодный компонент дает низкоэнергетические линии с энергией уровней ниже 100 К, а горячий — высокоэнергетические линии с энергией уровней выше 100 К. Низкоэнергетические линии могут возникать в тех же областях, что и линии CH₃CCH, CH₃CN, HC₃N. Высокоэнергетические линии могут возникать в газе с температурой выше 100 К, например, в горячих ядрах, обнаруженных Мином и др. [11]. У всех остальных СОМ зарегистрированы лишь низкоэнергетические линии, которые, предположительно, возникают в плотных облаках.

Определены лучевые концентрации обнаруженных молекул и получены значения их относительного содержания. Для ряда простых молекул эти значения соответствуют тем, которые являются типичными для плотных облаков при концентрации молекул H₂ порядка 10⁴–10⁵ см⁻³.

Девять молекул, в том числе сложные соединения CH₃C₃N, CH₃CH₂CN, CH₃COCH₃, найдены с помощью сложения спектральных линий. Это демонстрирует, насколько полезным может быть данный метод при анализе данных широкополосных спектральных обзоров.

ПРОЦЕДУРА СЛОЖЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В данном разделе описано, как проводится непосредственно сложение спектральных линий, когда искомая молекула и вращательная температура уже выбраны. Предполагается ЛТР при выбранной температуре. Сначала из каталогов JPL или CDMS выбираются линии искомой молекулы, частоты которых попадают в диапазон обзора. Из полученного списка исключаются линии, у которых погрешность частоты и/или энергия верхнего уровня превышают пороговые значения. Для погрешности частоты пороговое значение было выбрано равным 0.5 МГц, что вблизи низкочастотной границы полосы обзора соответствует 2.1 км/с, т.е. типичной полуширине линии в DR21OH на уровне половинной интенсивности, а для энергии верхнего уровня — 1000 К.

Далее, используя параметры спектральных линий, приведенные в каталогах, находится сильнейшая линия среди всех отобранных (в дальнейшем — опорная линия). Так как лучевая концентрация искомой молекулы неизвестна, невозможно найти яркостные температуры спектральных линий, однако, используя принятое значение вращательной температуры, можно найти отношения яркостных температур разных линий. Этого достаточно для того, чтобы рассчитать веса разных линий.

В каталогах JPL и CDMS приведена интенсивность I (см⁻¹/(мол/см²)), которая пропорциональна оптической толще линии в максимуме, $\tau^{\max}$:

$$I = \frac{\kappa_v}{f(v)n} \frac{\tau(v)}{f(v)N} \propto \frac{\tau^{\max} \Delta v}{N}, \quad (A1)$$

где N — лучевая концентрация молекулы, $\tau(v)$ — оптическая толща линии в зависимости от частоты, $f(v)$ — нормированная функция, описывающая профиль линии, $\tau^{\max}$ — оптическая толща линии в максимуме, Δv — ширина линии (FWHM). Отсюда можно найти оптическую толщу линии в максимуме (с точностью до некоторого коэффициента, зависящего от N и одинакового для всех линий). Далее из всех выбранных линий находится сильнейшая, т.е. линия с наибольшим значением оптической толщи. Этой линии приписывается какая-либо оптическая толща. Тогда для оптических толщин остальных линий можно получить соотношение:

$$\tau_i^{\max} = \tau_{\text{ref}}^{\max} \frac{I_i}{I_{\text{ref}}} \frac{v_i}{v_{\text{ref}}}. \quad (A2)$$

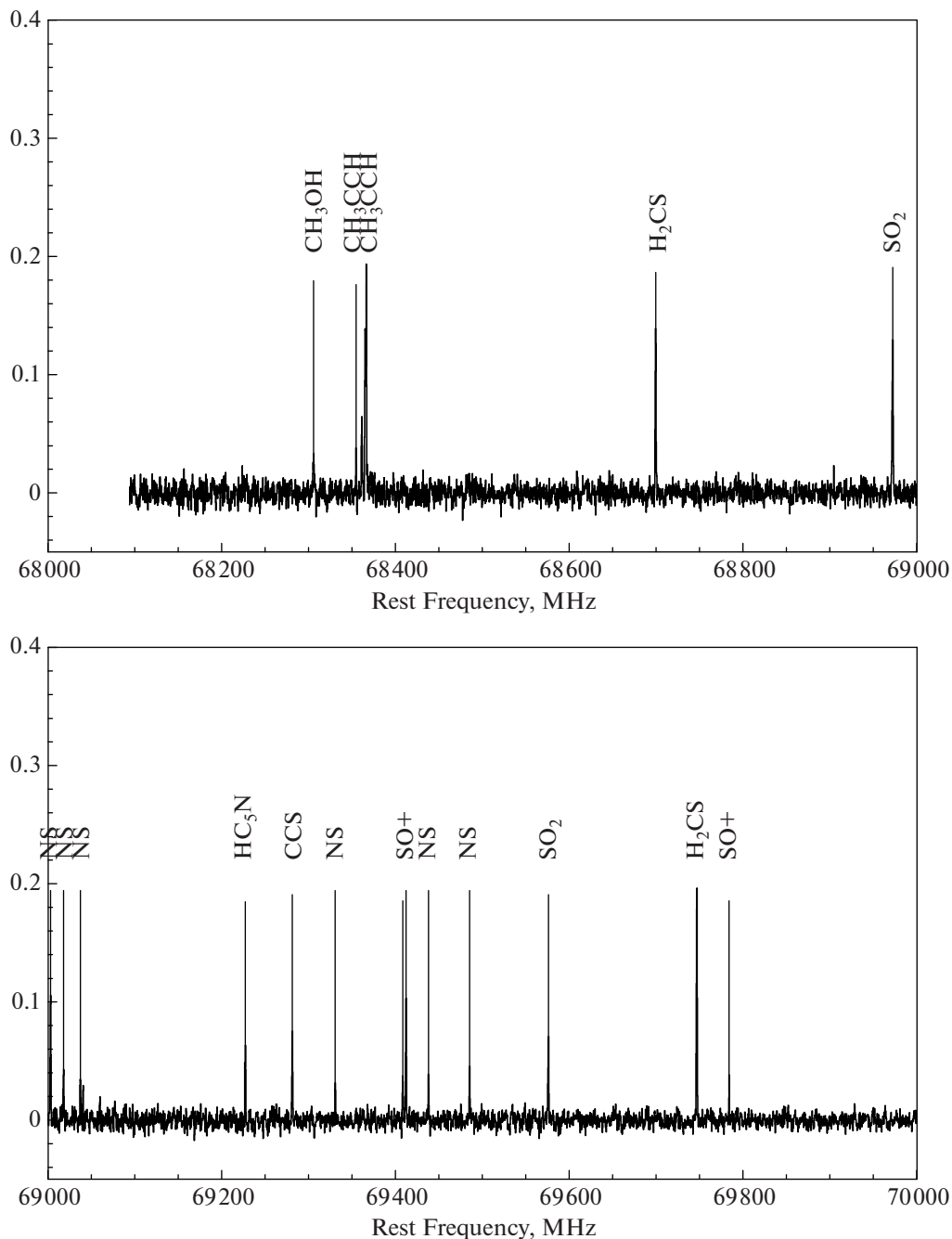


Рис. 5. Спектр DR21OH в диапазоне частот 68–88 ГГц. По оси X отложена частота покоя в МГц, по оси Y – радиативная температура в градусах Кельвина.

Здесь предполагается, что ширины всех линий в единицах скорости одинаковы, при этом $\Delta v_i \propto v_i$. Зная оптическую толщину τ_i , яркостную температуру каждой линии ΔT_i можно найти с помощью соотношения:

$$\Delta T_i = (T_{\text{ex}} - T_{\text{bg}})(1 - \exp^{-\tau_i}), \quad (\text{A3})$$

где T_{ex} и T_{bg} – Рэлей-Джинсовские эквиваленты температуры возбуждения и реликтового фона. Температура возбуждения принимается равной кинетической температуре (условие ЛТР).

После того, как найдена яркостная температура каждой линии, рассчитываются соотношения $R_i = T_i/T_{\text{ref}}$, где T_i – яркостная температура

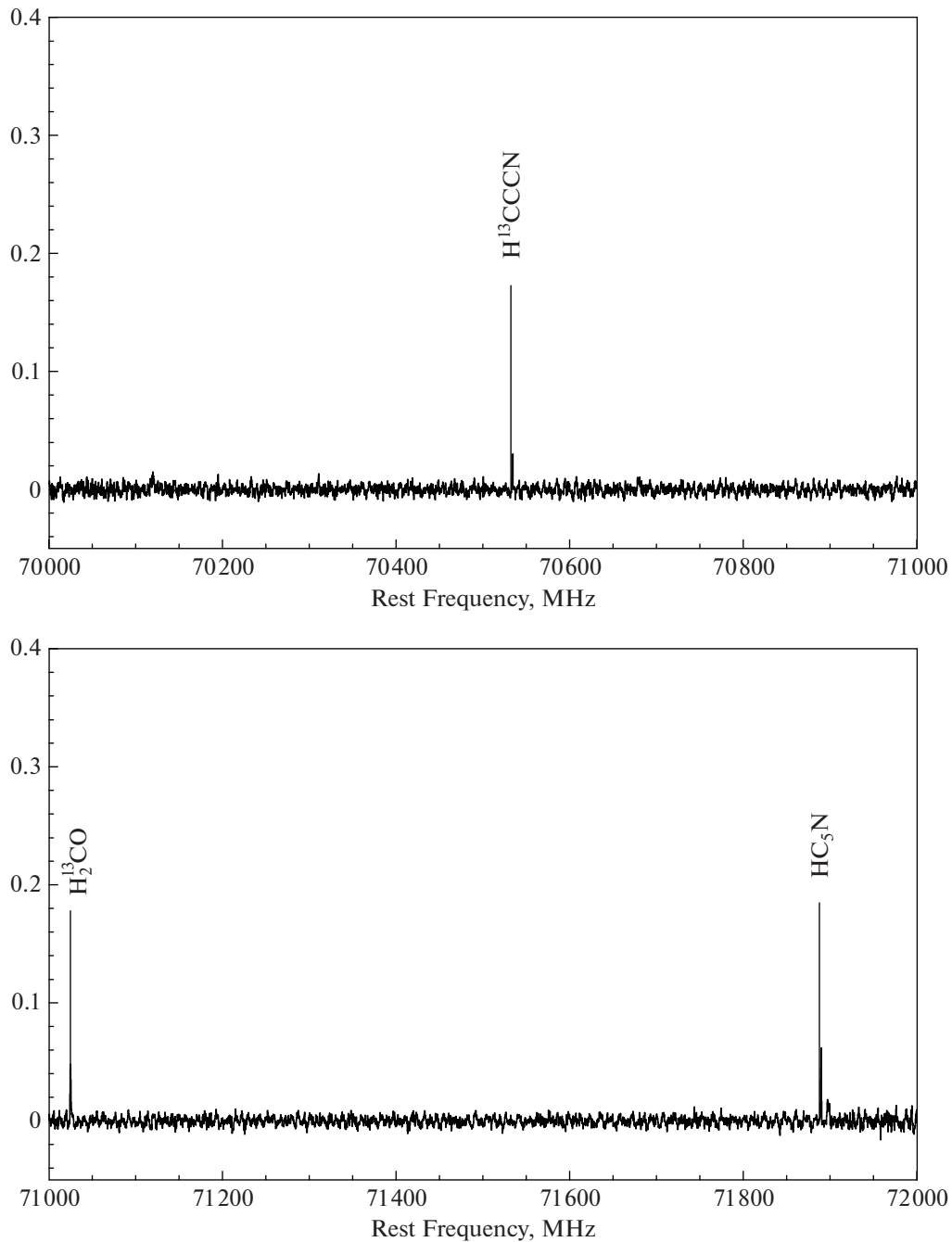


Рис. 5. Продолжение

i -й линии, а T_{ref} — яркостная температура опорной линии. Из дальнейшего рассмотрения исключаются все линии, для которых это соотношение меньше или равно 0.01. Затем из наблюдаемого спектра вырезаются узкополосные участки одинаковой ширины, центрированные на частоты

отобранных линий искомой молекулы, и каждый из них поканально делится на соответствующее значение R_i . При этом во всех узкополосных спектрах яркостные температуры линий выравниваются, а среднеквадратичные отклонения шумов возрастают пропорционально величинам R_i .

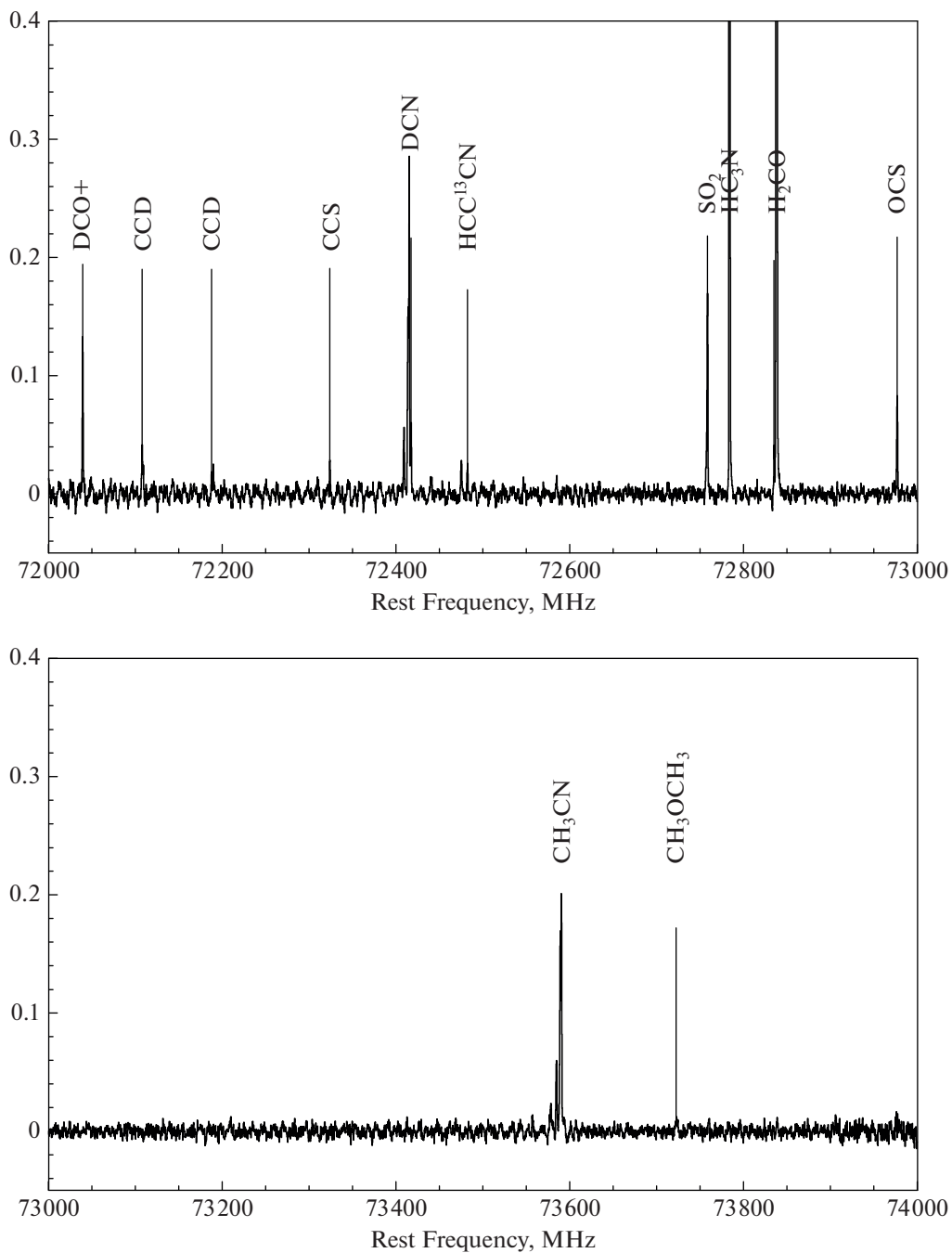


Рис. 5. Продолжение

Затем эти спектры складываются с весами, каждый из которых обратно пропорционален дисперсии шумов соответствующего спектра, причем вес опорной линии выбирается равным единице. Результат суммирования делится на сумму весов. При таком подходе амплитуда СЛ оказыва-

ется примерно равной амплитуде опорной линии, а уровень шумов относительно исходного спектра понижается в $\sqrt{\sum (w_i)}$ раз.

Размеры источников, в которых мы ищем новые молекулы, неизвестны. Если предположить,

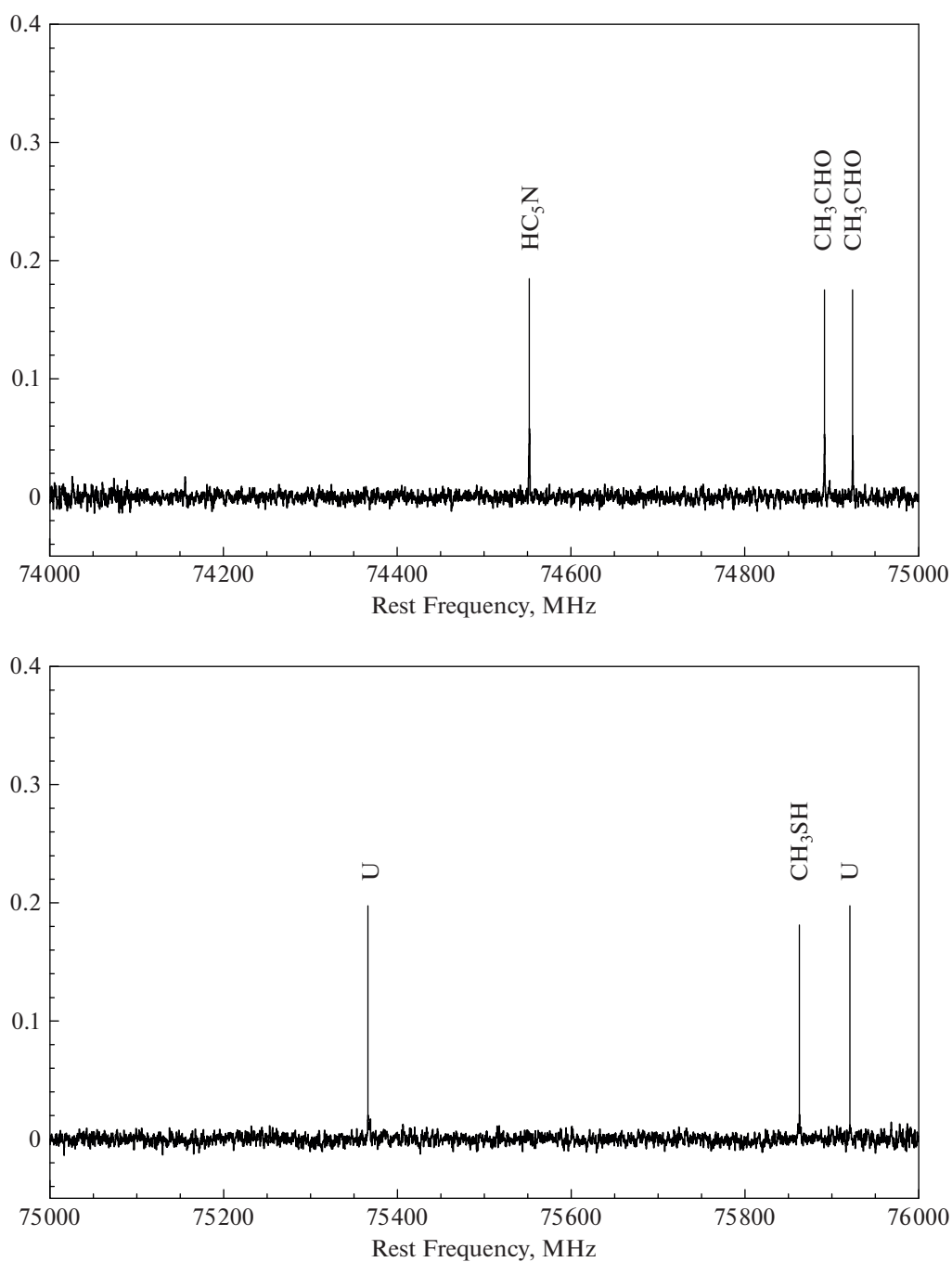


Рис. 5. Продолжение

что они сравнимы с шириной главного луча диаграммы направленности, то слабые линии, возникающие в таких источниках, должны быть оптически тонкими. Оптическая толщина наиболее сильной линии $\tau_{\text{ref}}^{\text{max}}$ по умолчанию установлена равной

0.1, и в данном обзоре мы принимали ее равной этой величине. Точное значение оптической толщи, при условии, что $\tau_{\text{ref}}^{\text{max}} \ll 1$, для вычисления весов не имеет значения. Однако в ДН телескопа могут попадать компактные объекты. Например, в

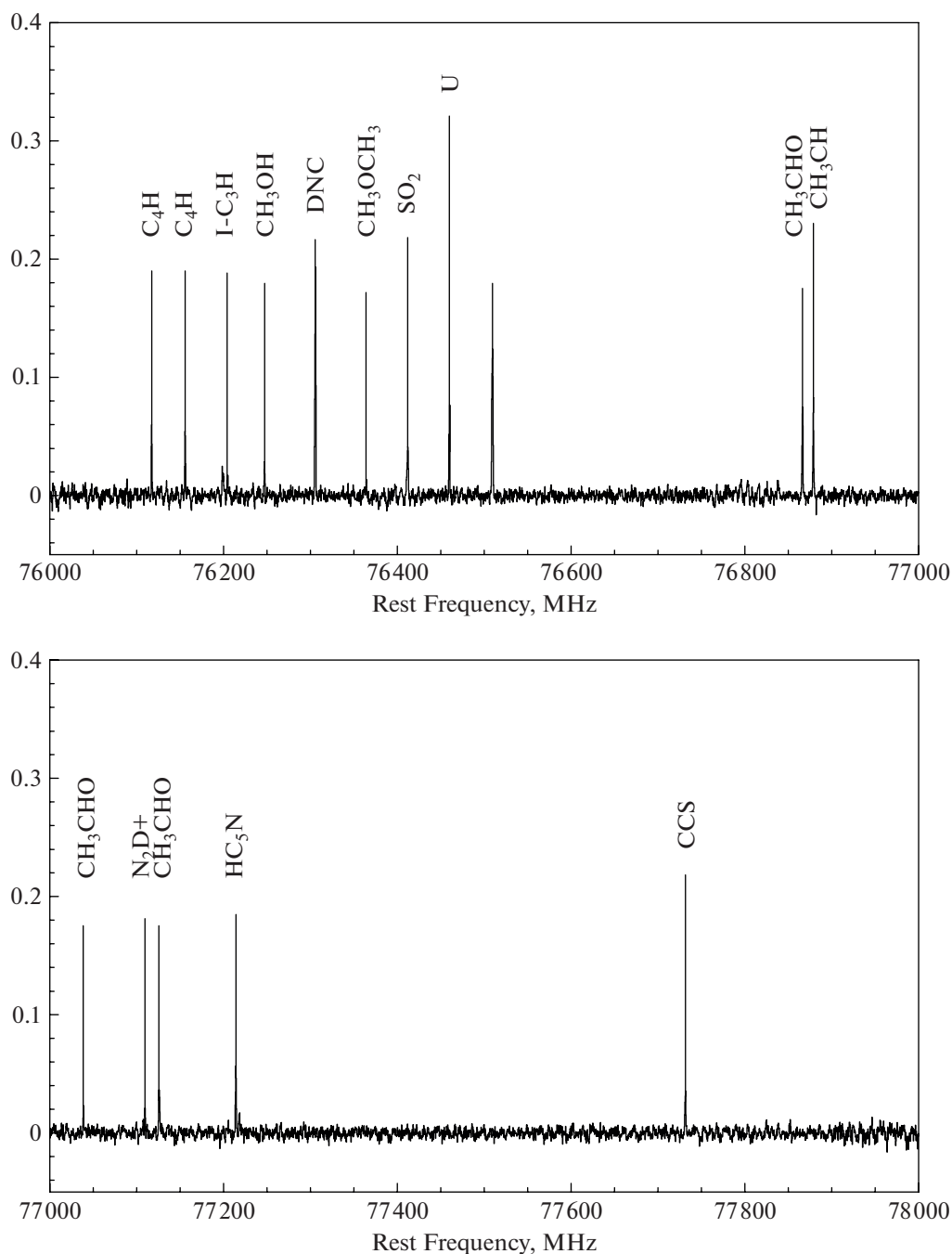


Рис. 5. Продолжение

нашем обзоре в диаграмму попадали горячие ядра ММ1а и ММ1б. Размеры этих источников много меньше ширины главного луча ДН, поэтому слабость линий, возникающих в них, не означает, что линии обязательно являются оптически тонкими.

В этом случае выбор весов линий, сделанный в предположении, что линии являются оптически тонкими, оказывается неоптимальным, что может в некоторых случаях помешать обнаружить молекулу. Поэтому на последнем этапе имеет смысл

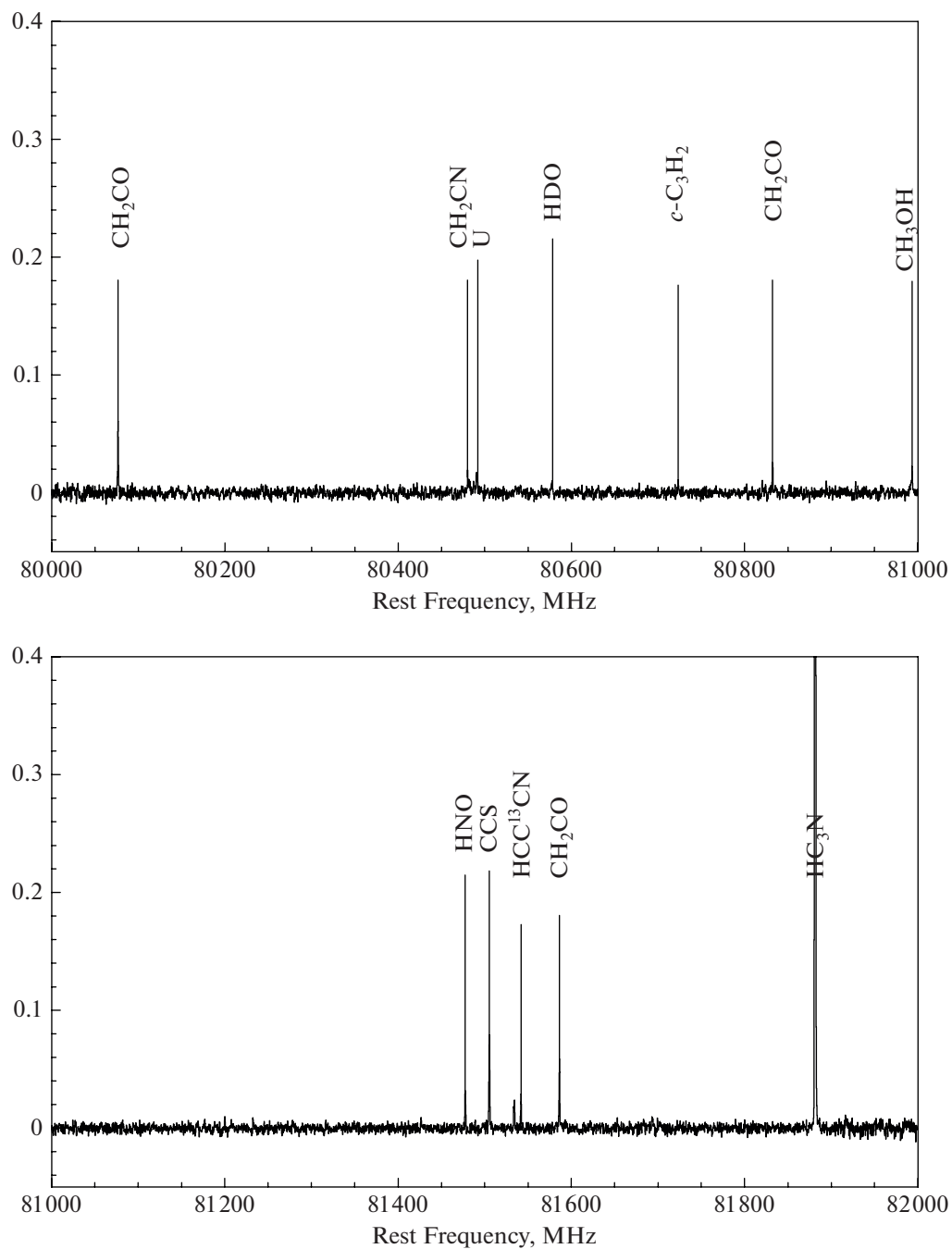


Рис. 5. Продолжение

повторить эту процедуру в предположении, что линии не являются оптически тонкими. Мы построили синтетические спектры для всех молекул, данные по которым приведены в каталогах спек-

тральных линий JPL и CDMS, устанавливая оптическую толщину опорной линии каждой искомой молекулы равной 10. Однако ни одной новой молекулы обнаружить при этом не удалось.

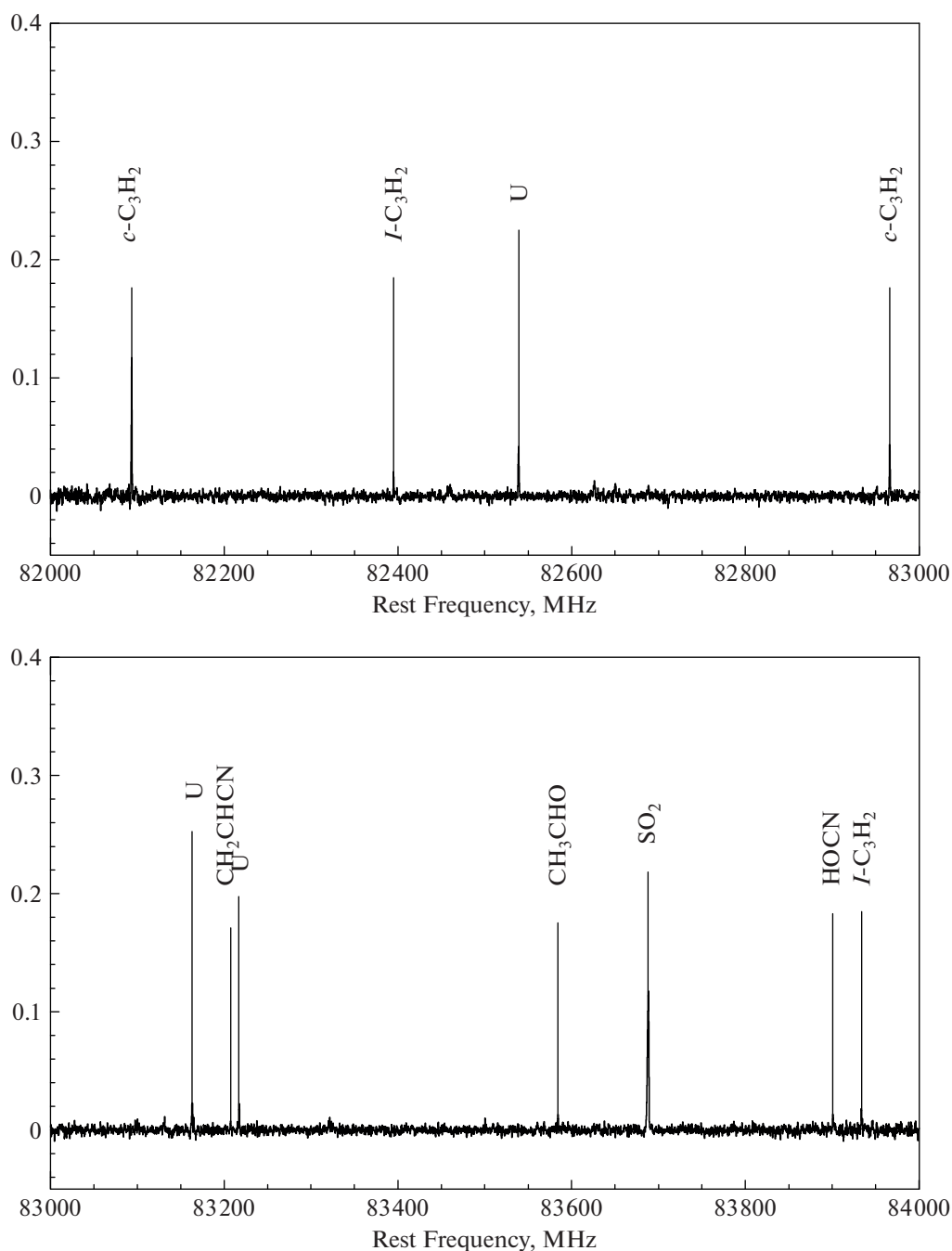


Рис. 5. Продолжение

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа С.В. Каленского была поддержана за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-597, а работа Е.А. Михеевой — за счет Государственной программы Российской Федерации ГЗ019АКЦ009 109.61.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны П. Бергману и А.О.Х. Улофссону (космическая обсерватория Онсала) за помощь в подготовке заявки и проведении наблюдений, и анонимному рецензенту за полезные замечания. Национальная исследовательская инфраструктура космиче-

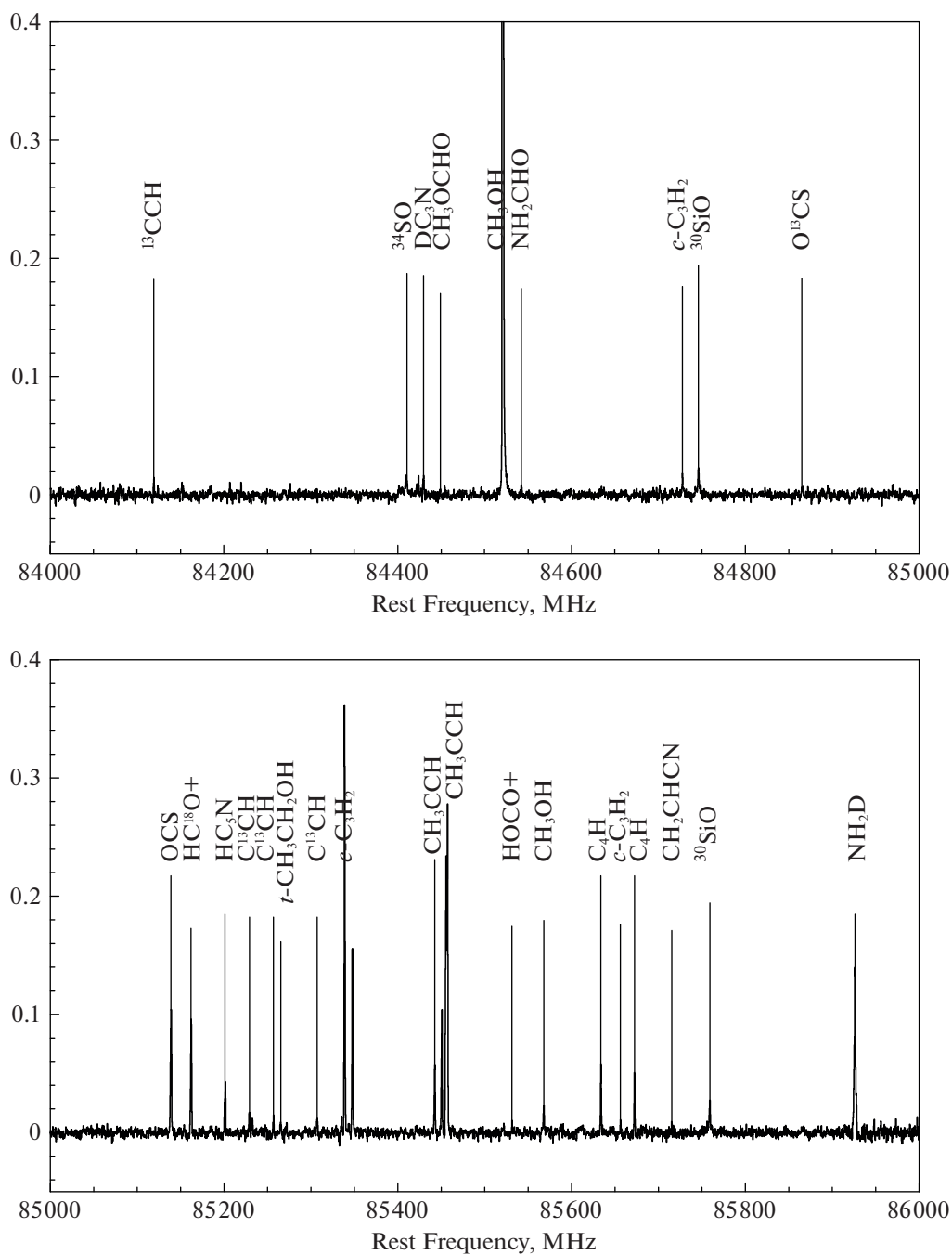


Рис. 5. Продолжение

ской обсерватории Онсала финансируется за счет гранта Шведского исследовательского совета № 2017-00648. В работе используется система астрофизических данных НАСА, а также следующие базы данных: каталог обнаруженных в космосе молекулярных радиолний [19], Кельнская база данных для молекуляр-

ной спектроскопии [20, 21]; каталог спектральных линий JPL [22].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

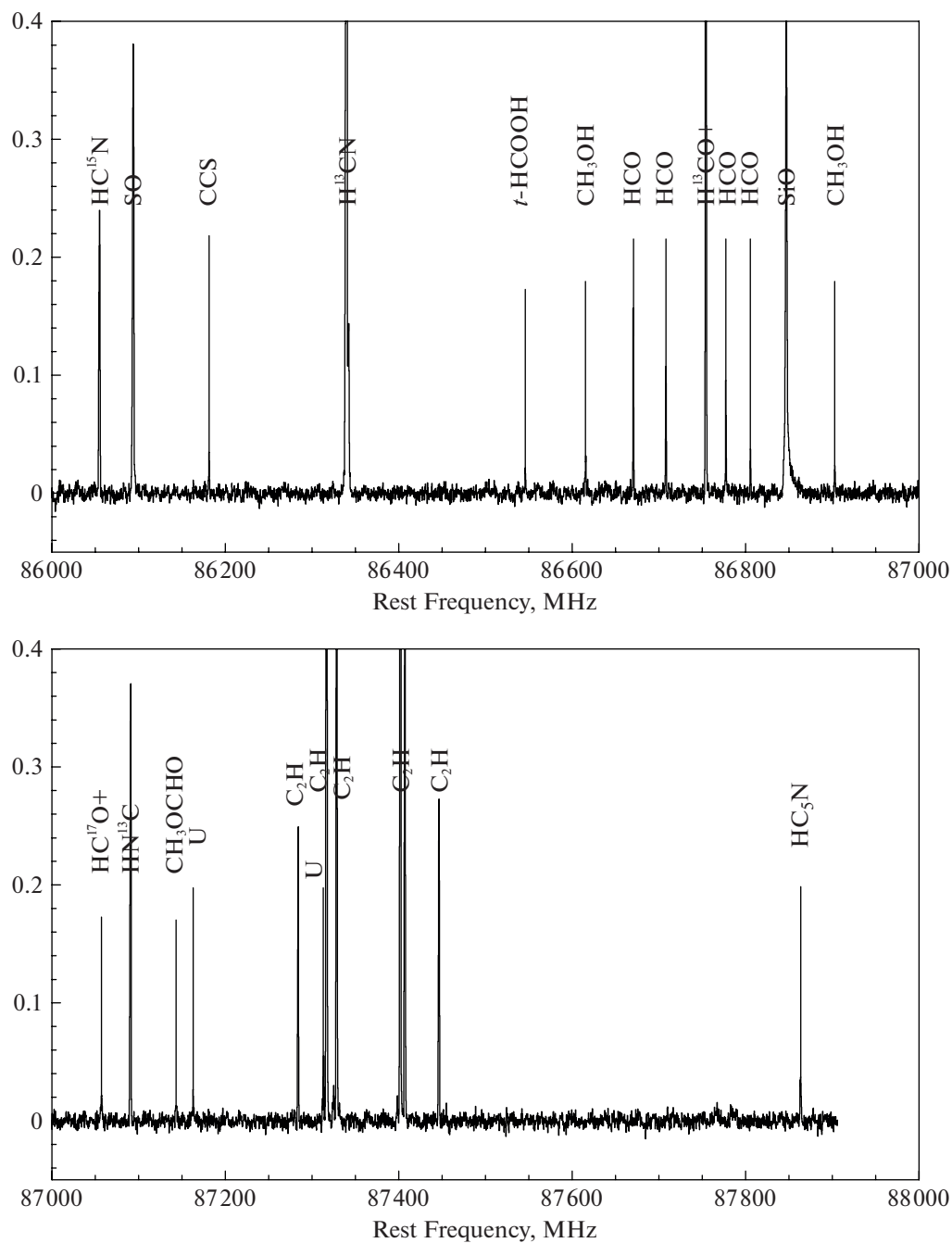


Рис. 5. Окончание

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. L. J. Rygl, A. Brunthaler, A. Sanna, K. M. Menten, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **539**, id. A79 (2012).
2. P. M. Harvey, M. Joy, D. F. Lester, and B. A. Wilking, *Astrophys. J.* **300**, 737 (1986).
3. M. Hennemann, F. Motte, N. Schneider, P. Didelon, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **543**, id. L3 (2012).
4. P. M. Harvey, M. F. Campbell, and W. F. Hoffmann, *Astrophys. J.* **211**, 786 (1977).
5. J. G. Mangum, A. Wootten, and L. G. Mundy, *Astrophys. J.* **378**, 576 (1991).
6. J. G. Mangum, A. Wootten, and L. G. Mundy, *Astrophys. J.* **388**, 467 (1992).
7. S. Padin, A. I. Sargent, L. G. Mundy, N. Z. Scoville, *et al.*, *Astrophys. J.* **337**, 45 (1989).
8. L. A. Zapata, L. Loinard, Y.-N. Su, L. F. Rodriguez, K. M. Menten, N. Patel, R. Nimesh, and R. Galván-Madrid, *Astrophys. J.* **744** (2), id. 86 (2012).
9. J. R. Dickel, H. R. Dickel, and W. J. Wilson, *Astrophys. J.* **223**, 840 (1978).

10. *K. Dobashi, T. Shimoikura, Sh. Katakura, F. Nakamura, and Y. Shimajiri*, Publ. Astron. Soc. Japan **71** (SP1), id. S12 (2019).
11. *Y. C. Minh, H.-R. Chen, Y.-N. Su, and S.-Y. Liu*, J. Korean Astron. Soc. **45** (6), 157 (2012).
12. *R. Genzel and D. Downes*, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. **30**, 145 (1977).
13. *R. P. Norris, R. S. Booth, P. J. Diamond, and N. D. Porter*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **201**, 191 (1982).
14. *W. Batrla, P. Pratap, and L. E. Snyder*, Astrophys. J. Letters **330**, L67 (1988).
15. *S.-P. Lai, J. M. Girart, and R. M. Crutcher*, Astrophys. J. **598** (1), 392 (2003).
16. *M. T. Orozco-Aguilera, A. Hernández-Gómez, and L. A. Zapata*, Astron. J. **157**(1), id. 20 (2019).
17. *C. B. Каленский, Л. Е. Б. Юханссон*, Астрон. журн. **87** (4), 335 (2010).
18. *S. V. Kalenskii, R. I. Kaiser, P. Bergman, A. O. H. Olofsson, K. D. Degtyarev, and P. Golysheva*, Astrophys. J. **932** (1), id. 5 (2022).
19. *F. J. Lovas, J. E. Bass, R. A. Dragoset, and K. J. Olsen*, NIST Recommended Rest Frequencies for Observed Interstellar Molecular Microwave Transitions. 2009 Revision, version 3.0. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899 (2009), <http://physics.nist.gov/restfreq>.
20. *H. S. P. Müller, F. Schlöder, J. Stutzki, and G. Winnewisser*, J. Molecular Structure **742** (1–3), 215 (2005).
21. *H. S. P. Müller, S. Thorwirth, D. A. Roth, and G. Winnewisser*, Astron. and Astrophys. **370**, L49 (2001).
22. *H. M. Pickett, R. L. Poynter, E. A. Cohen, M. L. Delitsky, J. C. Pearson, and H. S. P. Müller*, J. Quant. Spectroscop. Radiative Transfer **60**, 883 (1998).
23. *M. Padovani, D. Galli, and A. E. Glassgold*, Astron. and Astrophys. **501**, 619 (2009).
24. *G. A. Blake, E. C. Sutton, C. R. Masson, and T. G. Phillips*, Astrophys. J. **315**, 621 (1987).
25. *J. Askne, B. Hoglund, A. Hjalmarson, and W. M. Irvine*, Astron. and Astrophys. **130**, 311 (1984).
26. *R. B. Loren and L. G. Mundy*, Astrophys. J. **286**, 232 (1984).
27. *F. F. S. van der Tak, J. H. Black, F. L. Schöier, D. J. Jansen, and E. F. van Dishoeck*, Astron. and Astrophys. **468**, 627 (2007).
28. *C. B. Каленский, C. Куртц*, Астрон. журн. **93**, 692 (2016).
29. *M. Agundez, J.-C. Loison, K. M. Hickson, V. Wakelam, et al.*, Astron. and Astrophys. **673**, id. A34 (2023).
30. *S. Spezzano, A. Fuente, P. Caselli, A. Vasyunin, et al.*, Astron. and Astrophys. **657**, id. A10 (2022).
31. *M. Rodríguez-Baras, A. Fuente, P. Rivière-Marichalar, D. Navarro-Almáida, et al.*, Astron. and Astrophys. **648**, id. A120 (2021).
32. *L. E. B. Johansson, C. Andersson, J. Ellder, P. Friberg, et al.*, Astron. and Astrophys. **130**, 227 (1984).
33. *C. B. Каленский, Л. Е. Б. Юханссон*, Астрон. журн. **87** (12), 1176 (2010).
34. *S. V. Kalenskii*, in *Proc. of the Russian-Indian workshop on radio astronomy and star formation*, October 10–12, 2016; edited by I. Zinchenko and P. Zemlyanukha, Institute of Applied Physics RAS, p. 43 (2017); arXiv:1708.06829 [astro-ph.GA].
35. *B. A. McGuire, A. M. Burkhardt, S. V. Kalenskii, C. N. Shingledecker, A. Remijan, E. Herbst, and M. C. McCarthy*, Science **359** (6372), 202 (2018).
36. *R. A. Loomis, A. M. Burkhardt, C. N. Shingledecker, S. B. Charnley, et al.*, Nature Astron. **5**, 188 (2021).
37. *Y.-J. Kuan, S. B. Charnley, H.-C. Huang, W.-L. Tseng, and Z. Kisiel*, Astrophys. J. **593**, 848 (2003).
38. *L. E. Snyder, F. J. Lovas, J. M. Hollis, D. N. Friedel, et al.*, Astrophys. J. **619**, 914 (2005).

SPECTRAL SURVEY OF THE STAR FORMATION REGION DR21OH IN THE 4-mm WAVELENGTH RANGE

S. V. Kalenskii^a and E. A. Mikheeva^{a,b}

^a*Physical Institute of P.N. Lebedev RAS, Astrospace Center, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

The results of a spectral survey of the star-forming region DR21OH in the 4 mm wavelength range are presented. Sixty-nine molecules and their isotopologues have been detected, ranging from simple diatomic or triatomic molecules, such as SO, SiO and CCH, to complex organic species, such as CH₃OCHO or CH₃OCH₃. A part of the results qualitatively repeat the results of the survey of the same source at 3 mm. The inventories of molecules found at 3 and 4 mm overlap to a great extent. However, at 4 mm we found a number of species that have no allowed transitions in the 3 mm wavelength range, e.g. DCN, DNC, or SO⁺. The bulk of the molecules detected at 4 mm are those that are common for dense cores, e.g., HC₃N or CH₃CCH, but some of the detected molecules are typical for hot cores. The latter include complex organic molecules CH₃OCHO, CH₃CH₂OH, CH₃OCH₃, etc. However, the detected emission of these molecules probably arise in a gas heated to 30 K only. Nine molecules, including complex species CH₃C₃N, CH₃CH₂CN, CH₃COCH₃, were found by spectral line stacking. This demonstrates the prospects of the method for the study of molecular clouds.

Keywords: spectra, star forming regions, molecular clouds, radio waves, complex organic molecules