

УДК 524.5-36-52

ГАЗОФАЗНАЯ И ПОВЕРХНОСТНАЯ ХИМИЯ В ОБЛАСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД RCW 120

© 2025 К. В. Плакитина^{1*}, М. С. Кирсанова¹, Д. З. Вибе¹, О. В. Кочина¹¹Институт астрономии Российской академии наук, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 9 февраля 2025 года; после доработки 1 апреля 2025 года; принята к публикации 5 мая 2025 года

Молекулы в межзвездной среде образуются в газовой фазе и на пылевых частицах. Химические пути этого процесса изучены недостаточно детально, поэтому вопрос о преобладании какого-либо из них для той или иной молекулы остается открытым. Мы проанализировали широкополосные спектры излучения плотного молекулярного сгустка из области RCW 120, полученные на телескопе APEX в диапазоне 200–260 ГГц, чтобы изучить пути синтеза молекул в областях образования массивных звезд, находящихся на ранней стадии эволюции. Рассмотрены корреляции между наблюдаемыми лучевыми концентрациями молекул, полученными в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Обнаружено превышение содержания метанола в южной части плотного сгустка по сравнению с его северной частью при сравнимых содержаниях других молекул, например CH_3CN и CH_3CCN , а также относительно других кислородсодержащих молекул, например OCS и SO . Для выявления возможных причин повышенного содержания метанола в южной части облака мы провели моделирование с помощью астрохимической модели *Presta* в двухфазном приближении: с учетом химических процессов в газе и мантиях пылевых частиц. При величине A_V от 4^m до 6^m метанол эффективно десорбирует из ледяных мантий пылинок в результате их взаимодействия с фотонами, но еще не разрушается ультрафиолетовым излучением в газовой фазе. Сильная линейная корреляция концентраций молекул указывает на то, что они образуются в одной фазе — либо в газе, либо на пыли. Корреляция отсутствует, если одна из молекул образуется в газе, а вторая в пылевых мантиях, как, например, CCN и CH_3OH . Слабая корреляция метанола и кислородсодержащих молекул, образующихся на пыли, свидетельствует о том, что в южной части облака разрушается только верхняя часть мантий пылевых частиц, богатая CO -льдом.

Ключевые слова: *астрохимия — звезды: формирование — МЗС: молекулы — области фото-диссоциации — радиолинии: МЗС*

1. ВВЕДЕНИЕ

В современную эпоху, когда рутинными стали обзоры областей звездообразования в миллиметровом диапазоне со сверхвысоким ($R \geq 10^7$) спектральным разрешением (Pety et al., 2017), в том числе обзоры галактической плоскости (Rathborne et al., 2016), 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 (Orkisz et al., 2017; Gratier et al., 2021). 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 этой работе мы рассматриваем возможность исследования астрохимических путей образования молекул на основе статистических методов анализа. Из многочисленных наблюдений и моделирования известно, например, что малоатомные углеводороды, такие как CCN , образуются в газовой фазе, причем этот процесс может идти как от простых соединений к сложным (Murga et al., 2020; 2023), так и наоборот (Pety et al., 2005; Awad and Viti, 2022). Другие малоатомные молекулы, например SO и OCS (Ferrante et al., 2008), могут также образовываться и на пыли, однако она особенно важна в качестве катализатора образования сложных органических молекул — метанола и еще более сложных соединений (Watanabe and Kouchi, 2002; Fuchs et al., 2009; Punanova et al., 2022). С другой

*E-mail: plakitina.kv@inasan.ru

стороны, некоторые сложные молекулы, например CH_3CCN и другие длинные углеродные цепочки, образуются в газовой фазе (Agúndez et al., 2021; Burgne et al., 2023). Наконец, многим молекулам, например воды, присущи несколько химических каналов образования (см., например, работу van Dishoeck et al., 2021) и для них актуален вопрос о преобладании какого-либо канала в тех или иных физических условиях.

Использованные нами наблюдательные данные охватывают область плотного молекулярного сгустка с погруженными в него молодыми звездными объектами (МЗО): RCW 120 S1, RCW 120 S2, RCW 120 S9, RCW 120 S10, RCW 120 S39 (далее для краткости обозначение RCW 120 мы опускаем). В этой области содержания молекул определяются одновременным действием нескольких факторов. Сгусток находится на границе области H II RCW 120, поэтому на содержание молекул вблизи фронта ионизации влияет ультрафиолетовое (УФ) излучение массивной звезды. Содержание молекул и яркости молекулярных линий могут зависеть и от наличия МЗО в плотном молекулярном газе. Эту возможность мы также проверяем в настоящей работе.

Наше исследование основано на наблюдательных данных, полученных на телескопе APEX (Güsten et al., 2006) с помощью приемника nFLASH230 (Belitsky et al., 2018) и описанных нами в предыдущей статье (Plakitina et al., 2024), где мы представили результаты по 20 наиболее ярким линиям излучения молекул. Широкополосные спектры, полученные с помощью nFLASH230, приведены на рис. 1. В настоящей работе мы завершаем анализ этих наблюдательных данных.

В разделе 2 мы описываем задействованные в исследовании наблюдательные данные, метод оценки лучевых концентраций молекул и модель, с результатами которой мы сравниваем наблюдения. В разделе 3 проведен корреляционный анализ лучевых концентраций. При помощи моделирования мы ищем причины, которые привели к формированию наблюдаемой картины. В разделе 4 мы обсуждаем особенности разрушения мантий пылевых частиц и то, как они отражаются на содержании молекул в газовой фазе.

2. МЕТОДЫ

2.1. Отождествление спектральных линий

Идентификация спектральных линий излучения молекул в наблюдаемых полосах частот была проведена с помощью расширения WEEDS программного пакета CLASS (Maret et al., 2011) с использованием базы данных Cologne Database for Molecular Spectroscopy (CDMS, Müller et al., 2001)¹. Как и

Plakitina et al. (2024), мы считаем линию обнаруженной, если ее яркость в максимуме превышает пороговое значение 3σ , где σ — стандартное отклонение шума в спектре. Отождествленные в этой работе линии в направлении на пять МЗО показаны на рис. 2, а их спектроскопические параметры приведены в таблице 1.

2.2. Определение содержания молекул

Лучевые концентрации молекул определялись в приближении ЛТР, что оправдано, так как мы исследуем плотный молекулярный сгусток (см. например, Kirsanova et al., 2019, 2021, 2023). Для определения лучевых концентраций молекул в оптически тонком случае $N_{\text{tot}}^{\text{thin}}$ мы использовали уравнение (Mangum and Shirley, 2015):

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

где S — сила линии, μ — дипольный момент молекулы, R_i — относительные интенсивности сверхтонких компонентов, T_{rot} — вращательная температура, $Q(T_{\text{rot}})$ — статистическая сумма по вращательным переходам, g_u — статистический вес уровня, E_u — энергия верхнего уровня, k_B — постоянная Больцмана, T_{ex} — температура возбуждения линии, $J_\nu(T)$ — 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 мы предполагаем, что коэффициент заполнения диаграммы направленности $f = 1$ и $T_{\text{bg}} = 2.7$ К.

Для большинства молекул в качестве T_{ex} мы приняли температуру пыли T_{dust} . В плотных молекулярных сгустках, где состояние газа близко к ЛТР, температура пыли должна быть близка к температуре газа T_{gas} и температуре возбуждения молекул. Используя T_{dust} в качестве T_{ex} , мы получаем для лучевых концентраций молекул лишь оценку снизу, поскольку не имеем возможности оценить линий излучения.

Для молекул H_2CS , OCS , HC_3N , SO и SO_2 , у которых наблюдалось несколько линий излучения, мы построили вращательные диаграммы, по которым оценили T_{ex} (Goldsmith and Langer, 1999; Kalenskii and Kurtz, 2016).

Для оценки содержаний молекул относительно ядер водорода ($N(\text{HI}) + 2N(\text{H}_2)$), далее для

¹<https://cdms.astro.uni-koeln.de>

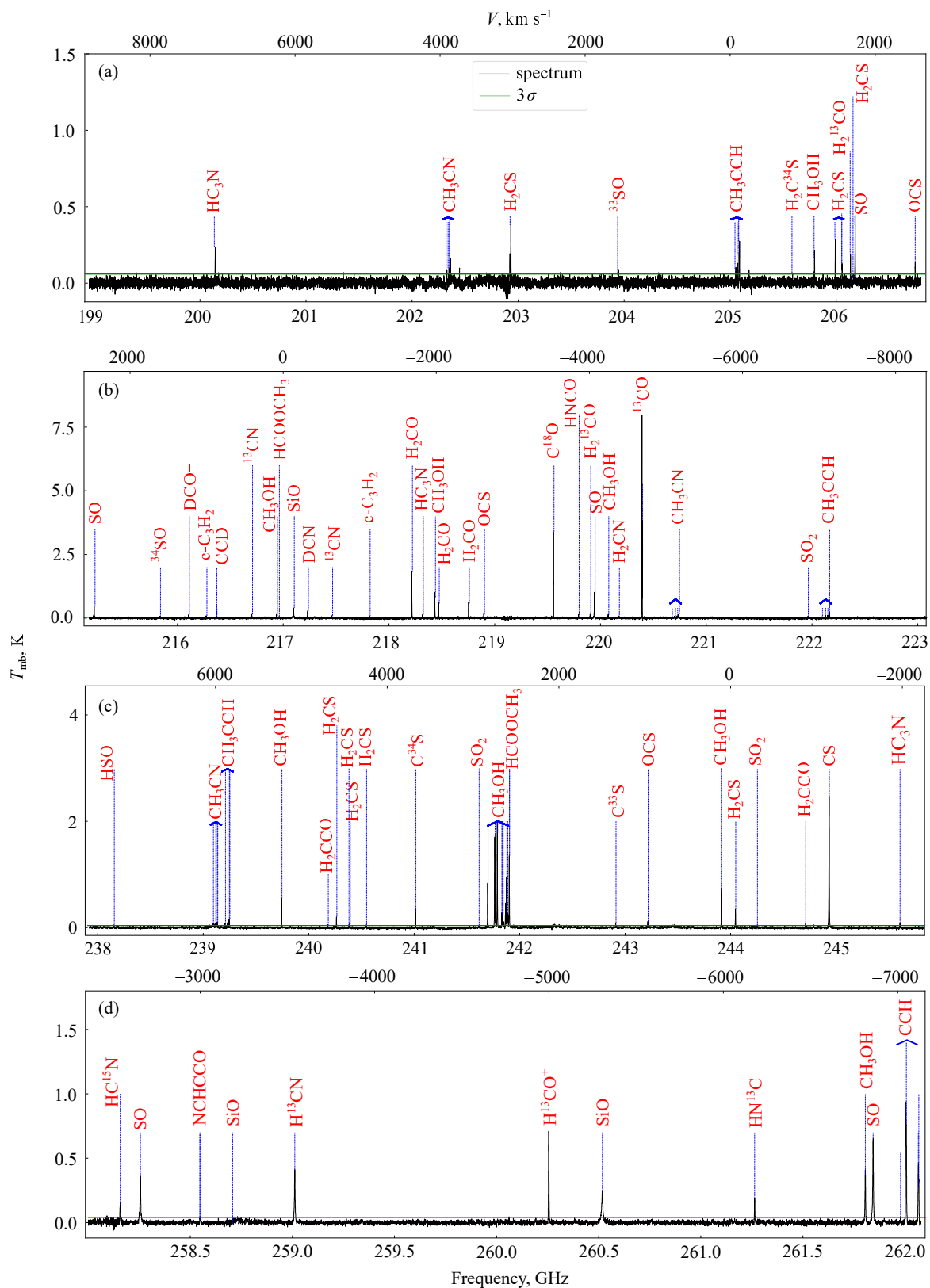


Рис. 1. Широкополосный спектр с приемника pFLASH230 в направлении на МЗО S2. Указаны молекулы, линии которых отождествлены. Сплошной зеленой линией показан уровень 3σ , где $\sigma = 19$ мК, 21 мК, 12 мК и 12 мК, стандартное отклонение шума в спектре (панели (a), (b), (c) и (d) соответственно).

Таблица 1. Спектроскопические параметры обнаруженных спектральных линий, взятые из базы данных CDMS: молекула, квантовые числа перехода, частота ν и энергия верхнего уровня E_u

Молекула	Переход	Частота, МГц	E_u , К	Молекула	Переход	Частота, МГц	E_u , К
HC ₃ N	$J = 22-21$	200 135.392	110.5	SO ₂	$J_{K_a, K_c} = 11_{1,11}-10_{0,10}$	221 965.220	60.4
H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{1,6}-5_{1,5}$	202 924.054	47.3	HSO	$N_{K_a, K_c} = 6_{2,5}-5_{2,4}$	238 156.771	93.4
³³ SO	$J_{K_a, K_c} = 5_{4,6}-4_{3,5}$	203 939.255	38.3		$J = 13/2-11/2, F = 6-5$		
H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{0,6}-5_{0,5}$	205 987.858	34.6	H ₂ CCO	$J_{K_a, K_c} = 12_{1,12}-11_{1,11}$	240 185.794	88.0
H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{3,4}-5_{3,3}$	206 052.602	153.1	H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{0,7}-6_{0,6}$	240 266.872	46.1
H ₂ ¹³ CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{1,3}-2_{1,2}$	206 131.626	31.6	H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{2,6}-6_{2,5}$	240 382.051	98.8
H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 6_{2,4}-5_{2,3}$	206 158.602	87.3	H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{3,5}-6_{3,4}$	240 393.037	164.6
SO	$J_K = 5_4-4_3$	206 176.005	38.6	H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{3,4}-6_{3,3}$	240 393.762	164.6
OCS	$J = 17-16$	206 745.156	89.3	H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{2,5}-6_{2,4}$	240 549.066	98.8
SO	$J_K = 5_5-4_4$	215 220.653	44.1	SO ₂	$J_{K_a, K_c} = 5_{2,4}-4_{1,3}$	241 615.797	23.6
³⁴ SO	$J_K = 5_6-4_5$	215 839.920	34.4	C ³³ S	$J_K = 5_0-4_0$	242 913.610	35.0
c-C ₃ H ₂	$J_{K_a, K_c} = 3_{3,0}-2_{2,1}$	216 278.756	19.5	OCS	$J = 20-19$	243 218.036	122.6
CCD	$J_{K_a, K_c} = 3_{4,5}-2_{3,4}$	216 372.837	20.8	H ₂ CS	$J_{K_a, K_c} = 7_{1,6}-6_{1,5}$	244 048.504	60.0
¹³ CN	$N = 2-1, J = 3/2-3/2,$ $F_1 = 2-1, F = 1-2$	216 710.144	15.6	SO ₂	$J_{K_a, K_c} = 14_{0,14}-13_{1,13}$	244 254.218	93.9
HCOOCH ₃	$J_{K_a, K_c} = 20_{0,20}-19_{1,19}, A$	216 964.157	111.5	H ₂ CCO	$J_{K_a, K_c} = 12_{1,11}-11_{1,10}$	244 712.269	89.4
¹³ CN	$N = 2-1, J = 5/2-3/2,$ $F_1 = 3-2, F = 4-3$	217 467.150	15.7	HC ₃ N	$J = 27-26$	245 606.320	165.0
HC ₃ N	$J = 24-23$	218 324.723	131.0	HC ¹⁵ N	$J = 3-2$	258 156.996	24.8
H ₂ CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{2,1}-2_{2,0}$	218 760.066	68.1	HN ¹³ C	$J = 3-2$	261 263.513	25.1
OCS	$J = 18-17$	218 903.356	99.8	SO	$J_K = 6_7-5_6$	261 843.721	47.6
H ₂ ¹³ CO	$J_{K_a, K_c} = 3_{1,2}-2_{1,1}$	219 908.525	32.9	CCH	$N_J = 3_{5/2}-2_{3/2}, F = 3-2$	262 064.986	25.2
H ₂ CN	$J_{K_a, K_c} = 3_{0,3}-2_{0,2}, F = 5/2-5/2,$ $n = 18-10$	220 178.897	21.1	CCH	$N_J = 3_{5/2}-2_{3/2}, F = 2-1$	262 067.469	25.2

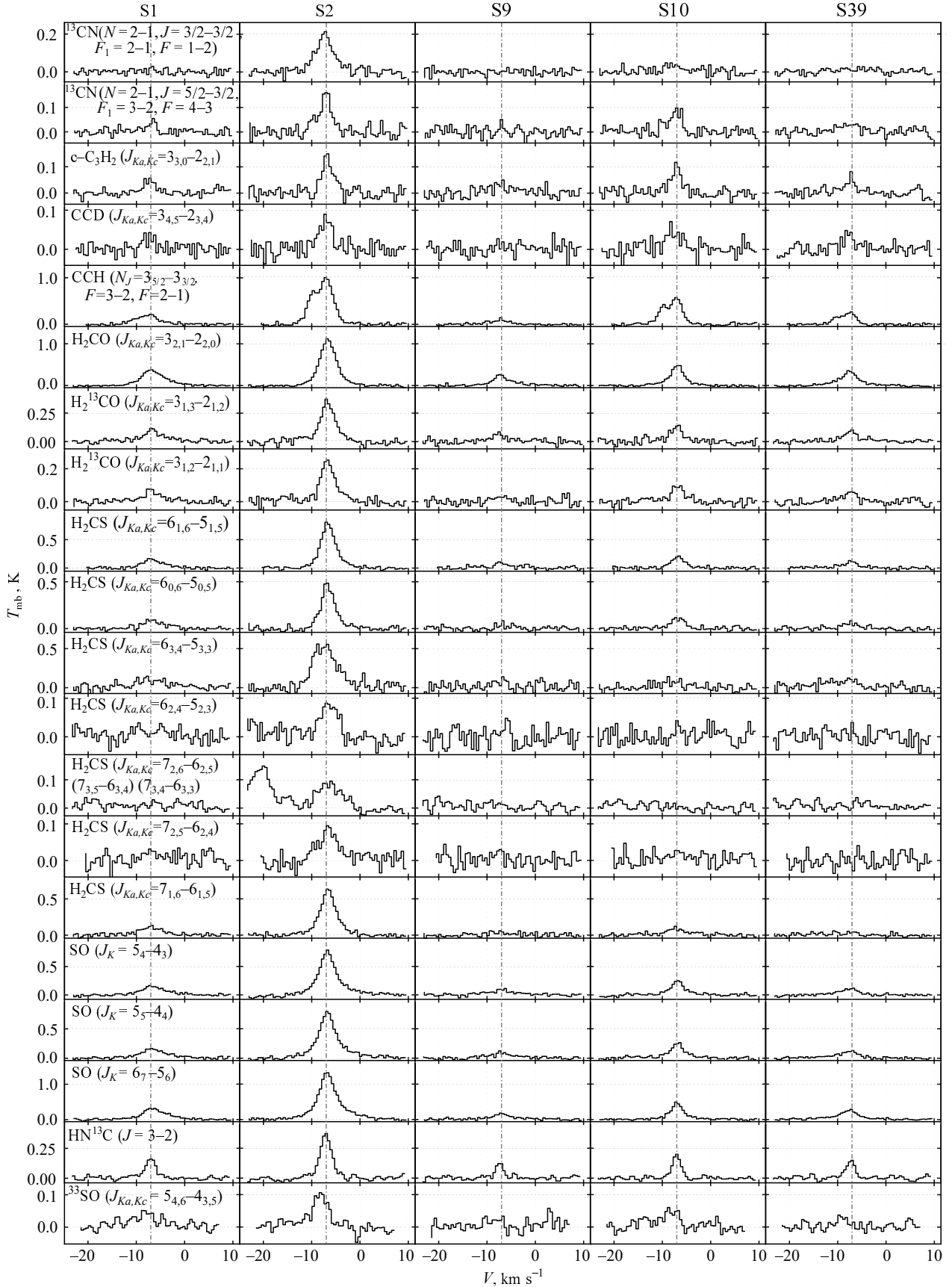


Рис. 2. Спектральные линии, обнаруженные в направлении на МЗО S1, S2, S9, S10, S39 из RCW 120. Штрихпунктирной серой линией отмечена скорость $V_{\text{LSR}} = -7 \text{ km s}^{-1}$.

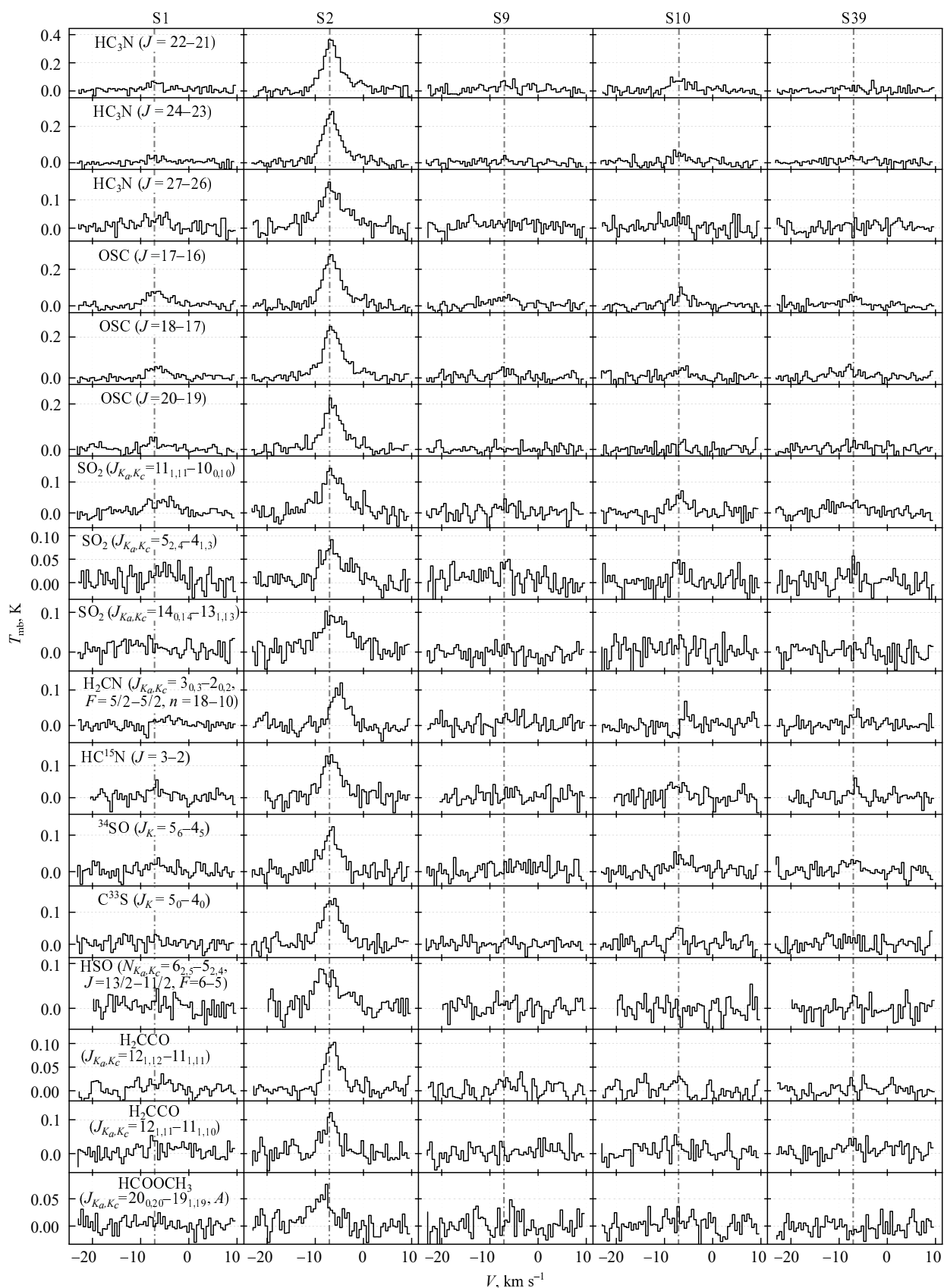


Рис. 2. Продолжение.

Таблица 2. Начальные обилия химических компонентов относительно числа ядер водорода в модели **Presta**

Компонент	Начальное обилие
H ₂	4.99995×10^{-1}
S	8.0×10^{-8}
H	1.0×10^{-5}
Si	8.0×10^{-9}
He	9.0×10^{-2}
Fe	3.0×10^{-9}
C	7.3×10^{-5}
Mg	7.0×10^{-9}
Cl	1.0×10^{-9}
Na	2.0×10^{-9}
N	2.14×10^{-5}
P	2.0×10^{-10}
O	1.76×10^{-4}

краткости сумма ядер атомарного и молекулярного водорода обозначена как $N_{\text{H I}+\text{H}_2}$) мы попиксельно поделили карты лучевых концентраций молекул на величины $N_{\text{H I}+\text{H}_2}$, полученные в работе Plakitina et al. (2024).

2.3. Корреляции лучевых концентраций

Для оценки линейных корреляций между лучевыми концентрациями различных пар молекул мы использовали коэффициент корреляции Пирсона:

$$p = \frac{\sum (x_{ji} - \bar{x})(y_{ji} - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_{ji} - \bar{x})^2 \sum (y_{ji} - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где x_{ji} и y_{ji} — элементы выборки, в нашем случае — лучевые концентрации молекул x и y в пикселе $[j, i]$; $\bar{x}$ и $\bar{y}$ — средние значения лучевой концентрации молекул x и y . При подсчете коэффициента корреляции исключались пиксели, в которых погрешность величины N превышала 50% хотя бы для одной из молекул в рассматриваемой паре.

2.4. Модель

Астрохимическое моделирование выполнялось с помощью программного комплекса **Presta** (Kochina et al., 2013), предназначенного для моделирования эволюции объектов, находящихся на различных стадиях протозвездной эволюции. Комплекс **Presta** позволяет рассчитывать химическую

эволюцию в трех фазах: в газовой, на поверхностях пылинок и в толще их ледяных мантий (Borshcheva and Wiebe, 2022). В этой работе мы использовали двухфазный вариант модели, то есть учитывали только реакции, происходящие в газовой фазе и на поверхности пылинок. Набор компонентов и реакций основан на химической сетке **ALCHEMIC** (Semenov and Wiebe, 2011), но с существенными дополнениями, частично описанными Wiebe et al. (2019). Начальные обилия химических компонентов представлены в таблице 2.

Химическая эволюция моделировалась на интервале до 10^6 лет при неизменных физических условиях. Мы провели несколько расчетов, варьируя концентрацию ядер водорода n_{H} в модельном облаке от 10^3 до 10^5 см^{-3} , температуру газа T_{gas} от 10 до 100 К с интервалом 10 К, а оптическое поглощение A_V в пределах от 3^m до 10^6 звездных величин. Температура пыли была принята равной 22 К по результатам анализа ИК-данных (Plakitina et al., 2024).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Обнаруженные молекулы

В направлении на максимум излучения молекул — МЗО S2 — обнаружено 40 линий 20 молекул, включая изотопологи. Они показаны на рис. 2 и перечислены в таблице 1. Спектры были сглажены до спектрального разрешения 0.5 км с^{-1} , при этом уровень шума составил 12–20 мК. В совокупности с результатами из работы Plakitina et al. (2024) в направлении на МЗО S2 обнаружено 65 линий (серии линий J_K мы считаем за одну линию), принадлежащих 35 молекулам. Самая сложная из них — HCOOCH_3 (метилформиат) — состоит из восьми атомов. Для последующего анализа спектры были приближены функциями Гаусса. Параметры линий, по которым мы строили вращательные диаграммы, представлены в таблицах 3 (интегральные интенсивности) и 4 (положения, амплитуды и лучевые скорости гауссиан).

3.2. Карты излучения в линиях молекул

В работе Plakitina et al. (2024) мы привели карты интегральных интенсивностей двадцати молекул, излучение которых в направлении на наблюдаемую область оказалось наиболее ярким. В данной работе на рис. 3 мы приводим карты интегральных интенсивностей для остальных молекул, обнаруженных в этой области, с менее яркими линиями. Как и в предыдущем исследовании, обнаруженные молекулы могут быть отнесены к одной из трех групп

Таблица 3. Параметры линий молекул SO₂, OCS, HC₃N, H₂CS, SO в направлении на МЗО

Молекула	Частота, МГц	J_K	E_u , К	$\lg A_{ij}$	g_u	$\int T_{mb} dV$, мК км с ⁻¹				
						S1	S2	S9	S10	S39
SO ₂	221 965.220	11 _{1,11} –10 _{0,10}	60.4	–3.943	23	261±2	848±6	—	159±2	240±1
	241 615.797	5 _{2,4} –4 _{1,3}	23.6	–4.073	11	195±2	465±3	—	151±2	—
	244 254.218	14 _{0,14} –13 _{0,13}	93.9	–3.785	29	157±1	584±4	—	—	—
OCS	206 745.156	17–16	89.3	–4.592	35	389±4	1320±12	209±2	263±3	254±2
	218 903.356	18–17	99.8	–4.517	37	270±3	1174±10	195±2	190±2	204±1
	243 218.036	20–19	122.6	–4.517	41	206±2	960±9	—	—	—
HC ₃ N	200 135.392	22–21	110.5	–3.197	35	194±3	1631±13	440±3	353±4	204±1
	218 324.723	24–23	131.0	–3.083	49	102±2	1260±10	—	222±2	196±1
	245 606.320	27–26	165.0	–2.928	55	115±3	622±5	—	—	—
H ₂ CS	202 924.054	6 _{1,6} –5 _{1,5}	47.3	–3.924	39	850±7	3128±38	362±4	731±6	401±6
	205 987.858	6 _{0,6} –5 _{0,5}	34.6	–3.893	13	464±4	1871±23	217±3	416±4	229±4
	206 052.602	6 _{3,4} –5 _{3,3}	153.1	–4.018	39	215±2	882±11	—	—	140±3
	206 158.602	6 _{2,4} –5 _{2,3}	87.3	–3.943	13	—	359±5	—	—	—
	240 266.872	7 _{0,7} –6 _{0,6}	46.1	–3.688	15	276±3	1460±18	—	—	253±4
	240 382.051	7 _{2,6} –6 _{2,5}	60.0	–3.678	45	—	347±5	—	—	—
	240 549.066	7 _{2,5} –6 _{2,4}	60.0	–3.678	45	—	325±5	—	—	—
	244 048.504	7 _{1,6} –6 _{1,5}	98.8	–3.724	15	624±5	2426±30	—	302±3	—
SO	206 176.005	5 ₄ –4 ₃	38.6	–3.996	9	1152±11	3809±99	497±6	1105±16	910±9
	215 220.653	5 ₅ –4 ₄	44.1	–3.924	11	3571±93	435±5	858±12	930±50	609±6
	219 949.442	5 ₆ –4 ₅	35.0	–3.873	13	3229±29	8325±214	1744±18	2796±39	2442±24
	258 255.826	6 ₆ –5 ₅	56.5	–3.996	13	744±7	3100±82	—	583±9	447±5
	261 843.722	6 ₇ –5 ₆	47.6	–3.642	15	1973±18	6033±156	855±9	1596±22	1340±13

К первой группе относятся молекулы, излучение которых наблюдается вдоль границы области ионизации. Это двухатомная молекула ¹³CN и малоатомные углеводороды с-C₃H₂, CCD, CCH, образование которых связано с проникновением УФ-квантов в молекулярный газ.

Во вторую группу включены молекулы, излучение которых возникает в той же области, где излучает пыль на длине волны 870 мкм, то есть во всей области, содержащей наблюдаемые МЗО. В эту группу входят как двухатомные молекулы, так и более сложные соединения: H₂CO, H₂¹³CO, H₂CS, HN¹³C, SO, ³³SO, HC₃N, OCS, SO₂.

В третью группу попали молекулы, излучение которых наблюдается только в направлении на МЗО S2 и практически или полностью отсутствует в направлении на другие МЗО. К этой группе относятся азотсодержащие молекулы H₂CN, HC¹⁵N, ³⁴SO, C³³S, HSO, а также органические молекулы H₂CCO и HCOOCH₃.

3.3. Температуры возбуждения вращательных уровней

Диаграммы населенностей вращательных уровней молекул в направлении на МЗО показаны на рис. 4–8, причем максимальное число диаграмм — пять — было построено в МЗО S2 и S1 для молекул SO₂, OCS, HC₃N, H₂CS и SO. Отношение сигнал/шум в других МЗО оказалось ниже, поэтому для них число диаграмм меньше. Из рисунков видно, что наблюдаемые интенсивности линий молекул SO, SO₂, OCS, HC₃N соответствуют линейному соотношению между энергией верхнего уровня E_u и логарифмом лучевой концентрации, а значит, условия возбуждения молекул в МЗО соответствуют температурам, указанным на диаграммах. Исключение составляют диаграммы для молекулы H₂CS, 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.

Таблица 4. Параметры фитирования линий молекул SO₂, OCS, HC₃N, H₂CS и SO в направлении на МЗО. Значения полной ширины на полувысоте ($FWHM$) и скоростей, на которые приходится максимум излучения в линии (V_{peak}), фиксировались

Молекула	Частота, МГц	T_{mb} , мК					$FWHM$, км с ⁻¹					V_{peak} , км с ⁻¹				
		S1	S2	S9	S10	S39	S1	S2	S9	S10	S39	S1	S2	S9	S10	S39
SO ₂	221 965.220	38±13	119±19	—	49±16	29±13	7.1±0.9	6.7±0.4	—	3.0±0.6	8.2±1.4	-6.9±0.5	-6.5±0.2	—	-7.1±0.6	-8.3±0.7
	241 615.797	28±9	65±22	—	47±14	—	7.1±1.2	6.7±0.6	—	3.0±0.4	—	-6.9±0.6	-6.5±0.3	—	-7.1±0.4	—
	244 254.218	21±7	82±21	—	—	—	7.1±1.9	6.7±0.6	—	—	—	-6.9±0.9	-6.5±0.3	—	—	—
OCS	206 745.156	74±14	258±18	—	59±15	44±15	5.0±0.4	4.8±0.2	—	4.2±0.6	5.4±0.7	-6.8±0.2	-6.7±0.1	—	-6.6±0.3	-8.1±0.4
	218 903.356	51±17	230±19	—	—	—	5.0±0.4	4.8±0.2	—	—	—	-6.8±0.2	-6.7±0.1	—	—	—
	243 218.036	39±13	188±21	—	—	—	5.0±0.7	4.8±0.2	—	—	—	-6.8±0.4	-6.7±0.1	—	—	—
HC ₃ N	200 135.392	57±17	329±22	—	76±22	—	5.2±0.67	4.7±0.2	—	4.4±0.5	—	-7.2±0.4	-6.9±0.1	—	-7.2±0.3	—
	218 324.723	25±10	254±20	—	48±17	—	5.2±1.2	4.7±0.1	—	4.4±0.7	—	-7.2±0.6	-6.9±0.1	—	-7.2±0.4	—
	245 606.320	36±14	125±22	—	—	—	5.2±1.5	4.7±0.4	—	—	—	-7.2±0.8	-6.9±0.2	—	—	—
H ₂ CS	202 924.054	146±17	761±23	60±21	195±21	101±18	5.5±0.3	3.9±0.1	5.7±1.1	3.5±0.2	3.7±0.4	-7.0±0.1	-6.9±0.1	-6.8±0.6	-7.1±0.1	-7.8±0.2
	205 987.858	80±11	455±23	36±14	111±17	57±16	5.5±0.4	3.9±0.1	5.7±1.1	3.5±0.3	3.7±0.5	-7.0±0.2	-6.9±0.1	-6.8±0.6	-7.1±0.1	-7.8±0.3
	206 052.602	37±13	215±20	—	—	35±12	5.5±1.0	3.9±0.2	—	—	3.7±1.2	-7.0±0.5	-6.9±0.1	—	—	-7.8±0.6
	206 158.602	—	87±16	—	—	—	—	3.9±0.4	—	—	—	—	-6.9±0.2	—	—	—
	240 266.872	47±17	355±22	—	—	65±18	5.5±0.8	3.9±0.1	—	—	3.7±0.4	-7.0±0.4	-6.9±0.1	—	—	-7.8±0.2
	240 382.051	—	85±19	—	—	—	—	3.9±1.1	—	—	—	—	-6.9±0.6	—	—	—
	240 549.066	—	79±19	—	—	—	—	3.9±0.5	—	—	—	—	-6.9±0.2	—	—	—
	244 048.504	107±18	590±22	—	81±19	—	5.5±0.4	3.9±0.1	—	3.5±0.5	—	-7.0±0.2	-6.9±0.1	—	-7.1±0.3	—
SO	206 176.005	169±15	761±25	83±18	301±24	162±17	6.4±0.2	4.7±0.1	5.6±0.6	3.5±0.1	5.3±0.2	-6.6±0.1	-6.9±0.1	-7.0±0.3	-7.1±0.1	-7.8±0.1
	215 220.653	144±18	714±17	73±17	234±21	108±32	6.4±0.3	4.7±0.1	5.6±0.6	3.5±0.2	5.3±0.4	-6.6±0.13	-6.9±0.1	-7.0±0.3	-7.1±0.1	-7.8±0.2
	219 949.442	474±20	1663±23	291±19	762±20	435±21	6.4±0.2	4.7±0.1	5.6±0.2	3.5±0.1	5.3±0.2	-6.6±0.1	-6.9±0.1	-7.0±0.1	-7.1±0.1	-7.8±0.1
	258 255.826	109±17	619±20	—	159±19	80±19	6.4±0.4	4.7±0.1	—	3.5±0.2	5.3±0.5	-6.6±0.2	-6.9±0.1	—	-7.1±0.1	-7.8±0.3
	261 843.722	290±19	1206±20	143±18	435±17	239±21	6.4±0.2	4.7±0.1	5.6±0.4	3.5±0.1	5.3±0.2	-6.6±0.1	-6.9±0.1	-7.0±0.2	-7.1±0.1	-7.8±0.1

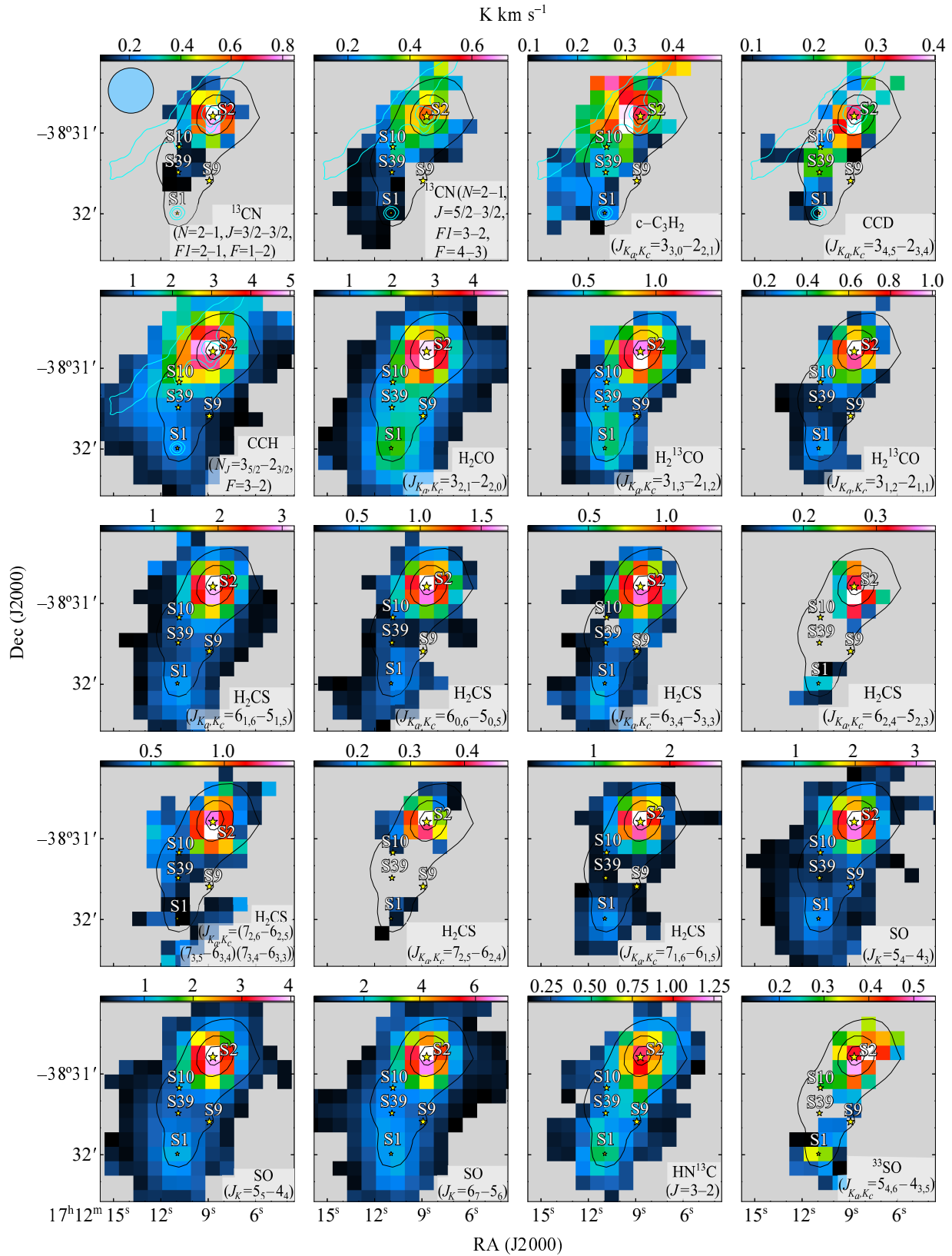


Рис. 3. Карты интегральной интенсивности излучения молекул. Молодые звездные объекты обозначены желтыми звездами, размер маркера пропорционален массе каждого МЗО. Черными контурами показано излучение пыли на длине волны 870 мкм (уровни контуров составляют 2.0, 6.0, 10.0 Ян/луч), а голубыми (с уровнями 0.47, 1.0 Ян/пиксель) — на длине волны 70 мкм. Голубым кружком в верхнем левом углу панели ^{13}CN обозначен приведенный размер диаграммы направленности APEX.

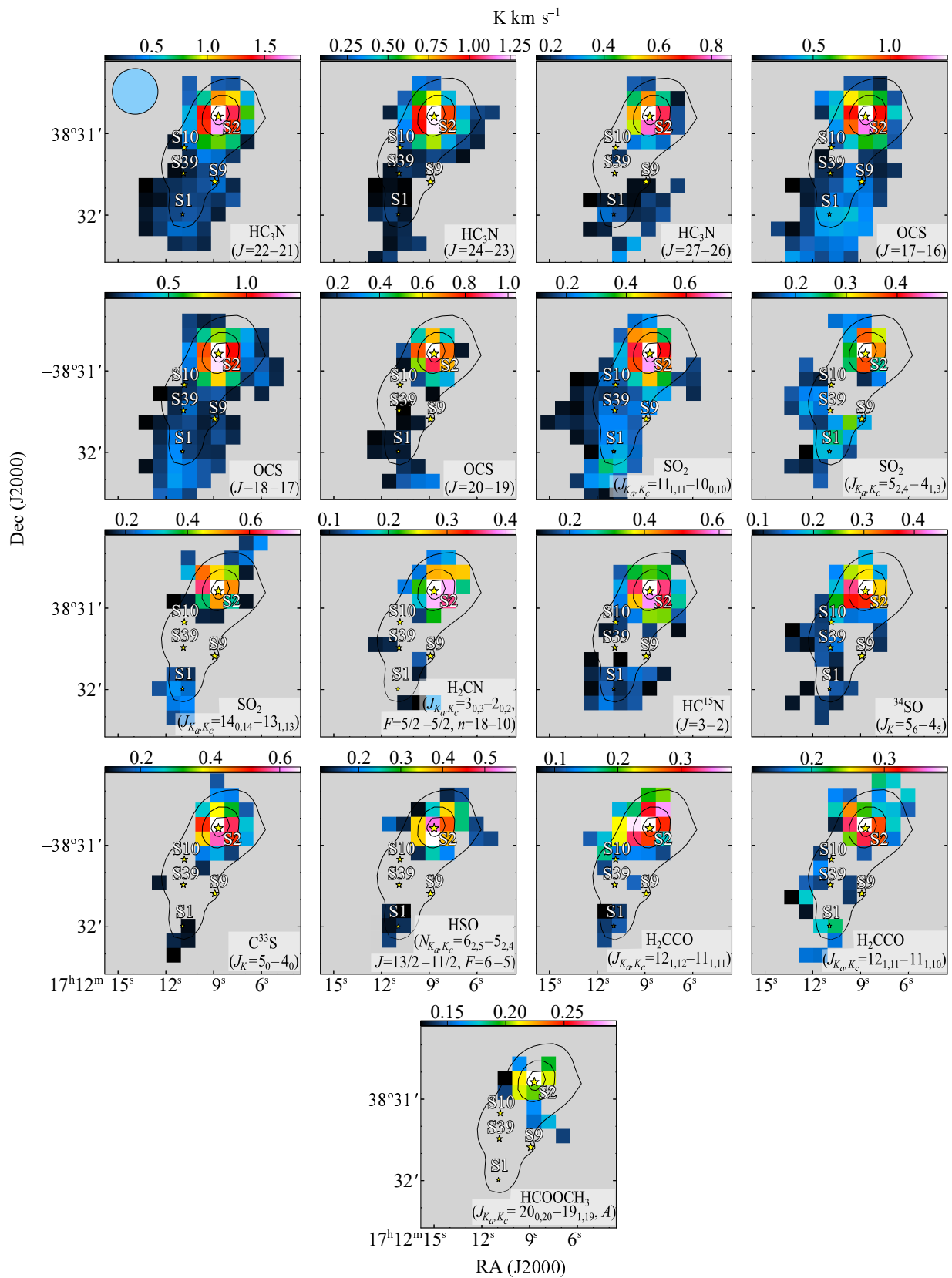


Рис. 3. Продолжение. Голубым кружком в верхнем левом углу панели HC₃N обозначен приведенный размер диаграммы направленности APEX.

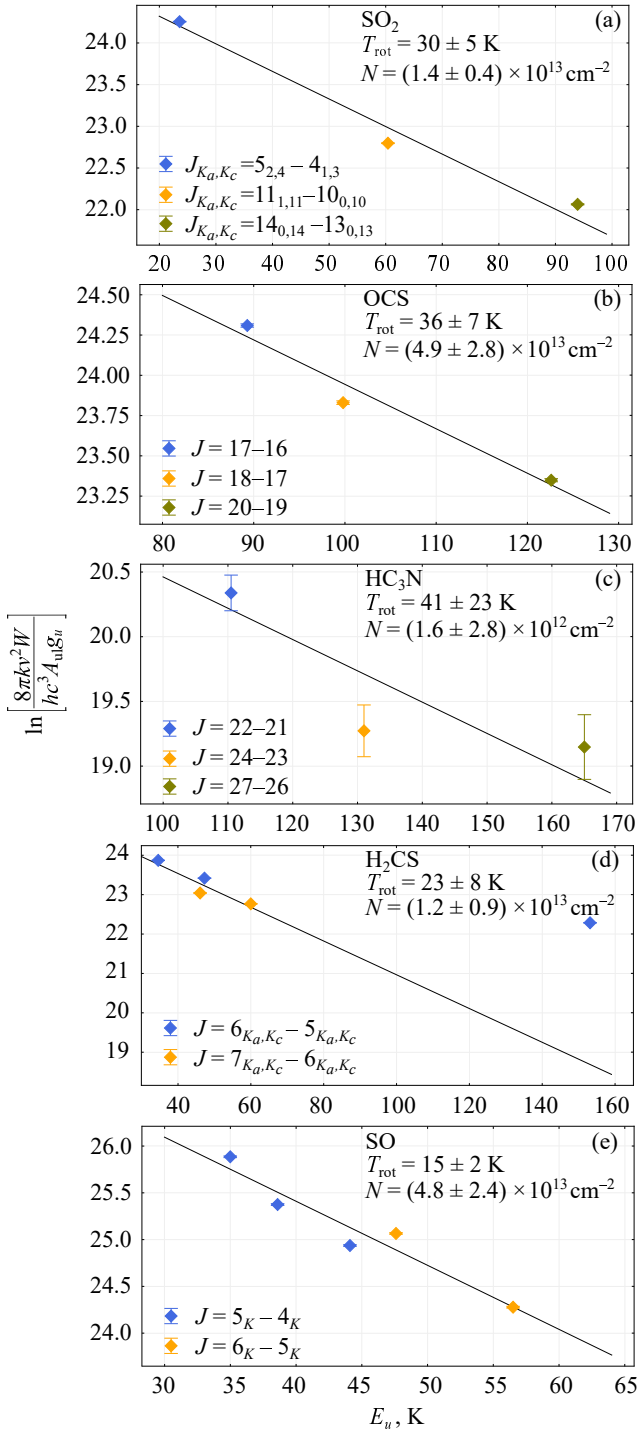


Рис. 4. Вращательные диаграммы для линий излучения молекул SO_2 , OCS , HC_3N , H_2CS , SO в МЗО S1.

Наибольшие вращательные температуры T_{rot} для МЗО S2 — 51 и 52 К — были получены из вращательных диаграмм молекул SO_2 и OCS соответственно, а наименьшее значение — 20 К — было найдено из вращательной диаграммы для молекулы SO . По убыванию вращательных температур молекулы выстраиваются в последовательность: OCS ,

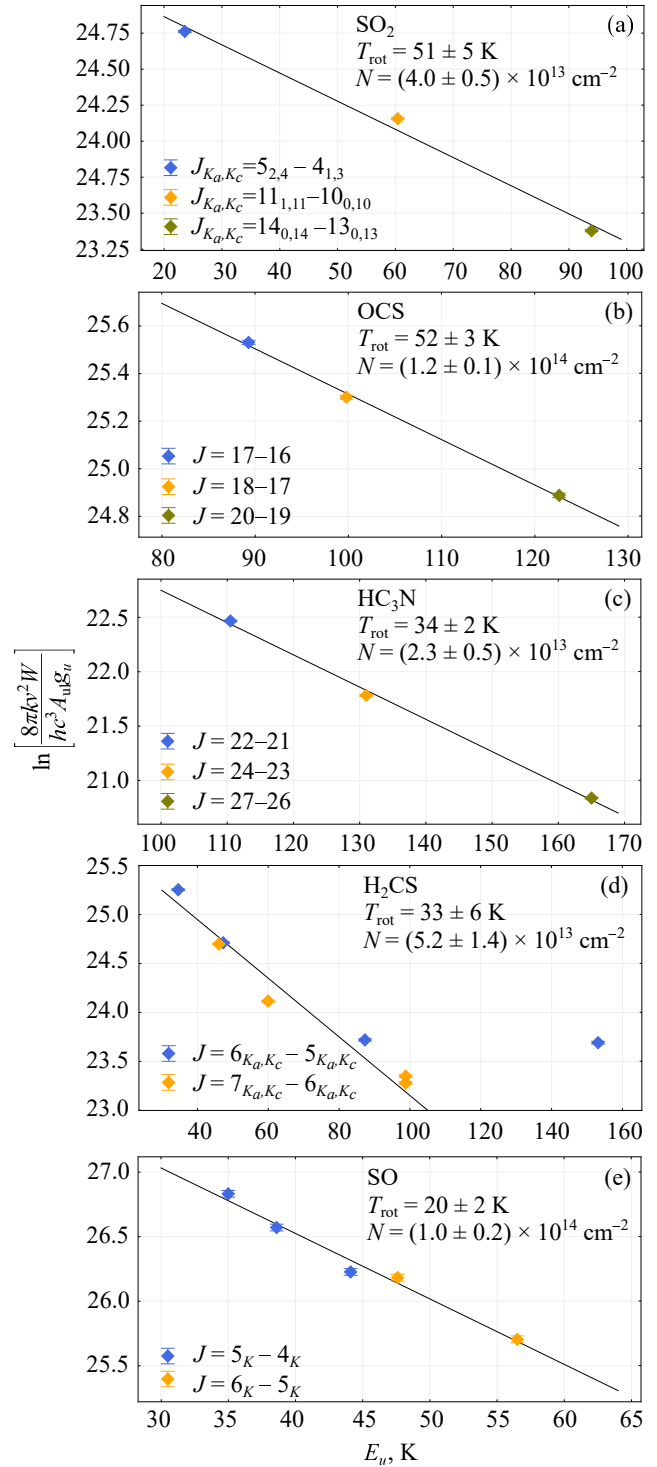


Рис. 5. Вращательные диаграммы для линий излучения молекул SO_2 , OCS , HC_3N , H_2CS , SO в МЗО S2.

SO_2 , HC_3N , H_2CS , SO — которая может быть связана с химической структурой МЗО S2.

Для МЗО S1 наибольшая вращательная температура была получена для молекулы HC_3N и составила 41 К, однако достоверность этого значения

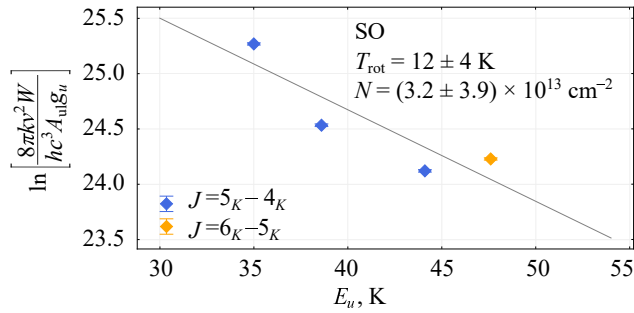


Рис. 6. Вращательные диаграммы для линий излучения молекулы SO в МЗО S9.

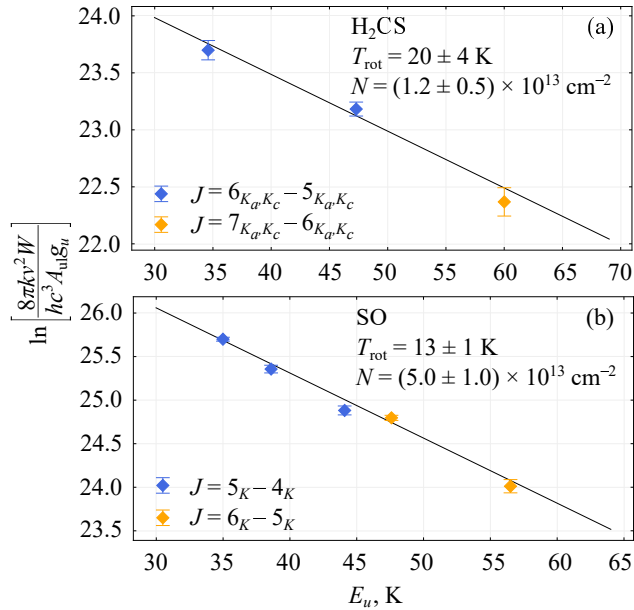


Рис. 7. Вращательные диаграммы для линий излучения молекул SO и H₂CS в МЗО S10.

вызывает сомнение вследствие более зашумленного спектра для некоторых переходов. За исключением вращательной температуры для молекулы HC₃N, полученные значения для источника S1 в среднем ниже, чем в S2, примерно на 5–20 K, с наименьшим различием для молекулы SO и с максимальным — для молекулы SO₂. Стоит отметить, что в S1 молекулы (кроме HC₃N) выстраиваются в таком же порядке 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 и H₂CS. У источника S10 вращательная температура, определенная по линиям молекулы H₂CS, оказалась выше значения, найденного по линиям молекулы SO: 20 и 13 K соответственно (рис. 7). Для источника S39 значения вращательной температуры составляют 32 K по линиям H₂CS и 12 K по линиям молекулы SO (рис. 8). В S9 удалось

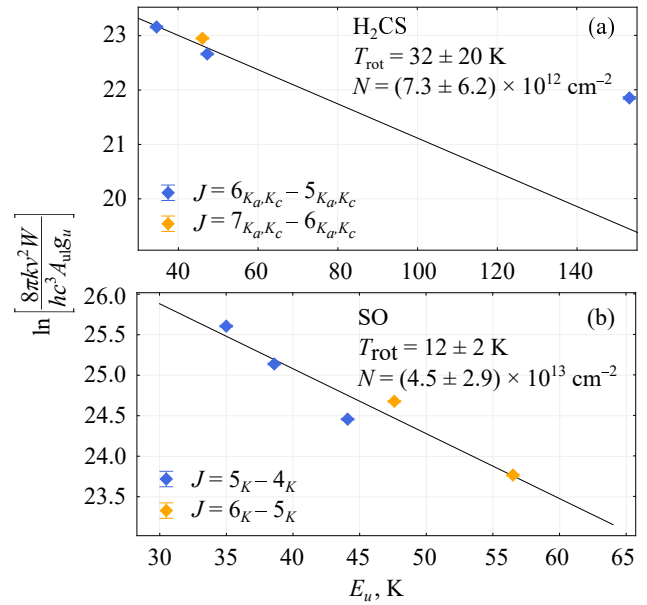


Рис. 8. Диаграммы населенности для вращательных уровней линий излучения молекул SO и H₂CS в МЗО S39.

определить только температуру возбуждения SO на уровне 12 K (рис. 6). 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.

3.4. Содержание молекул

Используя карту распределения $N_{\text{HI}+\text{H}_2}$, мы оценили относительные содержания молекул H₂CS, HC₃N, OCS, SO, SO₂ в наблюдаемой области (в дополнение к молекулам, рассмотренным в предыдущей статье). Соответствующие карты показаны на рис. 9, а значения обилий в направлении на МЗО приведены в таблице 5. Видно, что обилия серосодержащих молекул в МЗО S1 выше, чем в МЗО S2; максимальное превышение достигается для молекул SO и OCS — в два и три раза соответственно. Обилие HC₃N, напротив, в два раза выше в МЗО S2, чем в МЗО S1. Из-за низкой яркости линий достоверно определить содержание в области между МЗО S1 и МЗО S2 удалось только для SO.

3.5. Корреляции лучевых концентраций молекул

Объединив распределения лучевых концентраций из этой работы с результатами работы Plakitina et al. (2024), мы рассмотрели корреляции лучевых концентраций, N , двадцати различных молекул в наблюдаемой области и определили для них коэффициент корреляции Пирсона r . Кроме того,

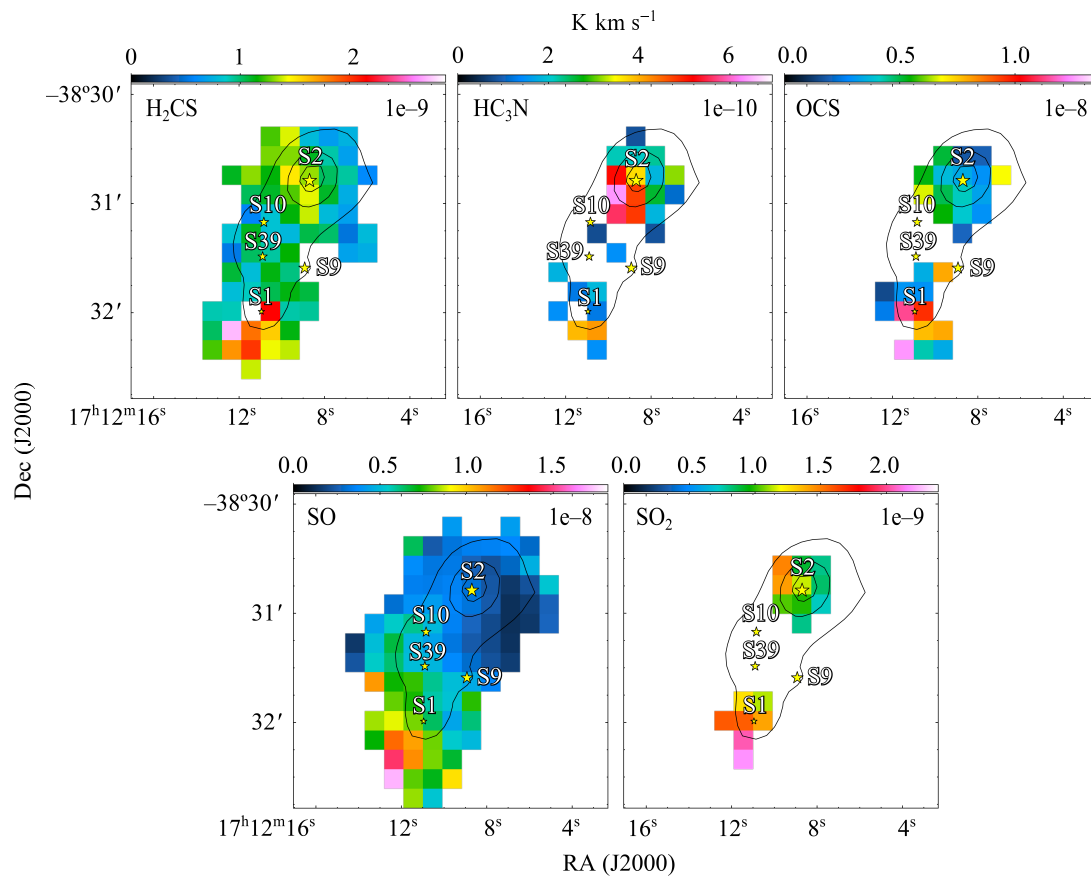


Рис. 9. Обилие молекул. Звездами обозначены МЗО. ?? YSOs are shown as yellow stars, the marker size is proportional to the mass of each YSO. The black contours show dust emission at 870 μ m, the contour levels are 2.0, 6.0, 10.0 Jy/beam.

Таблица 5. Обилие молекул SO_2 , OCS , HC_3N , H_2CS , SO в направлении на МЗО в RCW 120. Обилие молекул X представлены в виде отношения лучевых концентраций молекул к лучевым концентрациям ядер водорода $N_{\text{H I}+\text{H}_2}$

МЗО	Обилие				
	$X(\text{SO}_2)$	$X(\text{OCS})$	$X(\text{HC}_3\text{N})$	$X(\text{H}_2\text{CS})$	$X(\text{SO})$
S1	1.40×10^{-9}	9.65×10^{-9}	1.27×10^{-10}	2.16×10^{-9}	6.43×10^{-9}
S2	1.14×10^{-9}	3.41×10^{-9}	3.70×10^{-10}	1.33×10^{-9}	3.11×10^{-9}
S9	—	—	—	—	4.56×10^{-9}
S10	—	—	—	8.32×10^{-10}	4.95×10^{-9}
S39	—	—	—	9.34×10^{-10}	4.86×10^{-9}

мы проанализировали корреляцию величин N для наблюдавшихся молекул с лучевой концентрацией водорода ($N_{\text{H I}+\text{H}_2}$), также взятой из предыдущей работы. Результаты показаны на рис. 10.

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

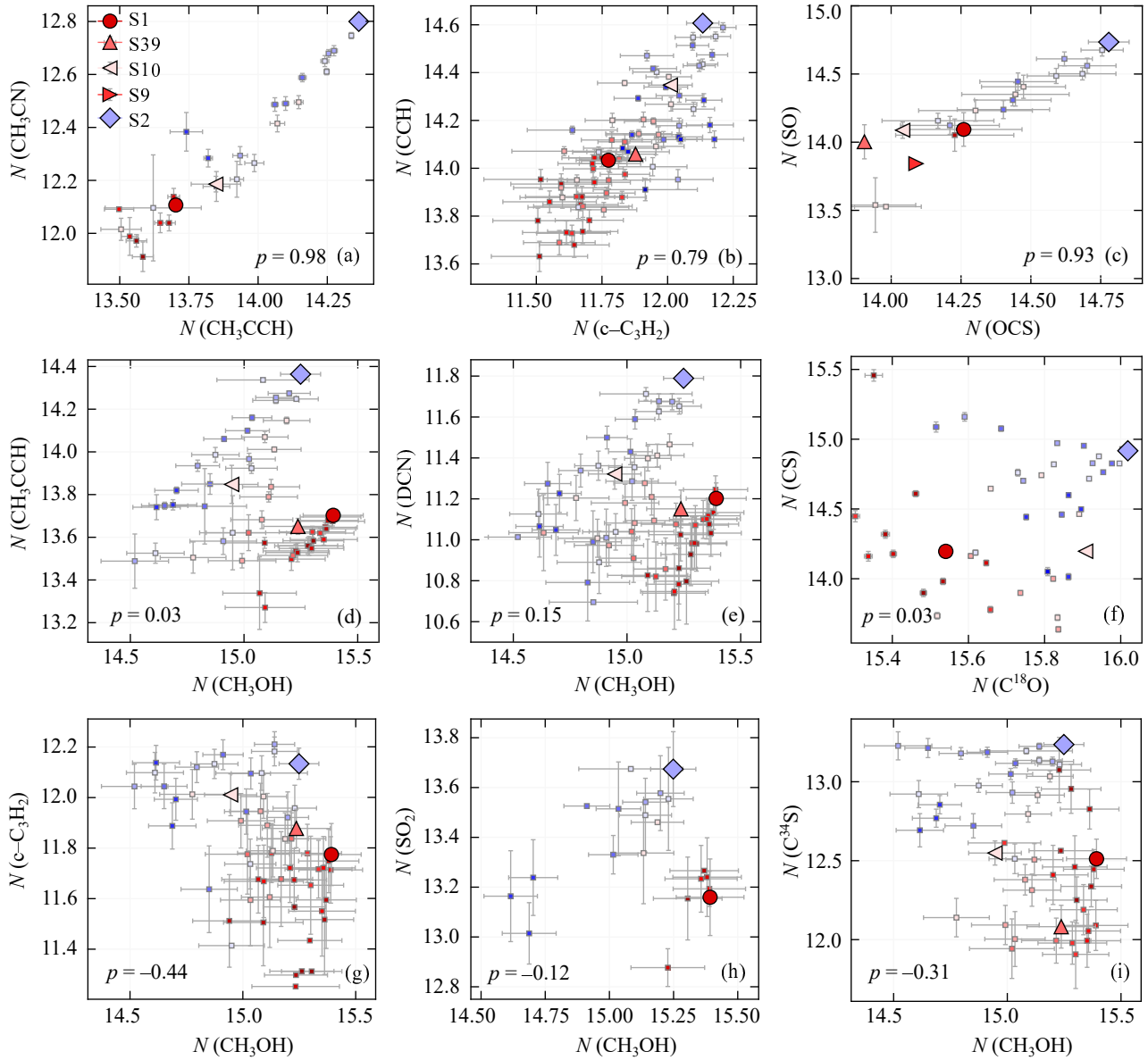


Рис. 11. Попиксельное сравнение лучевых концентраций молекул. Чем насыщеннее оттенок красного или синего, тем южнее или севернее находится пиксель. Крупными символами показаны пиксели, соответствующие пяти МЗО (см. легенду). На каждой панели указан коэффициент корреляции Пирсона.

ет, как у пары C^{18}O — CS (рис. 11f), отчетливо видно различное расположение «северных» и «южных» пикселей на диаграмме.

У пар молекул $\text{c-C}_3\text{H}_2$ — CH_3OH , SO_2 — CH_3OH , C^{34}S — CH_3OH , представленных на панелях (g)–(i) рис. 11, корреляция отрицательна, однако и в этом случае мы, скорее всего, имеем дело с различными корреляциями в «северных» и «южных» пикселях. Обобщая, можно сказать, что в большинстве рассмотренных пар с небольшими и отрицательными значениями p мы имеем дело с глобальной антикорреляцией между северной и южной областями в сочетании с положительной корреляцией внутри каждой области.

Интересно, что для некоторых пар молекул предвидеть высокий коэффициент корреляции между лучевыми концентрациями можно по виду карт излучения в линиях этих молекул. Так ведут себя, например, молекулы-трассеры фотодиссоциативных областей CSH и $\text{c-C}_3\text{H}_2$, 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 пар молекул показаны на рис. 3 в работе Plakitina et al., 2024). Но для пары CSH и CH_3CN это не так — несмотря на большое значение p , распределение интенсивностей излучения этих молекул на картах различается.

Иными словами, значительная корреляция лучевых концентраций не обязательно означает схожесть пространственного распределения яркости излучения молекул, но может означать схожесть путей их образования в наблюдаемых областях, что обсуждается ниже.

Для выявления возможных причин повышенного содержания метанола в южной части облака мы провели моделирование исследуемого объекта с помощью астрохимической модели *Presta*. Варьируя модельные параметры в диапазонах, указанных в разделе 2.4, мы обнаружили, что наблюдаемые в объекте типичные обилия молекул CH_3CCN , CH_3CN и CH_3OH в пределах одного порядка величины от модельных предсказаний 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 $A_V \sim 3^{\text{m}} - 5^{\text{m}}$. На рис. 12а и б представлены модельные содержания пар молекул $\text{CCN}-\text{c}-\text{C}_3\text{H}_2$ и $\text{CH}_3\text{CCN}-\text{CH}_3\text{OH}$ при различных значениях температуры газа и для $A_V = 3^{\text{m}}$, 4^{m} и 5^{m} ; видно четкое различие между последовательностями обилий CH_3CCN и CH_3OH .

Представленные последовательности согласуются с наблюдаемым разделением на две ветви на рис. 11, где при сопоставимых содержаниях CH_3CCN 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_3CCN образуется в газовой фазе, а молекула CH_3OH — на поверхности пыли. В среде с $A_V \leq 4^{\text{m}}$ фотодесорбция более эффективна по сравнению со средой с $A_V = 4^{\text{m}}$, и содержание метанола в газовой фазе становится выше. Дальнейшее понижение экстинкции до $A_V \leq 2^{\text{m}}$ приводит к тому, что метанол после десорбции эффективно разрушается вследствие фотодиссоциации и его газофазное содержание снижается. Таким образом, мы приходим к выводу, что причиной повышенного содержания метанола в южной части молекулярного облака может быть фотодесорбция, связанная с несколько меньшим средним значением A_V . Сравнивая распределение $N_{\text{H1}+\text{H2}}$ в окрестностях МЗО S1 и S2 (см. работу Plakitina et al., 2024), мы видим, что разница между лучевыми концентрациями водорода в этих объектах больше $1.81 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (эквивалент $A_V = 1^{\text{m}}$), поэтому наше предположение о меньшем значении A_V вблизи МЗО S1 оправдано. Фотодиссоциация затрагивает также и молекулы, подобные CH_3CCN , однако их содержание в значительной степени восстанавливается газофазными реакциями.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Признаки наличия горячего газа в 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, мы сопоставили содержания молекул в направлениях на МЗО, полученные в данной работе и в работе Plakitina et al. (2024), с результатами химико-динамического моделирования коллапса протозвезды (Kochina et al. (2025), где использовались те же начальные содержания, что и в нашем исследовании. Сопоставление пространственного масштаба модельного коллапсирующего облака и карт на рис. 9 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 непосредственной окрестности. 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 40 000 а.е., не отражая повышения обилий молекул в ближайшей окрестности протозвезды.

Единственным 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 $E_u = 153.1 \text{ К}$ (см. таблицу 1), наблюдаемая интенсивность которой не согласуется с вращательными диаграммами для $T_{\text{rot}} \approx 20-30 \text{ К}$, полученными по линиям с более низкими уровнями энергии, на несколько порядков величины превышая значение, ожидаемое из диаграмм.

Kirsanova et al. (2021) обнаружили линии с $K \geq 4$ в серии CH_3CN (12_K-11_K) в направлении МЗО 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 наличие компактного излучения в линиях молекулы CH_3CN в МЗО S2 нашли Figueira et al. (2018), хотя они не проводили анализа физических условий в молекулярном газе.

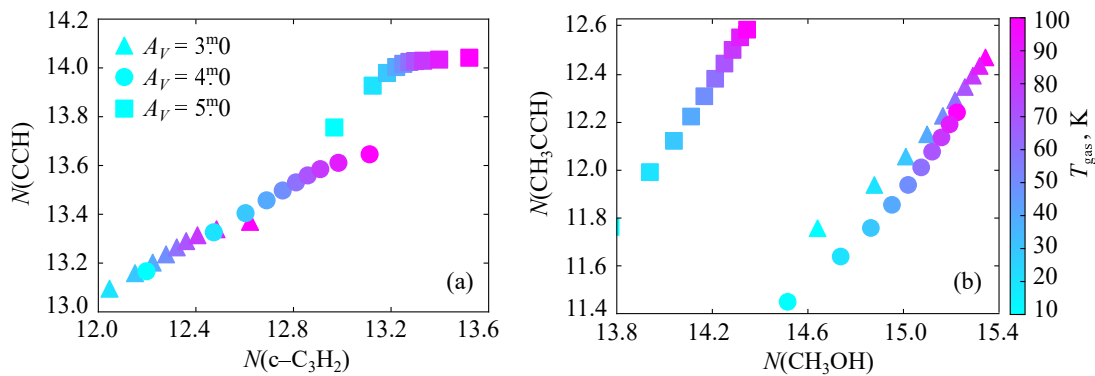


Рис. 12. Результаты моделирования для наилучшей модели и момента времени 10^5 лет. Модельные расчеты представлены треугольниками для модели с $A_V = 3^m$, кругами для $A_V = 4^m$, квадратами для $A_V = 5^m$. Цветовая шкала маркеров соответствует различным значениям T_{gas} .

С наличием компактного горячего ядра в МЗО S2 связано и обнаружение линии метилформиата HCOOCH_3 ($20_{0,20}-19_{0,19}$), см. таблицу 1. Как показали Kochina and Wiebe (2024), метилформиат образуется на пыли еще на стадии темного облака, 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.

4.2. Особенности разрушения мантий пылинок вблизи МЗО

Ранее было высказано предположение, что повышенное содержание метанола в южной части объекта может быть связано с более эффективной фотодесорбцией. Рассматривая другие виды десорбции, мы можем отметить, что скорость тепловой десорбции, зависящая от T_{dust} , в МЗО S1 и S2 должна быть сравнима, так как температура пыли в этих объектах совпадает в пределах 1 K (Plakitina et al., 2024). Более того, величина T_{dust} в этих МЗО меньше температуры сублимации молекул метанола, составляющей около 80 K (например, Wiebe et al., 2019). Скорость десорбции космическими лучами также должна быть одинакова, так как эти МЗО лежат в пределах одного молекулярного сгустка на границе области HII размером около 1 пк. Важным фактором, который не учитывается в представленном моделировании, являются ударные волны и высокоскоростные истечения, сопровождающие рождение звезд (Beuther and Shepherd, 2005; Arce et al., 2007; Zinchenko et al., 2015). На наличие истечений в окрестности МЗО S1 указывают широкие крылья линий метанола (Kirsanova et al., 2021; Plakitina et al., 2024) и обнаружение мазерного излучения метанола первого класса (Voronkov et al., 2014), которое

образуется в областях, охваченных истечениями (Voronkov et al., 2012). 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, мы могли бы получить результат, сходный с тем, что показан на рис. 12. Следовательно, мы не можем исключить вклад разрушения мантий пылинок при их столкновениях в повышение обилия метанола в газовой фазе.

Öberg and Bergin (2021), просуммировав 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 (Watanabe and Kouchi, 2002; Fuchs et al., 2009; Punanova et al., 2022). Проанализировав наблюдения линий молекул CO₂, OCS и метанола в направлении на массивные протозвезды, Santos et al. (2024) показали, что SO, CO₂ и OCS образуются раньше, чем метанол, на той стадии развития молекулярного облака, когда лед в основном водяной. Образование же метанола на пылинках происходит позже и преимущественно в верхнем CO-слое.

Наши результаты согласуются с представлением о наличии водяного и CO-слоев в мантиях пылинок. На рис. 11a, d, g 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 SO_2 отсутствует ($r = -0.12$, см. рис. 10), хотя обе молекулы образуются на пылинках. Корреляция между OCS и метанолом хоть и положительная, но слабая ($r = 0.33$). Это можно объяснить, если принять 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 (Borshcheva and Wiebe, 2022).

Суммируя все вышесказанное о графиках корреляций, мы приходим к выводу, 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, CH_3CCN , CH_3CN и др.). Именно по этой причине мы получаем вилкообразные распределения на диаграммах с корреляциями (рис. 11).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали химический состав и физические условия в темном молекулярном густом, который находится на границе области H II SW 120 . В нем сочетаются разнообразные физические условия в ограниченном объеме — от горячего ионизованного до холодного молекулярного газа с погруженными в него молодыми звездными объектами. Проведя наблюдения на телескопе APEX в диапазоне 200–260 Гц, мы обнаружили 65 линий 35 молекул в направлении на массивный MZO S2 . Самой сложной из обнаруженных оказалась молекула метилформиата, HCOOCH_3 , содержащая восемь атомов. Определив лучевые концентрации молекул, мы обнаружили, что содержание метанола в южной части плотного густка выше, чем в северной, при сравнимых содержаниях других сложных молекул, таких, например, как CH_3CN и CH_3CCN . Кроме того, содержание метанола повышено и относительно других молекул, содержащих кислород, например SO , OCS .

Для интерпретации результатов наблюдений мы использовали астрохимическую модель **Presta**. Модель воспроизводит наблюдаемые обилия CH_3CCN и CH_3OH и показывает, что возможным механизмом, ответственным за повышенное содержание метанола в газовой фазе, является фотодесорбция из мантий. При уменьшении величины поглощения A_V от 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 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, CCN и CH_3OH). Слабая корреляция между метанолом и другими кислородсодержащими молекулами (SO , OCS , SO_2), которые также образуются на пыли, свидетельствует о том, что в южной части облака разрушается только верхняя часть мантий пылевых частиц, богатая CO -льдом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А. О. Х. Олофссона, который провел наблюдения по проекту ID 0108.F-9313(A).

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные наблюдений доступны в архиве ESO (<http://archive.eso.org/wdb/wdb/eso/apex/form>), номер наблюдательной программы: program ID 0108.F-9313(A).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была поддержана Российским научным фондом, грант № 24-22-00097.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Agúndez, C. Cabezas, B. Tercero, et al., *Astron. and Astrophys.* **647**, id. L10 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202140553
2. H. G. Arce, D. Shepherd, F. Gueth, et al., *Protostars and Planets V*, Ed. by B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil, (University of Arizona Press, Tucson, 2007), p. 245. DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0603071
3. Z. Awad and S. Viti, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **511** (3), 3832 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac297
4. V. Belitsky, M. Bylund, V. Desmaris, et al., *Astron. and Astrophys.* **611**, id. A98 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201731883
5. H. Beuther and D. Shepherd, *Astrophysics and Space Science Library*, **324**, p. 105 (2005). DOI:10.1007/0-387-26357-8_8
6. E. V. Borshcheva and D. S. Wiebe, *Astronomy Reports* **66** (5), 393 (2022). DOI:10.1134/S1063772922060014

7. A. N. Byrne, C. Xue, I. R. Cooke, et al., *Astrophys. J.* **957** (2), id. 88 (2023). DOI:10.3847/1538-4357/aci863
8. R. F. Ferrante, M. H. Moore, M. M. Spiliotis, and R. L. Hudson, *Astrophys. J.* **684** (2), 1210 (2008). DOI:10.1086/590362
9. M. Figueira, L. Bronfman, A. Zavagno, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. L10 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201832930
10. G. W. Fuchs, H. M. Cuppen, S. Ioppolo, et al., *Astron. and Astrophys.* **505** (2), 629 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200810784
11. P. F. Goldsmith and W. D. Langer, *Astrophys. J.* **517** (1), 209 (1999). DOI:10.1086/307195
12. P. Gratier, J. Pety, E. Bron, et al., *Astron. and Astrophys.* **645**, id. A27 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202037871
13. R. Güsten, L. Å. Nyman, P. Schilke, et al., *Astron. and Astrophys.* **454** (2), L13 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20065420
14. S. V. Kalenskii and S. Kurtz, *Astronomy Reports* **60** (8), 702 (2016). DOI:10.1134/S1063772916080047
15. M. S. Kirsanova, Y. N. Pavlyuchenkov, A. O. H. Olofsson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **520** (1), 751 (2023). DOI:10.1093/mnras/stac3737
16. M. S. Kirsanova, Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488** (4), 5641 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz2048
17. M. S. Kirsanova, S. V. Salii, S. V. Kalenskii, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **503** (1), 633 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab499
18. O. V. Kochina and D. S. Wiebe, *Astronomy Letters* **50** (1), 70 (2024). DOI:10.1134/S1063773724600139
19. O. V. Kochina, D. S. Wiebe, S. V. Kalenskii, and A. I. Vasyunin, *Astronomy Reports* **57** (11), 818 (2013). DOI:10.1134/S1063772913110036
20. O. V. Kochina, D. S. Wiebe, Y. Pavlyuchenkov, and M. S. Kirsanova, in preparation (2025).
21. J. G. Mangum and Y. L. Shirley, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127** (949), 266 (2015). DOI:10.1086/680323
22. S. Maret, P. Hily-Blant, J. Pety, et al., *Astron. and Astrophys.* **526**, id. A47 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201015487
23. H. S. P. Müller, S. Thorwirth, D. A. Roth, and G. Winnewisser, *Astron. and Astrophys.* **370**, L49 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010367
24. M. S. Murga, M. S. Kirsanova, A. I. Vasyunin, and Y. N. Pavlyuchenkov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **497** (2), 2327 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa2026
25. M. S. Murga, A. I. Vasyunin, and M. S. Kirsanova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **519** (2), 2466 (2023). DOI:10.1093/mnras/stac3656
26. K. I. Öberg and E. A. Bergin, *Physics Reports* **893**, 1 (2021). DOI:10.1016/j.physrep.2020.09.004
27. J. H. Orkisz, J. Pety, M. Gerin, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, id. A99 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201629220
28. J. Pety, V. V. Guzmán, J. H. Orkisz, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, id. A98 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201629862
29. J. Pety, D. Teyssier, D. Fossé, et al., *Astron. and Astrophys.* **435** (3), 885 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20041170
30. K. V. Plakitina, M. S. Kirsanova, S. V. Kalenskii, et al., *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 235 (2024). DOI:10.1134/S1990341324600455
31. A. Punanova, A. Vasyunin, P. Caselli, et al., *Astrophys. J.* **927** (2), id. 213 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac4e7d
32. J. M. Rathborne, J. S. Whitaker, J. M. Jackson, et al., *Publ. Astron. Soc. Australia* **33**, id. e030 (2016). DOI:10.1017/pasa.2016.23
33. J. C. Santos, M. L. van Gelder, P. Nazari, et al., *Astron. and Astrophys.* **689**, id. A248 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202450736
34. D. Semenov and D. Wiebe, *Astrophys. J. Suppl.* **196** (2), article id. 25 (2011). DOI:10.1088/0067-0049/196/2/25
35. E. F. van Dishoeck, L. E. Kristensen, J. C. Mottram, et al., *Astron. and Astrophys.* **648**, id. A24 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039084
36. M. A. Voronkov, J. L. Caswell, S. P. Ellingsen, et al., *Proc. IAU Symp. No. 287*, Ed. by R. S. Booth, W. H. T. Vlemmings, and E. M. L. Humphreys (Cambridge University Press, Cambridge, 2012), pp. 433–440. DOI:10.1017/S174392131200748X
37. M. A. Voronkov, J. L. Caswell, S. P. Ellingsen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439** (3), 2584 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu116
38. N. Watanabe and A. Kouchi, *Astrophys. J.* **571** (2), L173 (2002). DOI:10.1086/341412
39. D. S. Wiebe, T. S. Molyarova, V. V. Akimkin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (2), 1843 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz512
40. I. Zinchenko, S. Y. Liu, Y. N. Su, et al., *Astrophys. J.* **810** (1), article id. 10 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/810/1/10

Gas-phase and Surface Chemistry in the Massive Star-Forming Region RCW 120**K. V. Plakitina¹, M. S. Kirsanova¹, D. S. Wiebe¹, and O. V. Kochina¹**¹Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

Molecules in the interstellar medium form both in the gas phase and on dust particles. The chemical pathways for molecular formation are not yet well understood in detail, so the question of which pathway predominates for a particular molecule remains open. We analysed broadband emission spectra of a dense molecular clump in the RCW120 region, obtained with the APEX telescope in the 200–260 GHz range, to investigate molecular formation pathways in regions of massive star formation at an early evolutionary stage. The correlations between the derived molecular column densities, obtained under the LTE assumption, were investigated. An excess of methanol was found in the southern part of the dense clump compared to its northern part, while the abundance of other molecules, such as CH₃CN and CH₃CCH, remain comparable. The methanol abundance is also elevated relative to other oxygen-bearing molecules, such as OCS and SO. To identify possible causes of the enhanced methanol abundance in the southern part of the clump, we conducted simulations using the astrochemical model Presta in a two-phase approximation, accounting for chemical processes in both the gas phase and the mantles of dust grains. Modelling showed that the enhanced methanol abundance in the gas phase may be due to its photodesorption from icy mantles. At an A_V value between 4^m to 6^m, methanol efficiently desorbs from ice mantles of dust grains upon interaction with photons, but it is not yet destroyed by UV radiation in the gas phase. A strong linear correlation between molecular column densities indicates that these molecules form in the same phase—either in the gas phase or on dust. However, integrated intensity maps of these molecules may differ, as seen for CCH and CH₃CN. If molecules form in different phases—one in the gas phase and the other in dust mantles—no correlation is observed, as seen with CCH and CH₃OH. The weak correlation between methanol and oxygen-bearing molecules that form on dust suggests that only the upper part of dust mantles, rich in CO ice, is being destroyed in the southern part of the clump.

Keywords: *astrochemistry—stars: formation—ISM: molecules—photodissociation regions—radio lines: ISM*