

УДК 524.5

ИЗЛУЧЕНИЕ МОЛЕКУЛ В НАПРАВЛЕНИИ НА МАССИВНЫЕ СГУСТКИ ОБЛАСТЕЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ S 231–S 235

© 2016 Д. А. Ладейщиков^{1*}, М. С. Кирсанова^{2**}, А. П. Цивилев^{3***}, А. М. Соболев^{1****}

¹Коуровская астрономическая обсерватория Уральского федерального университета, Екатеринбург, 620000 Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

³Пушчинская радиоастрономическая обсерватория Физического института РАН, Пушкино, 142290 Россия

Поступила в редакцию 9 октября 2015 года; принята в печать 21 марта 2016 года

Работа посвящена изучению областей звездообразования S 231–S 235 в радиолиниях молекул межзвездной среды — монооксида углерода (CO), аммиака (NH₃), цианоацетилена (HC₃N) и в мазерных линиях метанола (CH₃OH) и водяного пара (H₂O). Области S 231–S 235 входят в гигантское молекулярное облако G 174+2.5. Целью работы является поиск новых источников излучения в направлении на молекулярные сгустки и оценка их физических параметров по линиям молекул CO и NH₃. Получены новые регистрации линий NH₃ и HC₃N в источниках WB 89673 и WB 89668, что указывает на присутствие вещества с высокой плотностью. По линии CO определены размеры, лучевые концентрации и массы молекулярных сгустков. По линии NH₃ определены температуры и концентрации газа в молекулярных сгустках. Установлено, что значения температуры и концентрации молекулярного газа лежат в пределах 16–30 К и $2.8\text{--}7.2 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ соответственно. Линия CH₃OH на частоте 36.2 ГГц, которая является индикатором присутствия ударных волн в межзвездной среде, в источнике WB 89673 зарегистрирована впервые.

Ключевые слова: межзвездная среда: облака — межзвездная среда: молекулы — межзвездная среда: джеты и течения

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее актуальных и активно развивающихся направлений в астрофизике является исследование областей звездообразования. Богатые возможности для этого дает наличие в межзвездной среде большого числа молекул, которые достаточно интенсивно излучают в радиолиниях. В настоящий момент считается, что звездообразование происходит в местах повышенной концентрации молекулярного газа — сгустках, главная компонента которых — молекулярный водород (H₂). Поскольку молекулы водорода в сгустках не излучают в радиодиапазоне, используются радиолинии иных молекул, которые выступают индикаторами присутствия молекулярного газа, происходящих процессов и условий в межзвездной среде. В частности, линии молекулы монооксида углерода (CO) показывают общее распределение молекулярного газа в областях звездообразования

нашей Галактики [1]. Линии молекулы аммиака (NH₃) являются индикаторами температуры [2] и высокой плотности газа [3]. Линии молекулы цианоацетилена (HC₃N) также являются индикаторами высокой плотности газа [4]. Наблюдательные данные свидетельствуют о том, что мазерные и «квазитепловые» линии метанола (CH₃OH) дают возможность исследовать истечения из молодых звездных объектов и ударные волны в межзвездной среде [5–9], а мазеры на переходе молекулы воды (H₂O) указывают на происходящие активные процессы звездообразования [10]. В совокупности данная информация позволяет всесторонне исследовать места активного звездообразования, в том числе произвести оценку их физических параметров.

Целью настоящей работы является исследование массивных молекулярных сгустков областей звездообразования S 231–S 235, которые расположены в гигантском молекулярном облаке (ГМО) G 174+2.5. В данном направлении располагаются четыре развитых зоны ионизованного водорода: S 231, S 232, S 233 и S 235, согласно каталогу Шарплесса [11]. Исследователи

*E-mail: dmitry.ladeyschikov@urfu.ru

**E-mail: kirsanova@inasan.ru

***E-mail: tsivilev@prao.ru

****E-mail: andrej.sobolev@urfu.ru

выделяют шесть хорошо изученных молодых звездных скоплений: S 235 Central, S 235 East 1, S 235 East 2, S 235 AB (см., например, [12–14]), S 233 IR (см. [15–17]) и G 173.57+2.43 (см. [18, 19]). Кросс-идентификация скоплений, называемых разными авторами по-разному, проведена в работе Камарго [20]. На периферии располагаются менее изученные области звездообразования WB 89673 и WB 89668, названные в соответствии с каталогом Воутерлоота–Бранда [21]. Ранее морфология и кинематика этого комплекса звездообразования были исследованы по радиотелескопическим линиям CO Хейером и др. [22]. Карты излучения CO показывают, что наиболее выраженные области звездообразования в облаке G 174+2.5 — это S 231–S 235. Оценки расстояния до них лежат в пределах от 1.5 до 2.3 кпк [23, 24]. Области S 231–S 235 расположены в направлении, близком к галактическому антицентру. Как следует из работы Дейма и др. [25], в этом направлении не наблюдаются другие, более удаленные от Солнца области звездообразования в Галактике.

В данной работе представлены результаты наблюдений на радиотелескопе PT-22 ПРАО АКЦ ФИАН радиотелескопических молекул в молекулярных сгустках, предварительно выделенных по архивным данным об излучении CO в гигантском молекулярном облаке G 174+2.5. В первую очередь в направлении на выделенные молекулярные сгустки был осуществлен поиск метанольных мазеров I класса. После их обнаружения для подтверждения наличия плотного газа и определения физических характеристик вещества в сгустках, прежде всего, плотности и температуры, проведены наблюдения в линиях NH₃ и HC₃N. Таким образом, в данной работе мы приводим общие характеристики излучения молекул в направлении на области звездообразования S 231–S 235, а также оценки физических параметров излучающего газа и массы молекулярных сгустков. Используемые инструменты, ресурсы и методы подробно описаны в соответствующих разделах.

2. ВЫБОР ОБЪЕКТОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Для выделения молекулярных сгустков в направлении на области звездообразования S 231–S 235 и оценки их физических характеристик мы использовали архивные данные наблюдений в линиях ¹²CO(1–0) и ¹³CO(1–0). Они описаны в разделе 3. Детали методики расчета физических параметров даны в Приложении А. На полученную карту лучевой концентрации ¹³CO в направлении на области звездообразования S 231–S 235 были наложены положения IRAS-источников, при этом область исследования была ограничена окружностью с радиусом

50' вокруг центра зоны ионизованного водорода S 231 ($\alpha_{J2000} = 5^h 39^m 45^s$, $\delta_{J2000} = 35^\circ 54' 02''$) (см. рис. 1).

Для наблюдений в линии NH₃ были выбраны положения центров пиков лучевой концентрации ¹³CO. В линиях CH₃OH и HC₃N наблюдались такие IRAS-источники, положение которых совпадает или достаточно близко к локальным пикам лучевой концентрации ¹³CO. Если в непосредственной близости к пику оказывалось несколько IRAS-источников, и угловое расстояние между ними было меньше, чем размер диаграммы направленности PT-22, в этом случае в качестве источника для наведения выбирался ближайший к пику ¹³CO. В результате этого анализа для наблюдений на PT-22 были визуальным образом отобраны десять молекулярных сгустков. К выборке был добавлен калибровочный источник Dr 21 для сравнения результатов наблюдений с другими работами.

Координаты и основные физические характеристики источников приведены в таблице 1. Лучевая скорость и размер сгустков получен по данным излучения в линии ¹³CO(1–0). Температура возбуждения рассчитана по данным излучения в линии ¹²CO(1–0), показано среднее ее значение в пределах размеров молекулярных сгустков. Численные значения лучевой концентрации рассчитаны, исходя из карты ее распределения, представленной на рис. 1. В таблице показано среднее значение лучевых концентраций H₂ и массы в пределах размеров молекулярных сгустков. В последней колонке представлено значение вириального параметра $\alpha_{vir} \equiv M_{vir}/M$ (см. описание в разделе 5.1).

Все выбранные молекулярные сгустки излучают в континууме на длине волны 1.12 мм по данным обзора Volocam [26], что указывает на наличие нагретого плотного газа в них. Практически все они соответствуют молодым звездным скоплениям по данным обзорам неба в инфракрасном диапазоне Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE [27]) и UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS [28]). Подробнее связь сгустков со скоплениями рассмотрена в разделе 6.2.

3. АРХИВНЫЕ ДАННЫЕ ОБ ИЗЛУЧЕНИИ CO

Данные об излучении в линиях ¹²CO(1–0) и ¹³CO(1–0) получены по результатам наблюдений по программе высокоточного обзора галактической плоскости в линиях молекулы CO [29], проведенного на 13.7-метровом телескопе Five College Radio Astronomy Observatory (FCRAO) при помощи 32-пиксельного фокального приемника Second Quabbin Observatory Imaging Array (SEQUOIA). Картографирование областей

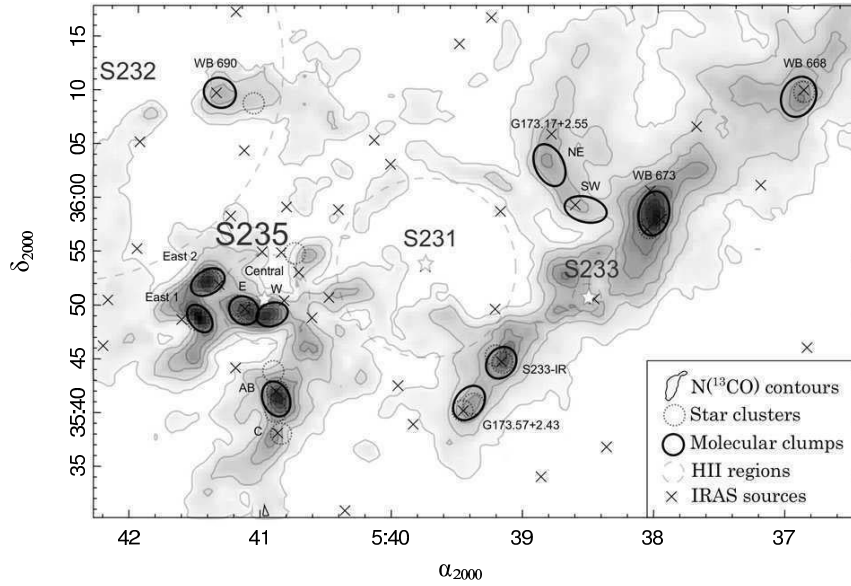


Рис. 1. Распределение лучевой концентрации ^{13}CO в направлении на области звездообразования S 231–S 235. Внешний контур соответствует значению $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, наиболее внутренний — $6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, шаг контура $8.4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Крестиками показано положение IRAS-источников. Жирными эллипсами выделены молекулярные сгустки, выбранные в рамках данной работы для наблюдений в линиях метанола, цианоацетилена и аммиака. Размеры эллипсов соответствуют размерам молекулярных сгустков. Пунктирными окружностями указано положение молодых звездных скоплений по данным из работы Камарго и др. [20]. Штриховыми окружностями выделены области ионизованного водорода (H II). Радиусы окружностей соответствуют радиусам областей H II по изображениям DSS R. Фигурами в виде звезд показано положение звезд, ионизирующих зоны H II.

Таблица 1. Каталог молекулярных сгустков в линии ^{13}CO с основными физическими характеристиками (детали см. в тексте)

Источник	α_{J2000} , h m s	δ_{J2000} , ° ' "	θ_{FWHM} , '	R , пк	V_{LSR} , км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	T_{ex} , К	$\bar{N}(\text{H}_2)$, 10 22 см $^{-2}$	$M(\text{H}_2)$, M_{\odot}	$\tau(^{13}\text{CO})$	α_{vir}
WB 89690	5 41 21.6	+36 10 00	3.1×2.7	0.87	−21.0	1.83	16.5	1.45	733	0.65	0.86
WB 89668	5 36 54.3	+36 10 16	3.9×3.1	1.06	−17.2	2.70	14.1	1.60	1199	0.85	1.40
WB 89673	5 38 00.6	+35 59 17	4.1×2.8	1.04	−19.5	3.16	20.8	2.90	2112	0.74	1.07
G 173.17+2.55 NE	5 38 49.0	+36 03 41	4.1×2.6	0.99	−17.9	2.44	16.4	1.66	1095	0.69	1.18
G 173.57+2.43	5 39 24.7	+35 41 28	3.5×2.6	0.90	−16.8	2.38	17.2	1.70	932	0.65	1.20
S 233-IR	5 39 10.2	+35 45 15	3.1×2.6	0.83	−16.9	2.76	22.1	2.29	1048	0.55	1.31
S 235 Central E	5 41 08.8	+35 49 47	2.9×2.5	0.83	−19.6	1.92	35.6	3.67	1683	0.35	0.39
S 235 Central W	5 40 55.8	+35 49 27	3.0×2.1	0.74	−21.5	1.93	31.6	3.65	1347	0.49	0.45
S 235 East 1	5 41 29.0	+35 48 58	2.9×1.9	0.74	−18.9	1.80	32.7	4.31	1591	0.51	0.33
S 235 East 2	5 41 25.6	+35 52 21	3.4×2.2	0.87	−20.8	1.78	29.4	3.62	1822	0.55	0.33
S 235-AB	5 40 53.3	+35 41 35	3.4×2.5	0.90	−16.5	2.30	27.0	3.53	1935	0.59	0.54

S 231–S 235 состоялось в январе 2000 г. Карта излучения в линиях обоих изотопов CO покрывает область размером $150' \times 150'$ с центром $l = 173^\circ 25'$, $b = 2^\circ 75'$ ($\alpha_{J2000} = 5^h 40^m$, $\delta_{J2000} = 36^\circ 07'$). Размер диаграммы направленности для данного телескопа составляет $45''$ для $^{12}\text{CO}(1-0)$ и $47''$ для $^{13}\text{CO}(1-0)$. Наблюдаемая частота была установлена равной 115.27120 ГГц для линии $^{12}\text{CO}(1-0)$ и 110.20135 ГГц для $^{13}\text{CO}(1-0)$. Пространственный шаг составлял $22''.5$, что в два раза меньше, чем размер диаграммы направленности на половине уровня мощности (HPBW). Шаг по скорости равнялся 0.127 км с^{-1} для $^{12}\text{CO}(1-0)$ и 0.133 км с^{-1} для $^{13}\text{CO}(1-0)$. Уровень $\sigma_{T_{\text{mb}}}$ для $^{12}\text{CO}(1-0)$ составлял 1.1 К, а для $^{13}\text{CO}(1-0)$ — 0.63 К по шкале антенных температур. Для обработки данных в линиях CO и для расчета физических параметров использовался пакет MIRIAD [30]. Интегрирование и статистический анализ величин физических параметров выполнялись с помощью программы ds9 [31].

4. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Все данные были получены на телескопе РТ-22 Пушинской радиоастрономической обсерватории ФИАН. Мы провели несколько сессий наблюдений в 2013, 2014 и 2015 гг. в режиме сканов по 4–7 мин. Данные каждого скана калибровались к антенной температуре по эталонному сигналу от генератора шума с известной антенной температурой и корректировались за поглощение атмосферой. Затем были получены средние спектры по дням, далее — средние между днями. Антенная температура T_a приводилась к яркостной температуре, усредненной по главному лучу диаграммы направленности T_{mb} с помощью коэффициента использования диаграммы направленности η_{mb} . На рис. 2, 3 и 4 показаны спектры полученных линий по шкале T_{mb} , а в таблицах 2, 3 и 4 представлены их параметры. Для оценки качества полученных данных проводились наблюдения источника Dg 21, которые сравнивались с представленными в работах [32–34]. Точность калибровки по результатам сравнения составляет приблизительно 10–30%.

4.1. Наблюдения в диапазоне 8 мм

Для выполнения программы наблюдений был использован двухканальный радиометр РТ-22 диапазона 8 мм. Он предназначен для одновременного наблюдения двух линий в случае если частоты линий находятся в диапазоне от 34 до 38 ГГц и разность частот линий не превышает 2 ГГц. В рамках настоящей работы наблюдения проводились в

линиях метанола ($4_{-1}-3_0 \text{ E}$, 36.1 ГГц) и цианоацетилена ($J = 4-3$, 36.3 ГГц) с помощью анализатора спектра с постоянной полосой пропускания 50 МГц. Спектральное разрешение составило 24.41 кГц, что соответствует 0.20 км с^{-1} для частоты линии метанола. Частота покоя для линии CH_3OH была установлена равной 36 169.29 МГц, а для линии HC_3N — 36 392.33 МГц. Был использован метод наблюдения ON–ON, основанный на диаграммной модуляции [35], при котором на выходе получается удвоенный сигнал. Разнос лучей (рупоров) составил $23'$. Размер диаграммы направленности на половине уровня мощности (HPBW) — $2'$, а коэффициент использования диаграммы направленности — $\eta_{\text{mb}} = 0.32$. Во время наблюдений системная температура T_{sys} находилась в диапазоне от 200 до 240 К. При среднем времени накопления для каждого источника от 2 до 3 часов на каждый день наблюдений суммарное накопление составило от 5 до 8 часов для источников, в которых линия была зарегистрирована, и от 1 до 2 часов для источников без регистрации линии. Достигнутый уровень шума $\sigma_{T_{\text{mb}}}$ находится в диапазоне от 0.05 до 0.28 К по шкале яркостных температур. Проверка наблюдаемой лучевой скорости проводилась по источнику Dg 21 ($\alpha_{J2000} = 20^h 38^m 55^s$, $\delta_{J2000} = 42^\circ 19' 23''$), у которого ранее линия метанола на 36.1 ГГц зарегистрирована в работе Лехта и др. [36], а линия цианоацетилена — в работе Толмачева и др. [32]. По результатам проверки полученные лучевые скорости линии метанола ($V_{\text{CH}_3\text{OH}} = -2.73 \pm 0.01 \text{ км с}^{-1}$) и цианоацетилена ($V_{\text{HC}_3\text{N}} = -3.08 \pm 0.06 \text{ км с}^{-1}$) в источнике Dg 21 находятся в допустимом пределе ошибок в соответствии с работами [32, 36].

Обработка проводилась программой CLASS из пакета GILDAS [37]. Форма профилей линий в спектрах метанола и цианоацетилена аппроксимировалась с помощью стандартного метода GAUSS. Из-за сложной структуры линий молекулы метанола в приближении использовались две функции Гаусса.

4.2. Наблюдения в диапазоне 13 мм

Наблюдения в линии аммиака ($\text{NH}_3(1,1)$ и $(2,2)$, 23.6 ГГц) проводились на одноканальном радиометре диапазона 13.5 мм. Для перехода $(1,1)$ была использована частота покоя 23 694.495 МГц, а для линии $(2,2)$ — 23 722.633 МГц. Применялся метод наблюдения ON–ON, основанный на диаграммной модуляции [35], с удвоенным сигналом на выходе. Разнос лучей (рупоров) составлял $10'$. Размер диаграммы направленности на половине уровня мощности (HPBW) на длине волны 13.5 мм — $2'6$, а коэффициент использования

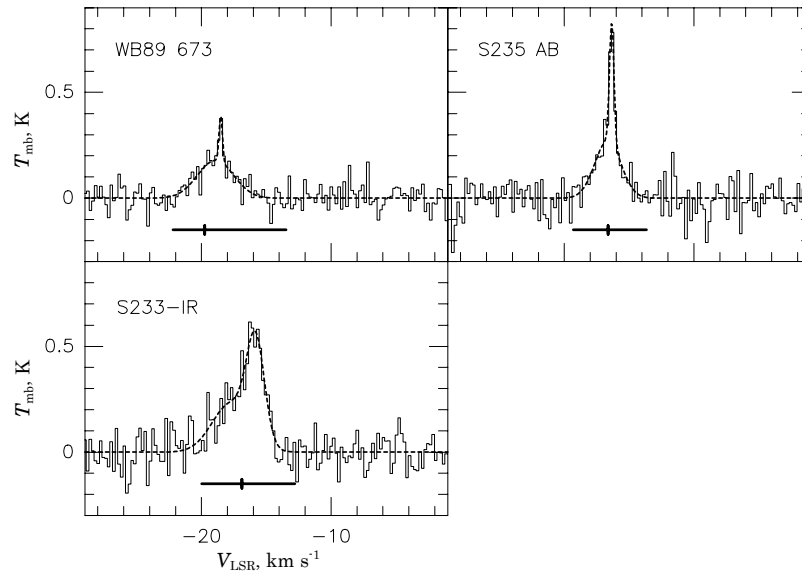


Рис. 2. Спектры зарегистрированных источников в линии CH_3OH на частоте 36.2 ГГц. Штриховой линией показана аппроксимация профилей линий функцией Гаусса, отрезком в нижней части спектров — диапазон скоростей ^{13}CO , а маркером обозначено положение пика линии ^{13}CO .

Таблица 2. Параметры линий метанола (CH_3OH) на частоте 36.2 ГГц. Звездочкой отмечены источники, в которых линия была зарегистрирована впервые. Представлены две компоненты излучения — узкая и широкая (см. обсуждение в разделе 6.3). В качестве координат для источников были выбраны положения ассоциированных IRAS-источников, t — время накопления, 1σ — достигнутый уровень шума. Ошибки определения величин приведены в скобках.

Источник	IRAS	T_{mb} , К	V , км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	t , мин.	1σ , К
WB 89690	05380+3608	< 0.08			346	0.08
WB 89668	05335+3609	< 0.10			173	0.10
WB 89673*	05345+3556	0.21 (0.04)	-18.51(0.05)	0.30 (0.10)	500	0.05
		0.17 (0.04)	-18.91(0.16)	3.20 (0.38)	500	0.05
S 233-IR	05358+3543	0.47 (0.07)	-15.81(0.09)	1.60 (0.20)	386	0.08
		0.23 (0.07)	-17.70(0.48)	3.50 (0.80)	386	0.08
G 173.57+2.43	05361+3539	< 0.28			180	0.28
S 235-AB	05375+3540	0.57 (0.04)	-16.34(0.03)	0.42 (0.07)	353	0.07
		0.27 (0.04)	-16.64(0.15)	2.38 (0.34)	353	0.07
S 235 Central E	05377+3548	< 0.15			126	0.15
S 235 East 1	05382+3547	< 0.13			106	0.13
S 235 East 2	05379+3550	< 0.13			113	0.13
Dr 21	—	1.82 (0.06)	-2.73(0.02)	0.49 (0.04)	333	0.09

диаграммы направленности — $\eta_{\text{mb}} = 0.38$. Было проведено две сессии наблюдений — в 2013 и 2015 гг. Системная температура во время наблюдений находилась в диапазоне от 110 до 190 К по шкале антенной температуры.

В 2013 г. наблюдалась только линия $\text{NH}_3(1,1)$ для первичной регистрации излучения аммиака в выбранных источниках. Была использована полоса анализатора спектра шириной 12.5 МГц, состоящая из 2048 каналов. Спектральное разрешение составило примерно 6.1 кГц, что соответствует приблизительно 0.08 км с^{-1} для частоты покоя линии аммиака. Время накопления для источников составило 1–2 часа, достигнутый уровень шума $\sigma_{T_{\text{mb}}}$ находился в диапазоне от 0.1 до 0.2 К для разных источников по шкале яркостных температур.

В 2015 г. с низким уровнем шума одновременно наблюдались две линии аммиака в переходах (1,1) и (2,2) для оценки физических параметров газа. Использовалась полоса анализатора 50 МГц, поэтому спектральное разрешение составило примерно 24.4 кГц, что соответствует приблизительно 0.31 км с^{-1} для частоты покоя линии аммиака. Центральная частота полосы анализатора спектра была установлена по центру между переходами (1,1) и (2,2), для того чтобы в полосу анализатора попали оба перехода. Расстояние между частотами двух переходов линии NH_3 — 28.138 МГц, что достаточно для их одновременной регистрации на анализаторе спектра с шириной полосы 50 МГц. Время накопления для источников с регистрацией линии было 9–15 часов, а для источников без регистрации — 2–5 часа. Достигнутый уровень $\sigma_{T_{\text{mb}}}$ для источников с регистрацией — от 0.01 до 0.04 К.

Аппроксимация спектров линий аммиака проводилась с помощью метода $\text{NH}_3(1,1)$ из программы CLASS [37], а при последующем сглаживании применялась процедура SMOOTH из этой же программы.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Массы сгустков и содержание молекулярного водорода в них

Определяя лучевую концентрацию и массу газа в исследуемых молекулярных сгустках, мы в целом следовали методике, описанной в работе Роман-Дувал и др. [38], с некоторыми изменениями. Формулы для определения физических параметров сгустков даны в Приложении А. Оценка была произведена в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Для оценки температуры возбуждения были использованы данные по излучению в линии молекулы ^{12}CO ,

так как она является оптически толстой, что подтверждается низким соотношением интенсивностей линий $I(^{12}\text{CO})/I(^{13}\text{CO}) \approx 3\text{--}6$ по сравнению с предполагаемым отношением обилий молекул $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO} \approx 50\text{--}70$. Для оценки лучевой концентрации молекул H_2 было использовано излучение в линии ^{13}CO , имеющей меньшую оптическую толщину по сравнению с линией ^{12}CO .

Для оценки массы использовался ряд констант. Отношение обилий $\text{CO}/\text{H}_2 = 8 \times 10^{-5}$, в соответствии с работой Саймона [39]. Расстояние до всех сгустков было принято равным $2.1 \pm 0.5 \text{ кпк}$ — среднее по оценке расстояния до молодых звездных скоплений из ГМО G 174+2.5 из работы Камарго и др. [20]. Для данного расстояния средний галактоцентрический радиус составляет 10.1 кпк или $1.26 D_{\odot}$ при использовании оценки расстояния от Солнца до центра Галактики $D_{\odot} = 8.0 \text{ кпк}$ из работы Рийда и др. [40]. Согласно работе Лэнжера и Пензиаса [41], отношение обилий $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ на таком галактоцентрическом расстоянии примерно 70, поэтому отношение обилий $^{13}\text{CO}/\text{H}_2 = [\text{CO}/\text{H}_2]/[^{12}\text{C}/^{13}\text{C}] \approx 1.14 \times 10^{-6}$. Данное значение было использовано для расчета лучевой концентрации H_2 и массы сгустков.

Для более точного выделения молекулярных сгустков в линии ^{13}CO был использован алгоритм GaussClump [42]. Данный алгоритм работает по принципу последовательного вписывания трехмерных гауссиан в исходный куб данных «положение—положение—лучевая скорость» (PPV), начиная от глобального максимума излучения. В качестве порога на минимальный пространственный размер сгустков (θ_{FWHM}) было установлено значение $1''.7$, так как при меньшем пороге крупные молекулярные сгустки разделяются на отдельные компоненты. Но даже при таком значении порога некоторые сгустки (в частности, S 235 Central и G 173.17+2.55) разделяются на отдельные компоненты, что будет обсуждаться далее. Порог на минимальную ширину линии (ΔV) для сгустков установлен 0.8 км с^{-1} , что обусловлено необходимостью выделения только массивных сгустков, имеющих относительно высокую дисперсию лучевой скорости. Результатом работы алгоритма стало выделение двенадцати сгустков, соответствующих IRAS-источникам по критерию, описанному в разделе 2. Два сгустка распадаются на отдельные компоненты — это S 235 Central и G 173.17+2.55, о чем будет написано в обсуждении результатов. Размеры сгустков определены как ширины на уровне половины интенсивности (θ_{FWHM}). Масса сгустков оценена в результате интегрирования излучения сгустков по площади, соответствующей размеру сгустков на уровне половины интенсивности. Результаты оценки размеров сгустков, лучевой

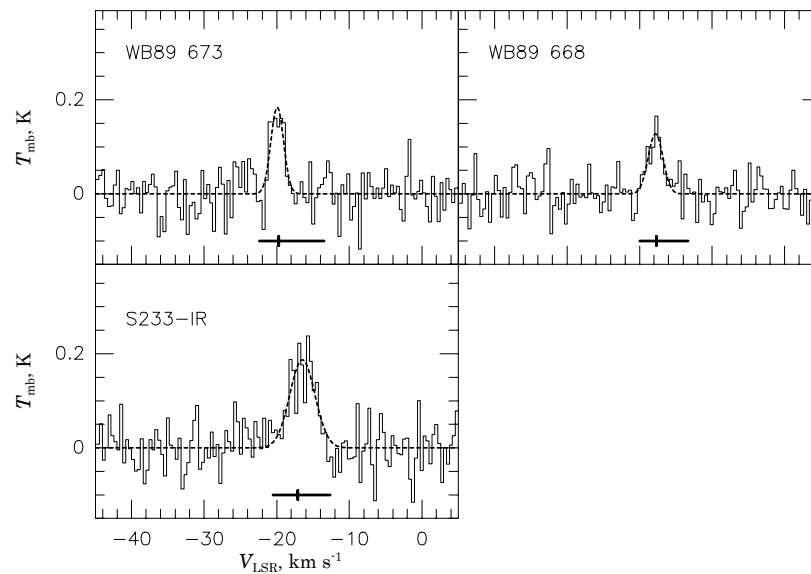


Рис. 3. Спектры источников, зарегистрированных в линии HC_3N на частоте 36.4 ГГц. Обозначения те же, что и на рис. 2.

Таблица 3. Параметры линий цианоацетилена (HC_3N) на частоте 36.4 ГГц. Звездочкой отмечены источники, в которых линия была зарегистрирована впервые. В качестве координат для источников были выбраны положения ассоциированных IRAS-источников, t — время накопления, 1σ — достигнутый уровень шума. Ошибки определения величин приведены в скобках.

Источник	IRAS	T_{mb} , К	V , км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	t , мин.	1σ , К
WB 89690	05380+3608	< 0.09			346	0.09
WB 89668*	05335+3609	0.12(0.03)	-17.80(0.20)	2.4 (0.50)	460	0.06
WB 89673*	05345+3556	0.18(0.04)	-19.94(0.14)	2.0 (0.26)	293	0.07
S 233-IR	05358+3543	0.19(0.07)	-16.40(0.24)	4.1 (0.50)	353	0.05
G 173.57+2.43	05361+3539	< 0.19			180	0.19
S 235-AB	05375+3540	< 0.08			266	0.08
S 235 Central E	05377+3548	< 0.14			126	0.14
S 235 East 1	05382+3547	< 0.12			106	0.12
S 235 East 2	05379+3550	< 0.17			113	0.17
Dr 21	-	0.56 (0.06)	-3.08(0.06)	2.9 (0.16)	343	0.06

концентрации H_2 , а также массы приведены в таблице 1. Карта распределения лучевой концентрации H_2 с наложенными размерами молекулярных сгустков дана на рис. 1.

Вириальный параметр сгустков $\alpha_{\text{vir}} \equiv M_{\text{vir}}/M_{\text{CO}}$ и радиус R рассчитаны согласно определению в работе Кауффманн и др. [43], формулы для расчета представлены в Приложении А. Расстояние до всех сгустков принято равным 2.1 кпк, а дисперсия скорости рассчитывалась исходя из ширины линии

^{13}CO по формуле $\sigma_v = 2.35\Delta V_{13}$. Полученные значения α_{vir} и R представлены в таблице 1. Следует отметить, что способы определения представленных в таблице 1 радиуса сгустка R и углового размера θ_{FWHM} различаются: первый определяется из площади сгустка по формуле $R = \sqrt{A/\pi}$, а второй — из ширины (FWHM) гауссовой функции, вписанной в профиль интенсивности сгустка.

Нами установлено, что средняя лучевая кон-

центрация молекулы ^{13}CO в направлении на рассматриваемые молекулярные сгустки из областей S 231–S 235 находится в диапазоне от $1.6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в WB 690 до $4.8 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ в S 235 East 1. Используя полученное выше соотношение $^{13}\text{CO}/\text{H}_2 = 1.14 \times 10^{-6}$, можно получить величину средней лучевой концентрации молекулярного водорода в направлении на сгустки — от $1.45 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ в WB 690 до $4.21 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ в S 235 East 1. Полученные значения следует трактовать как нижнюю оценку лучевой концентрации молекулярного водорода, так как анализ излучения CO в рамках ЛТР имеет тенденцию к занижению действительных значений лучевых концентраций на фактор от 1.3 до 7, согласно работе Падоана [44]. Масса сгустков по данным CO находится в диапазоне от $733 M_\odot$ в WB 89690 до $2112 M_\odot$ в WB 89673. Величина вириального параметра α_{vir} варьируется от 0.33 в S 235 East 2 до 1.31 в S 233-IR. Его среднее значение — $\overline{\alpha_{\text{vir}}} = 0.82$, что в целом указывает на соответствие вириальной массы и массы по данным ^{13}CO .

Температуру возбуждения, полученную по данным ^{12}CO , следует интерпретировать как температуру газа, близкого к поверхности молекулярного облака, так как линия ^{12}CO является оптически толстой. Согласно полученным данным (см. таблицу 1), самая «холодная» поверхность — у молекулярного сгустка WB 89668 (14.1 К), самая «теплая» — у сгустка S 235 Central E (35.6 К). Средняя температура на поверхности молекулярных сгустков составляет 24 К.

5.2. Линии-индикаторы плотного молекулярного газа

В наблюдениях на частоте 36.2 ГГц линии метанола зарегистрированы в направлении на молекулярные сгустки WB 89673, S 233-IR и S 235-AB. В сгустке WB 89673 излучение метанола было обнаружено впервые. Форма профилей линий в большинстве случаев отличается от гауссианы, а в направлении на S 233-IR линия имеет асимметричную структуру с ярко выраженным синим крылом. В зарегистрированных линиях метанола можно выделить две компоненты излучения — широкую и узкую. Ширина узких компонент находится в диапазоне от 0.3 до 1.6 км с $^{-1}$, широких компонент — от 2.4 до 3.5 км с $^{-1}$. Положения узких и широких компонент смещены друг относительно друга на величину от 0.3 до 1.8 км с $^{-1}$. Отличие лучевых скоростей линий метанола и ^{13}CO не превышает 1.2 км с $^{-1}$.

В линии молекулы цианоацетилена излучение было зарегистрировано в направлении на молекулярные сгустки WB 89668, WB 89673 и

S 233-IR и S 235 Central. В сгустках WB 89668 и WB 89673 линия HC_3N была зарегистрирована впервые. Формы профилей линий близки к гауссовым, средняя ширина линий составляет примерно 2.4 км с $^{-1}$, кроме S 233-IR, в котором ширина линии составила $4.0 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}$. Отличие лучевых скоростей линий HC_3N и CO в сгустках WB 89668 и WB 89673 не превышает 0.5 км с $^{-1}$. В сгустке S 233-IR лучевые скорости HC_3N смещены в красную область спектра по сравнению с лучевой скоростью ^{13}CO . Разность лучевых скоростей составляет 1.4 км с $^{-1}$.

Излучение аммиака было зарегистрировано в направлении на молекулярные сгустки WB 89668, WB 89673, G 173.57+2.43, S 233-IR, S 235 Central, S 235 East 1, S 235 East 2 и S 235-AB; для WB 89668 и WB 89673 — впервые. Сверхтонкая структура линий аммиака выделяется с точностью, необходимой для определения физических условий в молекулярном газе. Отличие лучевых скоростей линий $\text{NH}_3(1, 1)$ и ^{13}CO в сгустках WB 89668, WB 89673, G 173.57+2.43, S 235-AB и S 233-IR не превышает 0.5 км с $^{-1}$.

Параметры обнаруженных молекулярных линий приведены в таблицах 2–4.

5.3. Температура и плотность молекулярного газа

Для определения температуры и плотности газа в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР) мы использовали отношение антенной температуры главной компоненты спектра NH_3 к антенной температуре спутельных компонент сверхтонкой структуры спектра, а также отношение главных компонент переходов $\text{NH}_3(J, H) = (1, 1)$ и $(2, 2)$. Методика определения физических параметров описана в Приложении В. В результате были получены оценки лучевой концентрации аммиака (N_{NH_3}), кинетической температуры (T_{kin}) и плотности молекулярного газа (n_{H_2}).

Так как средний размер источников в линии NH_3 в данном комплексе (приблизительно $50''$ – $110''$, см. таблицу 6 из работы Кирсановой и др. [13]) меньше, чем размер диаграммы РТ-22 ($156''$), то для расчета яркостной температуры линий NH_3 необходимо ввести поправку за заполнение диаграммы направленности. Была использована следующая формула (см. уравнения (8.21)–(8.22) из книги Рольфа и Вильсона [45]) для оценки яркостной температуры источника:

$$T_B = T_{\text{mb}} \times \left(1 + \frac{\theta_{\text{beam}}^2}{\theta_{\text{maj}} \theta_{\text{min}}} \right), \quad (1)$$

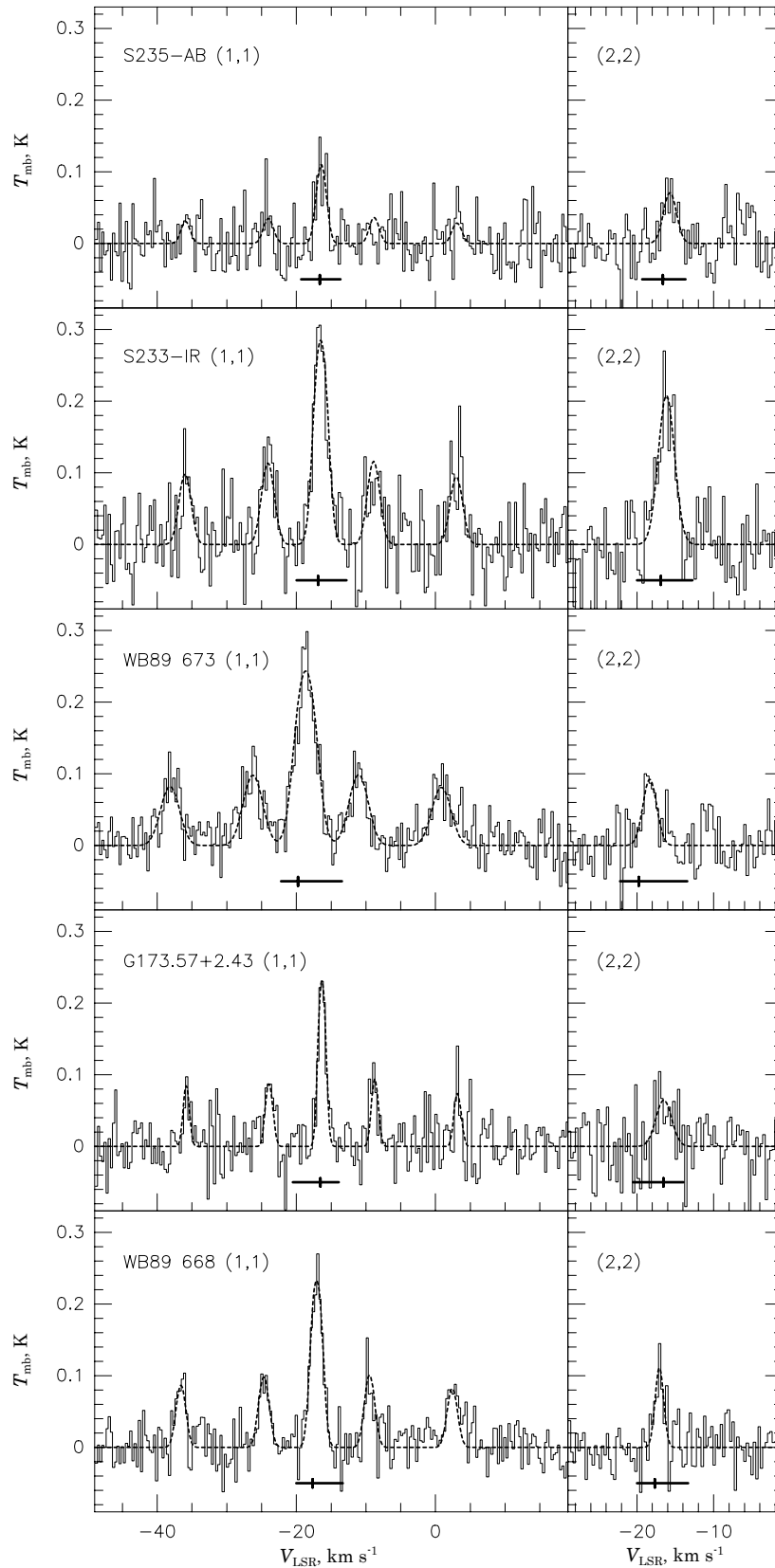


Рис. 4. Спектры зарегистрированных источников в линии NH_3 на 23.7 ГГц. Обозначения те же, что и на рис. 2.

Таблица 4. Результаты наблюдений областей звездообразования в линии аммиака (NH_3) на частоте 23.7 ГГц и физические параметры газа в молекулярных сгустках (в скобках даны ошибки определения величин). Звездочкой отмечены источники, в которых линия была зарегистрирована впервые. В качестве координат для источников были выбраны положения центров пиков ^{13}CO (см. координаты из таблицы 1)

Источник	(J, K)	T_{mb} , К	T_B , К	V , км с $^{-1}$	ΔV , км с $^{-1}$	$\tau_{(1,1)\text{m}}$	$\frac{\Theta_{\text{beam}}^2}{\Theta_{\text{maj}}\Theta_{\text{min}}}$	T_{kin} , К	$N(\text{NH}_3)$, 10^{14} см $^{-2}$	$n(\text{H}_2)$, 10^3 см $^{-3}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
WB 89668*	(1, 1)	0.24(0.01)	1.3(0.10)	-17.1(0.1)	1.7(0.1)	1.4(0.3)	4.3	16.5(1.9)	7.3(1.5)	4.2
	(2, 2)	0.09(0.01)	0.5(0.10)	-17.1(0.1)	1.5(0.3)					
WB 89673*	(1, 1)	0.25(0.01)	1.1(0.10)	-18.6(0.1)	3.1(0.1)	1.2(0.3)	3.5	15.9(1.5)	12.4(2.2)	4.1
	(2, 2)	0.08(0.01)	0.4(0.10)	-18.2(0.2)	2.9(0.6)					
S 233-IR	(1, 1)	0.28(0.03)	2.2(0.20)	-16.5(0.1)	2.0(0.1)	1.2(0.4)	6.9	29.4(11.8)	9.9(1.9)	7.2
	(2, 2)	0.21(0.04)	1.7(0.30)	-16.2(0.1)	2.6(0.3)					
G 173.57+2.43	(1, 1)	0.23(0.03)	1.4(0.20)	-16.3(0.1)	1.2(0.1)	1.2(0.5)	5.1	14.4(5.2)	5.1(1.0)	5.6
	(2, 2)	0.06(0.01)	0.4(0.10)	-16.5(0.3)	2.3(0.5)					
S 235-AB	(1, 1)	0.11(0.03)	0.6(0.20)	-16.4(0.1)	1.6(0.3)	0.6(0.9)	4.4	27.4(59.7)	2.2(1.7)	2.8
	(2, 2)	0.07(0.04)	0.4(0.21)	-15.7(0.3)	2.1(0.6)					

где $T_{\text{mb}} = T_a/\eta_{\text{mb}}$ — яркостная температура, усредненная по главному лучу диаграммы направленности, $\theta_{\text{beam}} = 152 \gg$ — размер диаграммы направленности РТ-22 на длине волны 1.35 мм, θ_{maj} и θ_{min} — размеры источников (FWHM) вдоль больших и малых полуосей.

Для оценки размеров источников в линии NH_3 были использованы данные по излучению в континууме на длине волны 1.1 мм из обзора Volosat [26]. Сопоставление источников излучения в континууме на длине волны 1.1 мм и в линии NH_3 в направлении на S 235 Central, East 1, East 2 [13], S 233-IR [46] и G 173.57+2.43 [47] показали, что их размеры в целом соответствуют друг другу, поэтому для оценки яркостных температур в линии NH_3 можно использовать размеры источников на длине волны 1.1 мм. Размеры источников были определены при помощи вписывания двумерных гауссиан в изображения программой IMFIT из пакета MIRIAD [30]. Результаты определения представлены в таблице 5. Для расчета физических параметров газа по линиям NH_3 использованы значения яркостных температур по формуле (1).

Полученные значения физических параметров приведены в таблице 4. Обозначения в таблице следующие: T_{mb} — яркостная температура, усредненная по главному лучу диаграммы направленности, T_B — яркостная температура источника, $\tau_{(1,1)\text{m}}$ — оптическая толщина главного компонента линии (1, 1). В восьмой колонке приведено

Таблица 5. Размеры сгустков в направлении на области звездообразования S 231–S 235 по данным в континууме на длине волны 1.1 мм из обзора Volosat [26]. В скобках приведено среднеквадратическое отклонение

Источник	θ_{maj} , "	θ_{min} , "
WB 89668	87 (12)	65 (10)
WB 89673	149 (13)	66 (5)
G 173.57+2.43	81 (11)	59 (8)
S 233-IR	67 (2)	53 (2)
S 235 Central	163 (11)	96 (7)
S 235 East 1	125 (12)	55 (4)
S 235 East 2	93 (14)	86 (13)
S 235-AB	86 (3)	65 (10)

значение коэффициента для перевода из T_{mb} в T_B по формуле (1). Концентрация молекулярного газа в направлении на сгустки WB 89673, WB 89668, S 233-IR, G 173.57+2.43 и S 235-AB лежит в диапазоне $2.8\text{--}7.2 \times 10^3$ см $^{-3}$. Наиболее высокая концентрация газа ($n = 7.2 \times 10^3$ см $^{-3}$) зарегистрирована в направлении на S 233-IR. Кинетическая температура для сгустков WB 89668, WB 89673 и

G 173.57+2.43 примерно одинакова и составляет 14–16 К, а для S 233-IR и S 235-AB — 27–30 К. Лучевая концентрация аммиака N_{NH_3} находится в диапазоне $2.2\text{--}12.4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Наиболее яркое излучение аммиака зарегистрировано в S 233-IR и WB 89673, причем температура газа в этих сгустках различна: $T_{\text{kin}} = 29.4 \pm 11.8 \text{ К}$ и $T_{\text{kin}} = 15.9 \pm 1.5 \text{ К}$. Примечательно, что симметричные компоненты сверхтонкой структуры в S 233-IR имеют разную интенсивность, что указывает на эффекты отклонения от ЛТР, которые мы обсуждаем далее.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Выявление всех массивных молекулярных сгустков в ГМО G 174+2.5 позволяет изучить условия и последовательность звездообразования в нем. Морфология областей звездообразования сложна, распределение газа неоднородно, что видно из рис. 1. В работе Хейера и др. [22] делается вывод о существовании молекулярных волокон, связанных с областями S 235 и S 231. В работе Эванса и др. [48] говорится о том, что вокруг зоны II S 235 наблюдаются два молекулярных облака, имеющих различную лучевую скорость. В работах Кирсановой и др. [12, 13] приводится интерпретация кинематической структуры окрестностей S 235 в рамках модели индуцированного звездообразования «сбора и сжатия» («collect-and-collapse», см. [49, 50]). В работе Ладейщикова и др. [51] показано, что в области S 233 расширение зоны II привело к обжатию массивного молекулярного сгустка с инициированием последующего звездообразования в нем.

6.1. Распределение плотного газа в областях S 231–S 235

В нашей работе показано, что пространственное распределение излучения в линиях молекулы CO можно использовать для исследования общих характеристик молекулярных облаков и для поиска плотных сгустков, в которых, возможно, происходит образование звезд. Однако для подробного изучения звездообразования одной только молекулы CO недостаточно, так как излучение в линиях CO указывает на наличие газа умеренной плотности и переходит в насыщение при более высокой плотности. В случае если на луче зрения оказывается область газа большой протяженности, по оценкам по линиям CO его лучевая концентрация может быть высока, однако в действительности газ не будет высокоплотным. Один из наиболее ярких примеров такой ситуации можно наблюдать в NGC 6334 [57], где пик в линии CO не соответствует пику в линиях молекул HCO⁺,

Таблица 6. Список первых регистраций молекулярных линий по литературным данным и результатам этой работы (отмечено как [tw]). Значками «+» и «-» обозначены источники, где линия соответственно была и не была зарегистрирована

Источник	H ₂ O	NH ₃	HC ₃ N	CH ₃ OH	SiO
	22 ГГц	23 ГГц	36 ГГц	36 ГГц	86 ГГц
WB 89690	+ [52]			+ [tw]	- [53]
WB 89668	+ [52]	+ [tw]	+ [tw]		
WB 89673	+ [52]	+ [tw]	+ [tw]	+ [tw]	+ [53]
G 173.17+2.55		- [tw]			
G 173.57+2.43	+ [52]	+ [54]			
S 233-IR	+ [52]	+ [47]	+ [55]	+ [36]	+ [53]
S 235 Central	+ [52]	+ [47]	+ [55]		- [53]
S 235 East 1	- (c)	+ [13]			
S 235 East 2	- (c)	+ [13]			+ [53]
S 235-AB	+ [52]	+ [56]	+ [55]	+ [36]	- [53]

HCN и N₂H⁺. Для подтверждения наличия газа с высокой плотностью требуются дополнительные наблюдения в линиях молекул, имеющих высокую критическую плотность. В данной работе мы используем линии молекул HC₃N (4–3) и NH₃ (1, 1), критическая плотность которых $n_{\text{crit}} \simeq 10^4 \text{ см}^{-3}$ и $n_{\text{crit}} \simeq 10^3 \text{ см}^{-3}$ соответственно. В таблице 6 приведены сведения из литературы об обнаружении линий-индикаторов плотного газа в областях S 231–S 235. Обилие HC₃N значительно в плотном нагретом газе около молодых звезд (см., например, Мейер и др. [58] и Линдберг и др. [59]), причем линии HC₃N в областях звездообразования являются оптически тонкими, как было показано Ван ден Боутом [60].

Ранее области звездообразования S 231–S 235 в линии цианоацетилена были исследованы в работе Алакоза и др. [61], причем в источниках S 233-IR и S 235-AB излучение на уровне $3\sigma = 0.25 \text{ К}$ зарегистрировано не было. Однако через год в работе Пирогова и др. [55] были зарегистрированы линии сразу в трех источниках. Эти источники были обозначены авторами как S 231, S 235B и S 235 и ассоциируются с молекулярными сгустками S 233-IR, S 235-AB и S 235 Central соответственно.

Согласно работе Мейера и др. [58], излучение цианоацетилена хорошо коррелирует с излучением в континууме на 3 мм. По архивным данным BGPS [26] все молекулярные сгустки, в которых

зарегистрировано излучение в линии HC_3N , излучают также и в континууме на 1.2 мм. Однако нами в направлении на S 235 East 1, S 235 East 2 и S 235 Central излучение HC_3N зарегистрировано не было, что может быть связано с недостаточным порогом чувствительности наблюдений.

Линия аммиака в S 231–S 235 впервые была зарегистрирована в направлении на источник S 235–AB практически одновременно в работах Хо и др. [62] и МакДональд и др. [56]. Затем в работе Харью и др. [63] была зарегистрирована линия аммиака в источнике IRAS 05361+3539 (наш G 173.57+2.43), в работе Шрейер и др. [47] — в S 233-IR, S 235 Central, S 235-AB, а в работе Зинченко и др. [46] — в источнике S 233-IR. Далее в статье Кирсановой и др. [13] была подробно исследована область S 235, в том числе получены карты распределения радиояркостности аммиака и определены физические параметры газа в направлении следующих скоплений: S 235 East 1, S 235 East 2, S 235 Central, S 235-AB.

Как видно из рис. 4, отношение между яркостями компонентов сверхтонкого расщепления в S 233-IR является аномальным, то есть оно отличается от соотношения в условиях ЛТР. В работе Штутцки и др. [64] показано, что такая аномалия возникает при попадании нескольких небольших сгустков газа в диаграмму направленности телескопа.

Вириальная устойчивость молекулярных сгустков подробно описывается в работе Кауффманн и др. [43]. Обычно предполагается, что, если вириальный параметр $\alpha_{\text{vir}} > \alpha_{\text{cr}}$, тогда сгусток или молекулярное облако является гравитационно стабильным. Если $\alpha_{\text{vir}} \lesssim \alpha_{\text{cr}}$, тогда возмущения давления и плотности сгустка могут привести к гравитационному сжатию вещества и запуску процессов звездообразования. Для изотермических сгустков с массой Джинса без учета магнитных полей $\alpha_{\text{cr}} \simeq 2$ [43, 65]. Как видно из таблицы 1, во всех рассматриваемых сгустках $\alpha_{\text{vir}} \lesssim 2$, что означает их гравитационную неустойчивость.

Некоторые молекулярные сгустки в линии CO имеют сложную протяженную структуру, не описываемую точно алгоритмом GaussClump, в котором предполагается гауссово распределение яркости. Как показал анализ, некоторые молекулярные сгустки разделяются на отдельные компоненты даже при использовании относительно большого порога (1.7) на минимальный размер источника. К числу таких сгустков в первую очередь относится G 173.17+2.55, который по своей структуре является волокном, поэтому он разбивается на отдельные сгустки NE и SW. Аналогично молекулярный сгусток S 235-Central разделяется на два отдельных компонента (S 235-Central E

и S 235-Central W), что согласуется со структурой излучения NH_3 из работы Кирсановой и др. [13]. Для исследования пространственно-кинематической структуры таких сгустков нужны наблюдения с лучшим разрешением, а также применение других методов выделения структур, таких, как GetFilaments [66], FIVE [67], DisPerSe [68] и др.

6.2. Звездообразование в молекулярных сгустках

Согласно данным моделирования из работы Кларка и др. [69], для того чтобы в молекулярных сгустках начались процессы звездообразования, средняя лучевая концентрация в них должна превышать 10^{21} см^{-2} . В нашей работе показано, что средняя лучевая концентрация газа в сгустках по данным излучения ^{13}CO находится в диапазоне от 1.4 до $4.3 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, поэтому все рассматриваемые сгустки являются кандидатами в области звездообразования.

Молодые звездные скопления в ГМО G 174+2.5 были исследованы в работе Камарго и др. [20] на основе фотометрии по данным 2MASS¹. Они сообщили о четырнадцати молодых звездных скоплениях, погруженных в молекулярный газ. Молодые звездные скопления в направлении на молекулярные сгустки WB 89673 и WB 89668 в их работе выделены не были. Все найденные скопления обозначены на рис. 1 пунктирными окружностями. Согласно исследованиям [20], возраст, положение и размеры молодых звездных скоплений вблизи S 235 (S 235 Central, East 1 и East 2) согласуются со сценарием звездообразования «сбора и сжатия». Цветовые характеристики звезд в направлении на молекулярные сгустки S 235-AB, S 232-IR, S 233-IR, G 173.57+2.43 соответствуют характеристикам погруженных молодых звездных скоплений. Предполагается, что возраст данных скоплений составляет 3–5 млн лет (см. таблицу 2 из [20]), и они еще не успели до конца «рассеять» окружающий их молекулярный газ.

Скопления в области S 235-AB были исследованы в работе Фелли и др. [70–72]. Они показали, что звездное скопление находится между туманностями S 235 A и S 235 B, первая из которых является зоной II. В работе Боли и др. [73] показано, что S 235 B является отражательной туманностью. Был обнаружен слой горячего молекулярного газа с южной стороны от S 235 A. Этот газ находится между зоной II и молекулярным облаком. В более поздней работе Фелли и др. [72] было показано, что в этом слое находятся молодые звезды. Авторы заключили, что взаимодействие S 235 A с

¹The Two-Micron All-Sky Survey, доступен по адресу www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/.

окружающим молекулярным облаком, возможно, привело к образованию второго поколения звезд в этой области.

Таким образом, молодые звездные скопления выделяются в направлении на все рассматриваемые молекулярные сгустки, кроме G 173.17+2.55, а именно: S 235 Central, S 235 East 1, S 235 East 2, S 235-AB, S 232-IR, S 233-IR, G 173.57+2.43, WB 89673 и WB 89668. Наличие молодых звездных скоплений указывает на активные процессы звездообразования в данных молекулярных сгустках.

6.3. Признаки истечений в молекулярных сгустках

В этом разделе мы обсуждаем наличие признаков истечений в исследованных массивных сгустках, основанных на характеристиках мазерного излучения молекул.

Мазерное излучение метанола — отличительная особенность областей звездообразования. В ранних исследованиях Батрла [74] и Ментена [75] эмпирически были выделены два класса метанольных мазеров. Мазеры II класса (к примеру, на 6.7, 12, 37.7, 107 ГГц) накапливаются ИК-излучением пыли, нагретой молодыми звездами (см. работы Соболева и др. [76, 77]), поэтому их обнаруживают в непосредственной близости к таким объектам. Мазеры I класса (к примеру, на 36, 44, 95 ГГц) возникают вследствие столкновительно-радиативной накачки (см. Соболев и др. [5]) и обычно указывают на присутствие газа, сжатого ударной волной. Такой газ часто обнаруживается около молодых звезд, в которых есть истечение, взаимодействующее с окружающим веществом (см. Воронков и др. [9]). Возникновение молекулярных истечений из областей звездообразования является неотъемлемой стадией этого процесса [78]. Обычно мазеры I класса обнаруживаются на некотором расстоянии от молодых звездных объектов, как показано в работах Куртца и др. [79], Воронкова и др. [9, 80]. Однако метанольные мазеры I класса могут возникать в любых местах межзвездной среды, где образуются ударные волны умеренных скоростей: при столкновениях облаков молекулярного газа (см. Салий и др. [8]), взрывах сверхновых (см. Пильстрем и др. [81]), в местах взаимодействия областей II с окружающим молекулярным газом (см. Воронков и др. [82]) и областях со сложными гидродинамическими движениями (см. Воронков и др. [83]).

В линии метанола на частоте 36.2 ГГц излучение в направлении на S 231–S 235 впервые было зарегистрировано в работе Хашика и др. [84], где был получен спектр источника S 235, соответствующий молекулярному сгустку S 235-AB в настоящей работе. Затем в работе Лишти и др. [36] были зарегистрированы мазерные и тепловые линии

метанола в двух источниках: S 233-IR и S 235-AB. В зарегистрированных нами линиях метанола на 36 ГГц в источниках WB 89673, S 233-IR и S 235-AB можно выделить две компоненты — широкую и узкую. Часто широкую компоненту (более 2.0 км с^{-1}) интерпретируют как «тепловую», а узкую компоненту (менее 1.5 км с^{-1}) — как «мазерную» [36]. Согласно выводам из работы Берулиса и др. [33], «мазерная» компонента может возникать как в окрестности протозвезды, так и в обычном гравитационно стабильном фрагменте межзвездной среды, возникающем вследствие турбулентности. Метанольные мазеры I класса также могут быть связаны с протозвездами на ранних стадиях сжатия (см. Соболев и др. [85], Саттон и др. [7]) и образовываться на границах гиперкомпактных областей II (см. Соболев и др. [5]). Таким образом, метанольный мазер не может быть исчерпывающим критерием наличия истечений из молодых звездных объектов на ранних стадиях звездообразования.

Необходимо отметить, что существует ограничение на формирование метанола в ударных волнах. Согласно работе Гэрей и др. [86], метанол не может выжить в ударных волнах, которые движутся со скоростями, превышающими 10 км с^{-1} , так как при больших скоростях эти молекулы разрушаются. В качестве дополнительного индикатора ударных фронтов, связанных с истечениями из молодых звездных объектов, можно использовать линии излучения молекулы SiO (см. работы Шильке и др. [87], а также Каселли др. [88]). При прохождении ударной волны обилие метанола в газовой фазе увеличивается за счет испарения с поверхности пылинок [8]. В отличие от метанола, молекула SiO после испарения не разрушается при больших скоростях ударных волн (от 10 до 40 км с^{-1} , см. [87]), поэтому излучение в линиях SiO является надежным индикатором истечений. Существование истечений из молодых звездных объектов в молекулярных сгустках WB 89673 и S 233-IR подтверждается наличием излучения SiO в работе Харью и др. [53]. Истечение в S 233-IR было ранее исследовано в литературе (см. [15, 89–91]), где показано, что оно возникает в области образования массивных звезд. В S 235-AB излучение SiO не было зарегистрировано [53], хотя в данном сгустке наблюдается излучение в мазерной линии метанола на 36 ГГц [36, 84].

Мазерное излучение воды в большинстве случаев обнаруживается в областях звездообразования (см. главу 6.1.1 из работы Грэй [10]). Наличие водяных мазеров в направлении на молекулярные сгустки в областях S 231–S 235 является дополнительным свидетельством идущих в них активных процессов звездообразования. Мазеры H₂O

были зарегистрированы в направлении на сгустки WB 89690, WB 89668, WB 89673, G 173.57+2.43, S 233-IR, S 235 Central и S 235-AB (см. таблицу 6).

Наличие истечения в области S 235-AB было доказано в серии работ Фелли и др. [70–72]. В работе Шэперд и Ватсона [19] показано, что в области G 173.58+2.43 как минимум два молодых звездных объекта из скопления ответственны за истечение вещества.

Таким образом, признаки молекулярных истечений обнаруживаются в следующих массивных сгустках: WB 89690, WB 89668, WB 89673, G 173.57+2.43, S 233-IR, S 235 Central, S 235-AB и S 235 East 2. Признаки истечения не обнаружены в направлении на S 235 East 1 и G 173.17+2.55.

7. ВЫВОДЫ

1. В гигантском молекулярном облаке G 174+2.5 на основании данных наблюдений молекулы CO выделены десять массивных звездообразующих сгустков. Все они принадлежат областям звездообразования S 231–S 235, названным по находящимся в них зонам H II.
2. Сгустки являются гравитационно неустойчивыми, и их массы по данным CO лежат в пределах приблизительно от 700 до 2000 M_{\odot} .
3. В результате наблюдений получены спектры линий метанола, цианоацетилена и аммиака:
 - В линии цианоацетилена на 36.4 ГГц излучение зарегистрировано в направлении на три молекулярных сгустка: WB 89668, WB 89673 и S 233-IR. Это указывает на высокую плотность молекулярного газа. Лучевая концентрация HC_3N оказалась достаточной для ее обнаружения на радиотелескопе РТ-22.
 - Линия метанола на 36.2 ГГц зарегистрирована в направлении WB 89673, S 233-IR и S 235-AB. Обнаружение излучения в данной линии указывает на существование ударных фронтов в сгустках.
 - В линии аммиака излучение зарегистрировано в направлении на шесть сгустков: WB 89668, WB 89673, S 233-IR, G 173.57+2.43, S 235 AB и S 235 Central. По линии аммиака определены физические параметры молекулярных сгустков: температура, лучевая концентрация аммиака и концентрация молекулярного газа. Установлено, что температура сгустков находится в диапазоне от 16 до 30 К, а концентрация молекулярного газа — от 2800 до 7200 cm^{-3} .

4. Во всех сгустках, кроме G 173.17+2.55, обнаруживаются погруженные молодые звездные скопления.

5. Признаки молекулярных истечений наблюдаются в направлении на все массивные сгустки, кроме S 235 East 1 и G 173.17+2.55.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование поддержано Программой 211 Правительства Российской Федерации, соглашение №02.А03.21.0006. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госзадание №3.1781.2014/К). Д. А. Ладейщиков благодарит Г. Т. Смирнова, В. А. Гусева и С. В. Логвиненко за руководство, поддержку и помощь при разработке системы автоматизации для двухканального радиометра РТ-22. М. С. Кирсанова благодарит Фонд Президента РФ (грант МК-2570.2014.2), а также программу ОФН-15 Отделения физических наук РАН. А. П. Цивилев благодарит за поддержку программу ОФН «Межзвездная и межгалактическая среда: активные и протяженные объекты».

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОЦЕНКА МАССЫ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ ПО РАДИОЛИНИЯМ CO

Представленная методика предназначена для определения физических параметров молекулярных облаков по данным в линиях CO. В целом методика соответствует работе Роман-Дувал и др. [38] с некоторыми изменениями, которые касаются определения лучевых концентраций и масс сгустков. Для определения лучевой концентрации было использовано предположение ЛТР. Также предполагалось, что линии ^{12}CO являются оптически толстыми. В этом случае температура возбуждения линии T_{ex} может быть определена из решения уравнения переноса излучения (формула (15.29) из [45]) для линии $^{12}\text{CO}(1-0)$:

$$T_{\text{ex}} = 5.53 / \ln \left(1 + \frac{5.53}{T_B^{12} + 0.837} \right), \quad (\text{A.1})$$

где T_B^{12} — яркостная температура линии $^{12}\text{CO}(1-0)$. В данном уравнении учитывается излучение микроволнового фона $T_{\text{bg}} = 2.7$ К. Так как средний размер источников в линиях ^{12}CO и ^{13}CO (от 1'9 до 4'1, см. таблицу 1) больше, чем размер диаграммы направленности (45''), $T_B = T_{\text{mb}}$.

Для определения оптической толщины и лучевой концентрации CO используется изотоп молекулы ^{13}CO , так как он менее обилен и его оптическая толщина меньше по сравнению с ^{12}CO . Последнее приводит к тому, что излучение меньше подвержено эффектам насыщения. Оптическая толщина линии $^{13}\text{CO}(1-0)$ определяется по формуле (15.31) из работы [45]:

$$\tau_0^{13} = -\ln \left[1 - \frac{T_B^{13}}{5.3} \left\{ \left[\exp\left(\frac{5.3}{T_{\text{ex}}}\right) - 1 \right]^{-1} - 0.16 \right\}^{-1} \right], \quad (\text{A.2})$$

где T_B^{13} — яркостная температура линии $^{13}\text{CO}(1-0)$, T_{ex} — температура ее возбуждения. Для линейной молекулы CO возбуждение характеризуется единой температурой T_{ex} , поэтому лучевая концентрация N и оптическая толщина τ связаны следующим соотношением (см. уравнение (3) из работы [38]):

$$N(^{13}\text{CO}) = 2.6 \times 10^{14} \frac{T_{\text{ex}}}{1 - \exp(-5.3/T_{\text{ex}})} \times \int \tau^{13}(v) dv, \quad (\text{A.3})$$

причем в случае гауссова профиля оптической толщины $\int \tau^{13}(v) dv = \tau_0^{13} \sigma_v \sqrt{2\pi}$, где σ_v — дисперсия скорости линии ^{13}CO , τ_0 — оптическая толщина в центре линии. Лучевая концентрация H_2 получается из обилий $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$, а также CO/H_2 :

$$N(\text{H}_2) = N(^{13}\text{CO}) \times \frac{^{12}\text{CO}}{^{13}\text{CO}} \left[\frac{\text{CO}}{\text{H}_2} \right]^{-1}. \quad (\text{A.4})$$

Отношение $\text{CO}/\text{H}_2 \simeq 8 \times 10^{-5}$, согласно [92]. Отношение $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ меняется от 40 до 70 в зависимости от расстояния от центра Галактики до источника, согласно [41]. На расстоянии 2 кпк от Солнца в направлении на галактический антицентр отношение обилий $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO} \simeq 70$.

Масса определяется в результате интегрирования карты распределения лучевой концентрации $N(\text{H}_2)$ по поверхности источника dA :

$$M = \mu m_{\text{H}_2} \int N_{\text{H}_2} dA = \mu m_{\text{H}_2} D^2 \int N_{\text{H}_2} d\Omega, \quad (\text{A.5})$$

где μ — отношение массы межзвездного газа к массе молекулы водорода, $\mu \approx 1.33$ [93], m_{H_2} — масса молекулы водорода, а элемент поверхности dA связан с телесным углом соотношением $dA = D^2 d\Omega$, где D — расстояние до источника в кпк.

При объединении выражений (A.4) и (A.5) и подстановке численных констант получаем следующее выражение для массы источника:

$$M = 0.41 D^2 \int_{\alpha, \delta} \frac{T_{\text{ex}} \tau^{13} \sigma_v \sqrt{2\pi}}{1 - \exp(-5.3/T_{\text{ex}})} \Delta\alpha \Delta\delta (M_{\odot}), \quad (\text{A.6})$$

где $T_{\text{ex}} = T_{\text{ex}}(\alpha, \delta)$ — температура возбуждения в данной ячейке карты, которая рассчитывается по формуле (A.1), $\tau^{13} = \tau^{13}(\alpha, \delta)$ — оптическая толщина ^{13}CO в центре профиля линии данной ячейки карты, которая рассчитана по формуле (A.2), $\sigma_v = \sigma_v(\alpha, \delta)$ — дисперсия скорости профиля линии ^{13}CO , $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ — размер ячейки карты по α и δ , выраженный в угловых минутах. Коэффициент перед интегралом, 0.41, отличается от величины 0.27, принятой в работе Роман-Дувал и др. [38] из-за использования иного отношения обилий $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ (70 вместо 45).

Вириальный параметр сгустков $\alpha_{\text{vir}} \equiv M_{\text{vir}}/M$ рассчитывается согласно определению в работе [43]:

$$\alpha_{\text{vir}} = \frac{5\sigma_v^2 R}{GM} = 1.2 \left(\frac{\sigma_v}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{R}{\text{pc}} \right) \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1}. \quad (\text{A.7})$$

Радиус сгустков определяется согласно работе [38] из площади, которую занимает сгусток на уровне половины интенсивности:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{\Omega D^2}{\pi}} = \sqrt{\frac{N_{\text{pix}} \Delta\alpha \Delta\delta D^2}{\pi}}, \quad (\text{A.8})$$

где N_{pix} — число ячеек карты, занимаемое сгустком на уровне половины интенсивности, $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ — размер ячейки карты. Дисперсия скорости σ_v в линии молекулы ^{13}CO , согласно [38], рассчитывается по формуле:

$$\sigma_v^2 = \frac{\sum T_{13}(v - \bar{v})^2}{\sum T_{13}}, \quad (\text{A.9})$$

причем суммирование в формуле (A.9) производится по (α, δ, v) только для таких значений T_{13} , которые превышают уровень интенсивности 4σ .

ПРИЛОЖЕНИЕ В. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА ПО РАДИОЛИНИЯМ АММИАКА

Спектр излучения молекулы аммиака подробно описан в работе [94]. Здесь мы приводим лишь конечные формулы, использованные при оценке

температуры газа, его плотности и содержания аммиака в нем. Известно, что населенности метастабильных уровней (1, 1) и (2, 2) определяются столкновениями, что позволяет использовать предположение об ЛТР и оценить кинетическую температуру газа T_{gas} . С помощью метода NH3(1, 1) из программы CLASS можно оценить значение оптической толщины главного компонента $\tau_{(1,1)m}$. Далее определяется температура возбуждения перехода (1, 1), которая предполагается одинаковой для всех остальных инверсионных переходов в условиях ЛТР:

$$T_{\text{ex}} = \frac{T_{B(1,1)}}{1 - \exp(-\tau_{(1,1)m})} + T_{\text{bg}} \quad (\text{К}). \quad (\text{В.1})$$

Яркостная температура главного компонента линии (1, 1) $T_{B(1,1)}$ дана в таблице 4. Величина T_{bg} — это температура фонового излучения, которая определяется температурой космологического микроволнового фона и фонового излучения источника T_s :

$$T_{\text{bg}} = 2.73 + T_s \quad (\text{К}). \quad (\text{В.2})$$

Лучевая концентрация аммиака на уровне (1, 1) определяется как [95]:

$$N_{(1,1)} = 6.60 \times 10^{14} \frac{T_{\text{ex}}}{\nu_{(1,1)}} \tau_{(1,1)m} \times \Delta V_{(1,1)} \quad (\text{см}^{-2}), \quad (\text{В.3})$$

где $\Delta V_{(1,1)}$ — ширина линии (1, 1) в км с^{-1} , ее значение приведено в таблице 4, $\nu_{(1,1)} = 23.7$ — частота перехода (1, 1) в ГГц.

Полная лучевая концентрация аммиака в условиях ЛТР при учете четырех нижних уровней: основного, а также (1, 1), (2, 2) и (3, 3), равна:

$$N_{\text{NH}_3} = N_{(1,1)} \left(\frac{1}{3} e^{\frac{21.3}{T_{\text{rot}}}} + 1 + \frac{5}{3} e^{\frac{-41.2}{T_{\text{rot}}}} + \frac{14}{3} e^{\frac{-99.4}{T_{\text{rot}}}} \right) \quad (\text{см}^{-2}), \quad (\text{В.4})$$

где T_{rot} — вращательная температура, определяющая отношение населенностей между уровнями (2, 2) и (1, 1).

В условиях ЛТР [94]:

$$T_{\text{rot}} = -41.5 \ln \left(\frac{-0.282}{\tau_{(1,1)m}} \ln \left(1 - \frac{T_{B(2,2)m}}{T_{B(1,1)m}} \right) \times (1 - e^{-\tau_{(1,1)m}}) \right)^{-1} \quad (\text{К}). \quad (\text{В.5})$$

Для определения T_{gas} используется соотношение, полученное в работе [2] с коэффициентами из работы [96]:

$$T_{\text{rot}} = \frac{T_{\text{gas}}}{1 + \frac{T_{\text{gas}}}{41.5} \ln \left(1 + \frac{C_{(2,2 \rightarrow 2,1)}}{C_{(2,2 \rightarrow 1,1)}} \right)} \quad (\text{К}). \quad (\text{В.6})$$

Коэффициенты $C_{(2,2 \rightarrow 2,1)}$ и $C_{(2,2 \rightarrow 1,1)}$ даны в виде таблиц в работе [96] для нескольких значений T_{gas} . Уравнение (В.6) решается методом итераций.

Зная T_{ex} , можно оценить концентрацию молекулярного газа $n(\text{H}_2)$, рассматривая только два уровня инверсионного перехода (1, 1), с помощью следующего соотношения [94]:

$$n(\text{H}_2) = \frac{A_{(1,1)}}{C_{(1,1)}} \left(\frac{J_\nu(T_{\text{ex}}) - J_\nu(T_{\text{bg}})}{J_\nu(T_{\text{gas}}) - J_\nu(T_{\text{ex}})} \right) \times \left(1 + \frac{J_\nu(T_{\text{gas}})}{h\nu_{(1,1)}/k} \right) \quad (\text{см}^{-3}), \quad (\text{В.7})$$

где

$$J_\nu(T) = \frac{h\nu_{(1,1)}}{k} \left(\exp \frac{h\nu_{(1,1)}}{kT} - 1 \right). \quad (\text{В.8})$$

Коэффициент $A_{(1,1)} = 1.7 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ [45], а $C_{(1,1)}$ берется из таблицы в работе [96] для определенного значения T_{gas} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Combes, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **29**, 195 (1991).
2. C. M. Walmsley and H. Ungerechts, *Astron. and Astrophys.* **122**, 164 (1983).
3. J. Jijina, P. C. Myers, and F. C. Adams, *Astrophys. J. Suppl.* **125**, 161 (1999).
4. M. Morris, B. E. Turner, P. Palmer, and B. Zuckerman, *Astrophys. J.* **205**, 82 (1976).
5. A. M. Sobolev, D. M. Cragg, S. P. Ellingsen, et al., *IAU Symp.* **242**, 81 (2007).
6. S. V. Salii and A. M. Sobolev, *Astronomy Reports* **50**, 965 (2006).
7. E. C. Sutton, A. M. Sobolev, S. V. Salii, et al., *Astrophys. J.* **609**, 231 (2004).
8. S. V. Salii, A. M. Sobolev, and N. D. Kalinina, *Astronomy Reports* **46**, 955 (2002).
9. M. A. Voronkov, K. J. Brooks, A. M. Sobolev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **373**, 411 (2006).
10. M. Gray, *Maser Sources in Astrophysics* (Cambridge Univ. Press, New York, 2012).
11. S. Sharpless, *Astrophys. J. Suppl.* **4**, 257 (1959).
12. M. S. Kirsanova, A. M. Sobolev, M. Thomasson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **388**, 729 (2008).
13. M. S. Kirsanova, D. S. Wiebe, A. M. Sobolev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **437**, 1593 (2014).

14. L. Chavarria, L. Allen, C. Brunt, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 3719 (2014).
15. A. G. Ginsburg, J. Bally, C.-H. Yan, and J. P. Williams, *Astrophys. J.* **707**, 310 (2009).
16. S. Leurini, H. Beuther, P. Schilke, et al., *Astron. and Astrophys.* **475**, 925 (2007).
17. H. Beuther, S. Leurini, P. Schilke, et al., *Astron. and Astrophys.* **466**, 1065 (2007).
18. A. Chakraborty, D. K. Ojha, B. G. Anandarao, and T. N. Rengarajan, *Astron. and Astrophys.* **364**, 683 (2000).
19. D. S. Shepherd and A. M. Watson, *Astrophys. J.* **566**, 966 (2002).
20. D. Camargo, C. Bonatto, and E. Bica, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **416**, 1522 (2011).
21. J. G. A. Wouterloot and J. Brand, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **80**, 149 (1989).
22. M. H. Heyer, J. M. Carpenter, and E. F. Ladd, *Astrophys. J.* **463**, 630 (1996).
23. R. A. Burns, H. Imai, T. Handa, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453**, 3163 (2015).
24. B. Reipurth and C.-H. Yan, *Star Formation and Molecular Clouds towards the Galactic Anti-Center* (Astron. Soc. Pacific, San Francisco, 2008).
25. T. M. Dame, D. Hartmann, and P. Thaddeus, *Astrophys. J.* **547**, 792 (2001).
26. A. Ginsburg, J. Glenn, E. Rosolowsky, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 14 (2013).
27. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
28. A. Lawrence, S. J. Warren, O. Almaini, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **379**, 1599 (2007).
29. J. C. Mottram, C. M. Brunt, and M. H. Heyer, *Astron. and Astrophys.* (in press).
30. R. J. Sault, P. J. Teuben, and M. C. H. Wright, *ASP Conf. Ser.* **77**, 433 (1995).
31. W. A. Joye and E. Mandel, *ASP Conf. Ser.* **295**, 489 (2003).
32. A. M. Tolmachev and R. L. Sorochenko, *Sov. Astron. Lett.* **7**, 379 (1981).
33. I. I. Berulis, S. V. Kalenski, A. M. Sobolev, and V. S. Streinitski, *Astron. Astrophys. Transactions* **1**, 231 (1992).
34. T. L. Wilson and R. Mauersberger, *Astron. and Astrophys.* **239**, 305 (1990).
35. I. I. Berulis, V. A. Gusev, A. V. Kutsenko, et al., *Tr. Akad. Nauk SSSR Phys. Inst.* **135**, 35 (1983).
36. S. Liechti and T. L. Wilson, *Astron. and Astrophys.* **314**, 615 (1996).
37. S. Maret, P. Hily-Blant, J. Pety, et al., *Astron. and Astrophys.* **526**, A47 (2011).
38. J. Roman-Duval, J. M. Jackson, M. Heyer, et al., *Astrophys. J.* **723**, 492 (2010).
39. R. Simon, J. M. Jackson, D. P. Clemens, et al., *Astrophys. J.* **551**, 747 (2001).
40. M. J. Reid, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 345 (1993).
41. W. D. Langer and A. A. Penzias, *Astrophys. J.* **357**, 477 (1990).
42. J. Stutzki and R. Guesten, *Astrophys. J.* **356**, 513 (1990).
43. J. Kauffmann, T. Pillai, and P. F. Goldsmith, *Astrophys. J.* **779**, 185 (2013).
44. P. Padoan, M. Juvela, J. Bally, and Å. Nordlund, *Astrophys. J.* **529**, 259 (2000).
45. K. Rohlfs and T. L. Wilson, *Tools of Radio Astronomy*, 4th ed. (Springer, New York, 2004).
46. I. Zinchenko, T. Henning, and K. Schreyer, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 385 (1997).
47. K. Schreyer, T. Henning, C. Koempe, and P. Harjunpää, *Astron. and Astrophys.* **306**, 267 (1996).
48. N. J. Evans, II, and G. N. Blair, *Astrophys. J.* **246**, 394 (1981).
49. B. G. Elmegreen and C. J. Lada, *Astrophys. J.* **214**, 725 (1977).
50. A. P. Whitworth, A. S. Bhattal, S. J. Chapman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **268**, 291 (1994).
51. D. A. Ladeyschkov, A. M. Sobolev, M. Thomasson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452**, 2306 (2015).
52. J. G. A. Wouterloot, J. Brand, and K. Fiegle, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **98**, 589 (1993).
53. J. Harju, K. Lehtinen, R. S. Booth, and I. Zinchenko, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **132**, 211 (1998).
54. J. G. A. Wouterloot, C. M. Walmsley, and C. Henkel, *Astron. and Astrophys.* **203**, 367 (1988).
55. L. E. Pirogov, L. E. B. Johansson, and I. I. Zinchenko, *Astron. Astrophys. Transactions* **22**, 33 (2003).
56. G. H. MacDonald, L. T. Little, A. T. Brown, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **195**, 387 (1981).
57. A. J. Walsh, S. Thorwirth, H. Beuther, and M. G. Burton, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **404**, 1396 (2010).
58. D. S. Meier and J. L. Turner, *Astrophys. J.* **618**, 259 (2005).
59. J. E. Lindberg, S. Aalto, F. Costagliola, et al., *Astron. and Astrophys.* **527**, A150 (2011).
60. P. A. Vanden Bout, R. B. Loren, R. L. Snell, and A. Wootten, *Astrophys. J.* **271**, 161 (1983).
61. A. V. Alakoz, S. V. Kalenskii, V. G. Promislov, et al., *Astronomy Reports* **46**, 551 (2002).
62. P. T. P. Ho, R. N. Martin, and A. H. Barrett, *Astrophys. J.* **246**, 761 (1981).
63. J. Harju, M. Walmsley, and J. G. A. Wouterloot, *IAU Symp.* **147**, 436 (1991).
64. J. Stutzki and G. Winnewisser, *Astron. and Astrophys.* **144**, 13 (1985).
65. C. F. McKee and E. G. Zweibel, *Astrophys. J.* **399**, 551 (1992).
66. A. Men'shchikov, *Astron. and Astrophys.* **560**, A63 (2013).
67. A. Hacar, M. Tafalla, J. Kauffmann, and A. Kovács, *Astron. and Astrophys.* **554**, A55 (2013).
68. T. Sousbie, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **414**, 350 (2011).
69. P. C. Clark and S. C. O. Glover, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444**, 2396 (2014).
70. M. Felli, L. Testi, R. Valdettaro, and J.-J. Wang, *Astron. and Astrophys.* **320**, 594 (1997).
71. M. Felli, F. Massi, A. Navarrini, et al., *Astron. and Astrophys.* **420**, 553 (2004).

72. M. Felli, F. Massi, M. Robberto, and R. Cesaroni, *Astron. and Astrophys.* **453**, 911 (2006).
73. P. A. Boley, A. M. Sobolev, V. V. Krushinsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **399**, 778 (2009).
74. W. Batrla, H. E. Matthews, K. M. Menten, and C. M. Walmsley, *Nature* **326**, 49 (1987).
75. K. M. Menten, *Astrophys. J.* **380**, L75 (1991).
76. A. M. Sobolev, A. B. Ostrovskii, M. S. Kirsanova, et al., *IAU Symp.* **227**, 174 (2005).
77. D. M. Cragg, A. M. Sobolev, and P. D. Godfrey, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **360**, 533 (2005).
78. R. Bachiller, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **34**, 111 (1996).
79. S. Kurtz, P. Hofner, and C. V. Álvarez, *Astrophys. J. Suppl.* **155**, 149 (2004).
80. M. A. Voronkov, J. L. Caswell, S. P. Ellingsen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439**, 2584 (2014).
81. Y. M. Pihlström, L. O. Sjouwerman, D. A. Frail, et al., *Astron. J.* **147**, 73 (2014).
82. M. A. Voronkov, J. L. Caswell, S. P. Ellingsen, and A. M. Sobolev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 2471 (2010).
83. M. A. Voronkov, J. L. Caswell, T. R. Britton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **408**, 133 (2010).
84. A. D. Haschick and W. A. Baan, *Astrophys. J.* **339**, 949 (1989).
85. A. M. Sobolev and V. S. Strel'nitskij, **9**, 26 (1983).
86. G. Garay, D. Mardones, L. F. Rodríguez, et al., *Astrophys. J.* **567**, 980 (2002).
87. P. Schilke, C. M. Walmsley, G. Pineau des Forets, and D. R. Flower, *Astron. and Astrophys.* **321**, 293 (1997).
88. P. Caselli, T. W. Hartquist, and O. Havnes, *Astron. and Astrophys.* **322**, 296 (1997).
89. A. Porras, I. Cruz-González, and L. Salas, *Astron. and Astrophys.* **361**, 660 (2000).
90. H. Beuther, P. Schilke, F. Gueth, et al., *Astron. and Astrophys.* **387**, 931 (2002).
91. T. Khanzadyan, M. D. Smith, C. J. Davis, and T. Stanke, *Astron. and Astrophys.* **418**, 163 (2004).
92. G. A. Blake, E. C. Sutton, C. R. Masson, and T. G. Phillips, *Astrophys. J.* **315**, 621 (1987).
93. R. H. Hildebrand, *Quart. J. Royal Astron. Soc.* **24**, 267 (1983).
94. P. T. P. Ho and C. H. Townes, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **21**, 239 (1983).
95. J. G. Mangum, A. Wootten, and L. G. Mundy, *Astrophys. J.* **388**, 467 (1992).
96. G. Danby, D. R. Flower, P. Valiron, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **235**, 229 (1988).

Molecular Emission in Dense Massive Clumps from the Star-Forming Regions S 231–S 235

D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. P. Tsvilev, and A. M. Sobolev

The paper is concerned with the study of the star-forming regions S 231–S 235 in radio lines of molecules of the interstellar medium — carbon monoxide (CO), ammonia (NH₃), cyanoacetylene (HC₃N), in maser lines — methanol (CH₃OH) and water vapor (H₂O). The regions S 231–S 235 belong to the giant molecular cloud G 174+2.5. The goal of this paper is to search for new sources of emission toward molecular clumps and to estimate their physical parameters from CO and NH₃ molecular lines. We obtained new detections of NH₃ and HC₃N lines in the sources WB 89673 and WB 89668 which indicates the presence of high-density gas. From the CO line, we derived sizes, column densities, and masses of molecular clumps. From the NH₃ line, we derived gas kinetic temperatures and number densities in molecular clumps. We determined that kinetic temperatures and number densities of molecular gas are within the limits 16–30 K and $2.8\text{--}7.2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ respectively. The shock-tracing line of CH₃OH molecule at a frequency of 36.2 GHz was detected in WB 89673 for the first time.

Keywords: *ISM: clouds—ISM: molecules—ISM: jets and outflows*