

УДК 524.5

## ОБЗОР ЛИНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛЕКУЛ В МЕЖЗВЕЗДНОМ ВОЛОКНЕ WB 673

© 2020 г. О. Л. Рябухина<sup>1, \*</sup>, М. С. Кирсанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: ryabukhina@inasan.ru

Поступила в редакцию 31.10.2019 г.

После доработки 15.12.2019 г.

Принята к публикации 20.12.2019 г.

В работе представлены результаты наблюдений линий излучения молекул в направлении на плотные сгустки межзвездного волокна WB 673, полученные на 20-м телескопе в обсерватории Онсала. Определены параметры линий излучения, построены карты интенсивностей, лучевых концентраций и обилий молекул CO, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, CS, HCN, HNC по отношению к водороду в плотных сгустках волокна: WB 673, WB 668, S233–IR, G173.57+2.43. Показано, что обилия молекул уменьшаются в направлении максимумов лучевых концентраций молекулярного водорода.

DOI: 10.31857/S0004629920050035

### 1. ВВЕДЕНИЕ

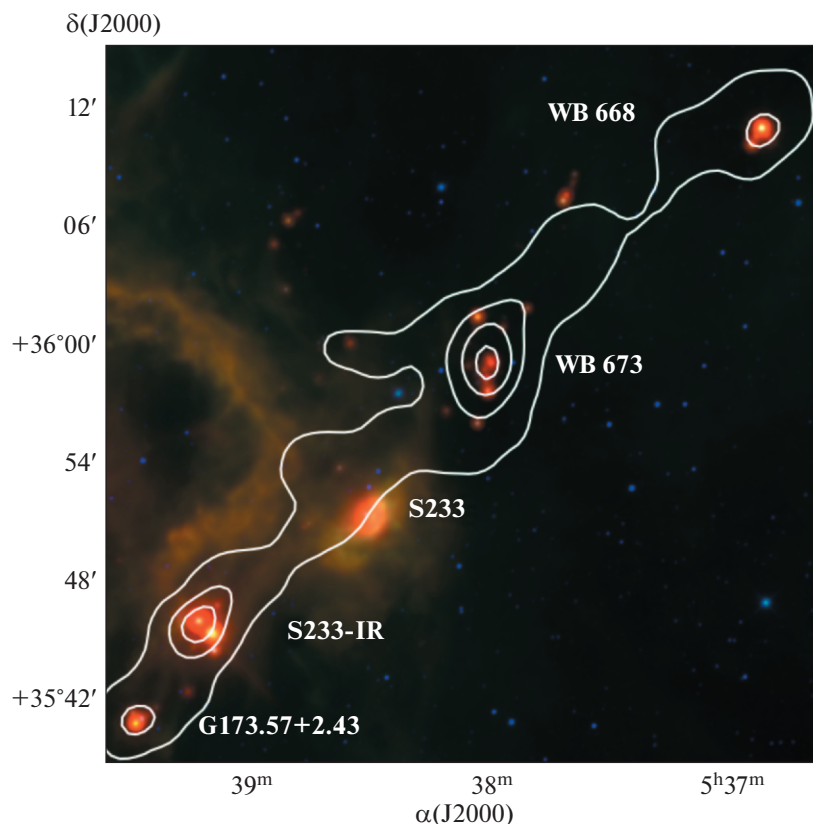
Исследование областей звездообразования на протяжении нескольких последних десятилетий остается актуальной темой астрофизики. Наблюдения ближайших к Солнцу молекулярных облаков, например, облаков в Тельце и Змееносце, позволили установить последовательность стадий образования звезд солнечной массы: от дозвездного молекулярного сгустка до протозвезды [1]. Создать подобную последовательность для массивных звезд оказалось намного труднее из-за мощного ультрафиолетового излучения звезды, давление которого препятствует аккреции вещества [2]. Однако давно ясно, что отправной точкой процесса звездообразования является формирование сгустков плотного газа в молекулярных облаках.

Неоднородная структура молекулярных облаков известна наблюдателям довольно давно (см., напр., [3, 4]). После наблюдений областей звездообразования на телескопе им. Гершеля в далеком ИК-диапазоне стало ясно, что молекулярные облака имеют волокнистую структуру [5]. Образование волокон может быть необходимой стадией эволюции молекулярных облаков на пути к образованию звезд, и именно образование волокон обуславливает вид начальной функции масс звезд [6]. Теоретические расчеты (напр., [7]), показывают, что формирование молекулярных волокон возможно после множественных сжатий газа ударными волнами, источником которых явля-

ются расширяющиеся области ионизованного водорода H II и остатки сверхновых звезд.

Для исследования взаимосвязи между местонахождением областей H II и свойствами волокон необходимы массивы данных об излучении молекулярных линий на масштабах нескольких парсек. В силу своей симметричности молекула водорода не имеет вращательных переходов в радиодиапазоне, и поэтому изучать темные и холодные облака, в которых процесс звездообразования находится на ранней стадии, приходится с помощью линий, соответствующих вращательным переходам других молекул, чаще всего молекул CO и ее изотопомеров, поскольку углерод и кислород наиболее обильны в межзвездной среде после водорода и гелия. Ближайшие к Солнцу комплексы звездообразования, содержащие как области H II, так и молекулярные облака, расположены в Местном спиральном рукаве и в рукаве Персея. Объекты из рукава Персея обладают также тем преимуществом, что находятся во внешней, по отношению к Солнцу, части Галактики, поэтому на луч зрения попадает гораздо меньше объектов, чем при наблюдениях внутренних частей Галактики. Благодаря своей относительной близости, области звездообразования из рукава Персея могут быть изучены с помощью одиночных радиотелескопов на масштабах долей парсек, являясь прекрасными объектами для обзоров в линиях CO (см., напр., [8–11]).

Одним из перспективных для изучения комплексов звездообразования из рукава Персея, в



**Рис. 1.** Молекулярное волокно WB 673. Трехцветное изображение составлено из ИК-данных телескопа WISE [20] на 22 мкм (красный), 12 мкм (зеленый), 3.4 мкм (синий). Интегральная интенсивность в линии излучения CS(2–1) показана белыми контурами для уровней 1, 5, 9, 13 и 17 К км/с, карта взята из работы [19]. В восточной стороне ИК-изображения видна арка, это область фотодиссоциации около области Н II S231.

котором наблюдается несколько стадий этого процесса, является область S231–S235, расположенная в гигантском молекулярном облаке (ГМО) G174+2.5. Этому комплексу принадлежат три протяженных области ионизованного водорода: Sh2–231 (далее S231), Sh2–232 и Sh2–235 (см. каталог [12]). Кроме того, имеются три компактных области Н II: S235A и S235C [13–16], а также Sh2–233 [17] (далее S233). В работе [18] на основе данных об излучении в молекулярных линиях CO были определены размеры, лучевые концентрации и массы плотных сгустков в G174+2.5. В этой работе было показано, что сгустки группируются: 1) вблизи области Н II Sh2–235, 2) вдоль линии “юго-восток” – “северо-запад”, частично примыкая к границе S231. В работе [19] было показано, что вторая группа плотных сгустков образует молекулярное волокно, которое с западной стороны граничит с протяженной оболочкой, происхождение которой не было установлено. ИК-изображение волокна WB 673 и карта линий излучения CS(2–1) из работы [19] показаны на рис. 1.

Наиболее проэволюционировавшая область образования массивных звезд из волокна WB 673 уже наблюдается как область Н II S233, которая видна в радиоконтинууме (см., напр., [21], обзор New GPS 20 cm<sup>1</sup>). Кроме того, в волокне есть два сгустка с IRAS-источниками, соотношение между ИК-потоками в которых соответствует областям Н II: это IRAS 05345+3556 в сгустке WB 673 [22] и IRAS 05358+3543 в сгустке S233–IR [22]. Последний сгусток является одним из наиболее изученных молекулярных истечений (см., напр., [23–30]) в области образования массивных звезд. В сгустках G173.57+2.43 и WB 668, расположенных по краям волокна, обнаружены мазеры воды на частоте 22 ГГц, что является признаком активного звездообразования и наличия истечений в объектах, но областей Н II в них нет. Полный список ИК-источников в плотных сгустках волокна WB 673 приведен в табл. 1. Таким образом, напрашивается вывод о том, что наиболее проэволюционировавшие области звездообразования находятся в центральной части волокна, а

<sup>1</sup> <https://www.cv.nrao.edu/nvss/>

**Таблица 1.** ИК-источники IRAS и MSX в направлении на плотные сгустки из волокна

Сгусток	IRAS	MSX
G173.57+2.43	05361+3539	G173.5826+02.4452
S233–IR	05358+3543	G173.4956+02.4218
		G173.4902+02.4577
		G173.4815+02.4459
		G173.4839+02.4317
S233	05351+3549	G173.3173+02.3674
WB673	05345+3556	G173.1371+02.38558
	05346+3559	G173.1862+02.343
	05347+3556	
WB668	05335+3609	G172.8742+02.2687

наименее – на его концах. Однако сгустки в волокне исследованы лишь в общих чертах, что не дает нам возможности сделать подобный вывод. Одной из возможностей для исследования пространственного распределения стадий процесса звездообразования в волокне является использование обилий различных молекул и т.н. метод “химических часов”. Этот метод требует построения карт обилий (содержаний относительно водорода) молекул-трассеров “ранней”, например, CS, и “поздней”, например,  $N_2H^+$ , химии в сгустках, поскольку отношение этих двух молекул очень чувствительно к температуре и плотности (см., напр., [31]).

Цель этой работы – провести обзор линий излучения молекул в волокне WB 673 и построить карты обилий молекул в его центральном и периферийных сгустках для того, чтобы в последующих работах сравнить пространственное распределение молекул “ранней” и “поздней” химии. Работа структурирована следующим образом. Мы описываем проведенные наблюдения и архивные данные в разделе 2, методы анализа наблюдательных данных – в разделе 3, полученные результаты – в разделе 4.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

### 2.1. Наблюдения линий молекул

Обзор линий излучения молекул в волокне WB 673, составляющий основу этой работы, был проведен в декабре 2016 и в феврале 2017 г. на 20-м телескопе обсерватории Онсала (Швеция). Для наблюдений использовался приемник на длине волны 3 мм (85–116 GHz) [32] (см. также данные в интернете<sup>2</sup>), принимающий излучение в двух

<sup>2</sup> <https://www.chalmers.se/en/centres/GoCAS/Events/ALMA-Bands2and3-Workshop-2016/Documents/Pantaleev-2mm-4mmReceiversfortheOSO20-mantenna.pdf>

ортогональных поляризациях. Основные параметры наблюдений описаны в работе [19]. Наблюдения велись одновременно в двух полосах приема, шириной по 2.5 ГГц каждая, середины спектральных интервалов которых разнесены на 12 ГГц. Шумовая температура системы находилась в интервале 160–340 К для наблюдений в более высокочастотной полосе (USB) и 80–250 К в более низкочастотной (LSB). Проверка точности наведения телескопа и фокусировки проводилась по лазерным линиям SiO в источниках R Cas, U Ori,  $\chi$  Sgr и TX Cam после восхода и заката. Точность фокусировки была в пределах 0.3–0.8 мм, точность наведения – в пределах 3” по азимуту и высоте. Наблюдения проводились в режиме сдвига частоты (frequency-switch mode) с разницей частот 5 МГц.

Переход от антенной температуры к яркостной  $T_{mb}$  производился путем деления спектров на коэффициент эффективности антенны  $v_{MB}$ , который зависит от высоты источника над горизонтом и указывается в fits-файлах со спектрами, например,  $v_{MB} = 0.36$  для высоты 47° (см. также рис. 2.1 в техническом описании телескопа<sup>3</sup>). Спектральное разрешение составляло 76 кГц на канал, что соответствует 0.2 км/с. Выбранное разрешение позволяет разрешить профили линий, поскольку типичная ширина полученных линий составляет 2–3 км/с (см. ниже). Для построения карт использовался метод растрового картирования, при котором смещение составляло половину диаграммы направленности телескопа.

Полученные спектры обрабатывались в программе CLASS<sup>4</sup> из пакета GILDAS [33], а для дальнейших преобразований полученных fits-кубов использовались пакеты MIRIAD [34] и Astro ru [35].

### 2.2. Архивные данные об излучении пыли

Данные об излучении пыли в непрерывном спектре на длине волны  $\lambda = 1.1$  мм взяты из обзора галактической плоскости Volocam [36, 37]. Этот обзор охватывает практически всю галактическую плоскость с эффективным пространственным разрешением  $\approx 33''$ . Как показал анализ этих данных в работе [37], источники Volocam представляют собой относительно плотные ( $\sim 10^{3.5}$  см<sup>-3</sup>) структуры в молекулярных облаках с угловыми размерами  $\approx 0.5' - 2'$ . Мы использовали версию 2.1 этого обзора.

<sup>3</sup> [https://www.chalmers.se/en/researchinfrastructure/oso/radio-astronomy/20m/Documents/OSOman\\_31aug2016.pdf](https://www.chalmers.se/en/researchinfrastructure/oso/radio-astronomy/20m/Documents/OSOman_31aug2016.pdf)

<sup>4</sup> <http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>

### 3. АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

В этом разделе мы описываем формулы, которые использовались для определения лучевых концентраций молекул. Основное допущение, сделанное нами в этой работе – это предположение о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР), которое вполне соответствует G174+2.5, согласно работе [11]. Параметры линий определялись путем приближения их гауссовой функцией.

#### 3.1. Линии со сверхтонким расщеплением

Линии HCN(1–0), HNC(1–0) и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0) обладают сверхтонким расщеплением, параметры которого для условий ЛТР известны. Поэтому мы использовали метод HFS из пакета CLASS для одновременного приближения сверхтонких компонентов в спектрах этих линий. Параметры сверхтонкого расщепления для линий N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0) [38] показаны в табл. 2, для линии HCN(1–0) – в табл. 3 по данным [39], для HNC(1–0) – в табл. 4, согласно [40]. Вследствие доплеровского уширения линий невозможно разделить все компоненты спектров HNC(1–0) и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0) в сгустках волокна WB 673. Для определения лучевой концентрации этих молекул проведено интегрирование интенсивности излучения по всем переходам ( $\int T_{mb} dv$ ).

#### 3.2. Линии без сверхтонкого расщепления

Оптические толщины линий CS(2–1), SO(3.2–2.1) и <sup>13</sup>CO(1–0) были найдены из отношения интенсивностей линий с основными изотопами серы <sup>34</sup>S, углерода <sup>12</sup>C, для которого массовое число в написании обычно опускается, и кислорода <sup>18</sup>O (соответствующие линии изотопомеров C<sup>34</sup>S(2–1), <sup>34</sup>SO(3.2–2.1) и C<sup>18</sup>O(1–0) принимаются оптически тонкими). Уравнение решается методом итераций. Отношение обилий изотопов  $r = {}^{32}\text{S}/{}^{34}\text{S} \approx 23$  [41]. Для пары линий CS(2–1) и C<sup>34</sup>S(2–1):

$$\frac{T(\text{CS})}{T(\text{C}^{34}\text{S})} = \frac{1 - \exp(-\tau)}{1 - \exp(-\tau/r)}. \quad (1)$$

Для расчета лучевой концентрации CO по картам излучения <sup>13</sup>CO(1–0) и C<sup>18</sup>O(1–0) были использованы отношения обилий изотопов <sup>16</sup>O/<sup>18</sup>O = 557 ± 30 [42] и <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C = 80 [43].

#### 3.3. Лучевая концентрация молекул

Для определения лучевой концентрации мы использовали приближение ЛТР, температура возбуждения излучения молекул одинакова и равна 10 К. Чтобы оценить температуру возбуждения линий, мы рассматривали отношения ин-

**Таблица 2.** Параметры линий сверхтонкого расщепления N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0)

Переход	Частота, МГц	Смещение, км/с	Отн. сила
101–012	93176.2650	–8.0064	3/27
121–011	93173.9666	–0.6109	3/27
123–012	93173.7767	0.0000	7/27
122–011	93173.4796	0.9560	5/27
111–010	93172.0533	5.5452	3/27
112–012	93171.9168	5.9841	5/27
110–011	93171.6210	6.9360	1/27

**Таблица 3.** Параметры линий сверхтонкого расщепления HCN(1–0)

Переход	Частота, МГц	Смещение, км/с	Отн. сила
11–01	88630.4157	4.85	3/9
12–01	88631.8473	0.00	5/9
10–01	88633.9360	–7.07	1/9

**Таблица 4.** Параметры линий сверхтонкого расщепления HNC(1–0)

Переход	Частота, МГц	Смещение, км/с	Отн. сила
11–01	90663.459	0.37	3/9
12–01	90663.574	0.00	5/9
10–01	90663.656	–0.27	1/9

тенсивностей линий <sup>13</sup>CO(1–0) и C<sup>18</sup>O(1–0) в каналах скоростей во всех пикселях карт этих молекул. Для тех каналов скоростей, где отношение сигнал/шум превышает 3, мы определяли оптическую толщину с помощью аналога уравнения (1) и температуру возбуждения в канале, согласно уравнению переноса из работы [44]. Затем, усредняя по всем каналам, определили среднюю температуру возбуждения в пикселе. Анализ пространственного распределения температуры возбуждения пары линий <sup>13</sup>CO(1–0) и C<sup>18</sup>O(1–0) показал, что допущение  $T_{ex} = 10$  К является приемлемым для большинства пикселей на картах. Анализ пары линий CS(2–1) и C<sup>34</sup>S(2–1) дал тот же самый результат. При увеличении  $T_{ex}$  до 15 К значения лучевой концентрации молекул, вычисленное в оптически тонком приближении, увеличится на 22%, а значение лучевой концентрации H<sub>2</sub>, вычисленное по пыли, упадет на 52% от значения, полученного при температуре пыли  $T_d = 10$  К. При повышении  $T_{ex}$  до 20 К концентрация увеличится на 43% и уменьшится на 65% соответственно. Для определения лучевой концентрации в оптически тонком случае мы использовали рас-

**Таблица 5.** Константы для расчета лучевых концентраций молекул

Молекула	$J_u$	$\mu$ , Дебаи	$B$ , ГГц
$^{13}\text{CO}$	1	0.110	55.10
$\text{N}_2\text{H}^+$	1	3.400	46.586
$\text{HCN}$	1	2.984	44.315
$\text{HNC}$	1	3.050	45.331
$\text{CS}$	2	1.957	24.495
$\text{HCCCN}$	12	3.724	4.549
$\text{SO}$	3	1.55	21.523

четы из работы [44, формула (80)] и оперировали интегральными интенсивностями линий.

$$N^{\text{thin}} = \left( \frac{3h}{8\pi^3 S \mu^2} \right) \left( \frac{Q_{\text{rot}}}{g_j g_k g_l} \right) \frac{\exp\left(\frac{E_u}{kT_{\text{ex}}}\right)}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) - 1} \times \frac{1}{J_{\nu}(T_{\text{ex}}) - J_{\nu}(T_{\text{bg}})} \int \frac{T_{\text{mb}} dv}{f} \text{ см}^{-2}, \quad (2)$$

где

$$J_{\nu}(T) = \frac{h\nu/k}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \text{ К}, \quad (3)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $S = J_u/2J_u + 1$  – сила линии,  $\mu$  – дипольный матричный момент,  $Q_{\text{rot}}$  – вращательная частичная функция,  $g_j = 2J + 1$  – квантовое число вырожденных вращательных уровней,  $g_k$  – К-вырожденность,  $g_l$  – вырожденность ядерного спина,  $f$  – коэффициент заполнения диаграммы направленности телескопа. Мы используем значение  $f = 1$ , хотя нужно отметить, что для наших источников эта величина не определялась. Из рис. 2 видно, что для центральных частей источников выбор  $f = 1$  представляется обоснованным, однако для периферийных частей это значение может быть завышено. Следовательно, мы можем недооценивать лучевую концентрацию молекул на периферии наблюдавшихся источников;  $J_{\nu}(T)$  – эквивалентная температура Рэлея-Джинса. Для линейных молекул  $g_k = g_l = 1$ ,  $Q_{\text{rot}} \approx \frac{kT}{hB} + \frac{1}{3}$ , где  $B$  – вращательная постоянная. Дипольные матричные моменты и вращательные постоянные для молекул взяты из каталога NASA<sup>5</sup> и приведены в табл. 5.

Для учета оптической толщины линий CS(2–1),  $^{13}\text{CO}(1–0)$ , HNC(1–0), HCN(1–0),  $\text{N}_2\text{H}^+(1–0)$ ,

SO(3.2–2.1) лучевые концентрации пересчитаны с учетом величины оптической толщины  $\tau$ :

$$N = N^{\text{thin}} \frac{\tau}{1 - \exp(-\tau)} \text{ см}^{-2}. \quad (4)$$

### 3.4. Анализ данных *Bolocam*

Для определения массы пыли, а затем и массы газа  $M$  по данным *Bolocam* мы использовали подход, предложенный в работе [45]: для каждого пикселя карты излучения пыли мы считали, что излучение создается одинаковыми по размеру и свойствам пылинками с температурой  $T_d$  (см. также [36]). Излучение пыли на длине волны 1.1 мм является оптически тонким. Тогда для каждого пикселя масса пыли:

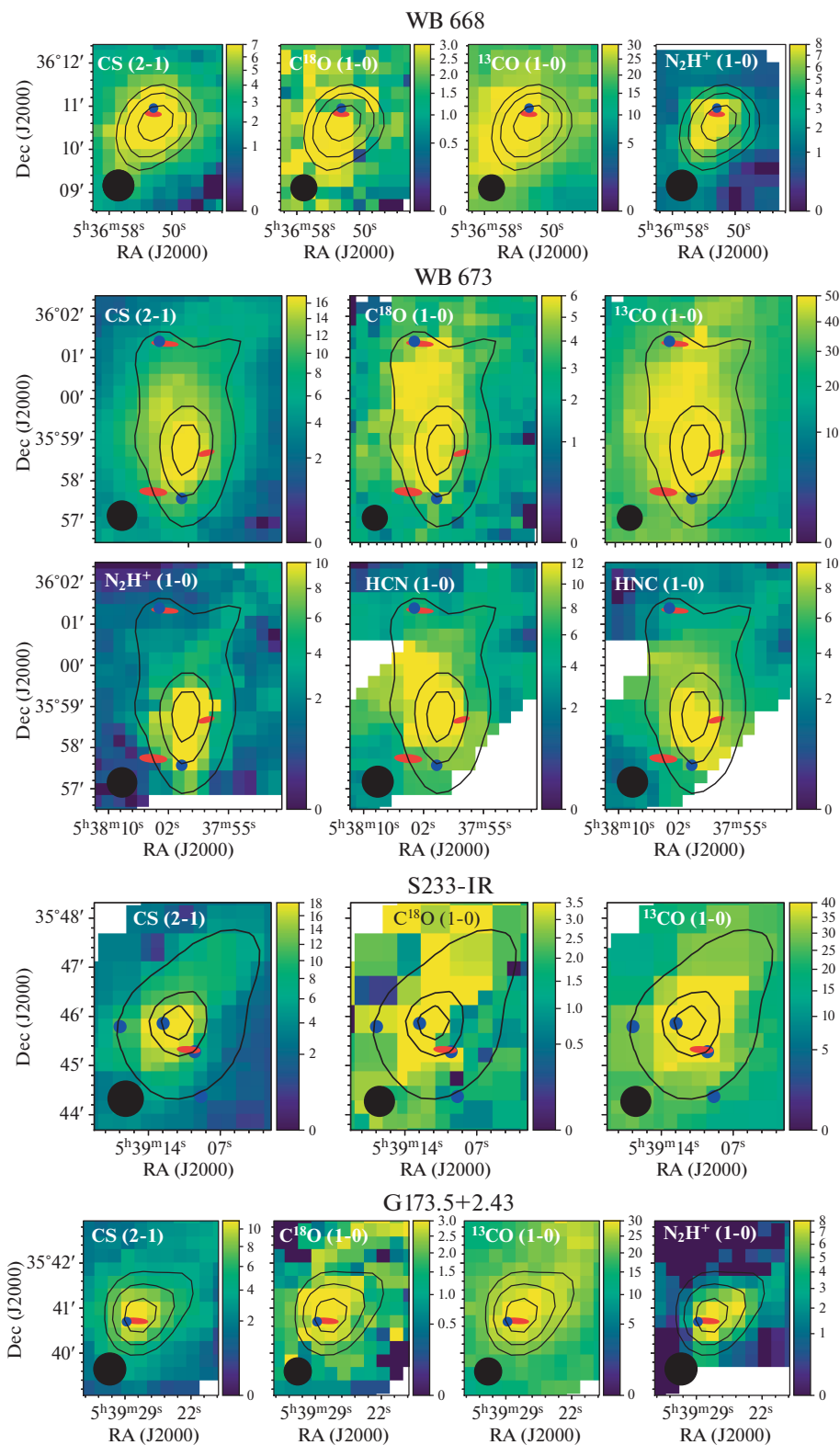
$$M = \frac{10^{-23} S_{1.1} D^2}{\kappa_{1.1} B_{1.1}(T_d)} \text{ гр}, \quad (5)$$

где  $B_{1.1}(T)$  – функция Планка для принятой температуры пыли  $T_d$  в единицах СГС (в данной работе температура пыли принята равной температуре газа  $T_d = 10$  К),  $\kappa_{1.1} = 0.0114 \text{ см}^2/\text{г}$  – непрозрачность пыли, в этом значении уже учтено, что отношение массы газа к массе пыли в молекулярных облаках равно 100 [46–48],  $S_{1.1}$  – плотность потока на длине волны 1.1 мм,  $D$  – расстояние до объекта [см], соответствующее 1.6 кпк [49], коэффициент  $10^{-23}$  используется для перевода плотности потока из единиц СГС в Янские. Так как в архивных fits-файлах обзора *Bolocam* данные записаны в единицах [Янские/диаграмма направленности], [Jy/beam], т.е. в каждом пикселе плотность потока  $S_{1.1}$  проинтегрирована по всей площади диаграммы направленности телескопа, то и масса  $M$  является в этом смысле величиной интегральной. Для того, чтобы получить значение лучевой концентрации молекулярного водорода  $N(\text{H}_2)$  в единицах  $[\text{см}^{-2}]$ , необходимо учесть 1) среднюю молекулярную массу  $\mu_{\text{H}_2} = 2.8$  в единицах массы атома водорода; также учесть вклад гелия и металлов (вклад атомарного водорода незначительный [50]), 2) массу атома водорода  $m_{\text{H}} = 1.66053 \times 10^{-24} \text{ г}$  и 3) площадь, которую охватывает диаграмма направленности в картинной плоскости на расстоянии объекта  $S = \pi \left( \text{tg}(\text{FWHM}/\sqrt{4\ln 2}/206265) D \right)^2 \text{ см}^2$ , где  $\text{FWHM} = 33''$  – размер диаграммы направленности в угловых секундах:

$$N(\text{H}_2) = \frac{M}{S \mu_{\text{H}_2} m_{\text{H}}} \text{ см}^{-2}. \quad (6)$$

Неопределенности калибровки данных обзора *Bolocam* лежат в пределе 20–30% [36].

<sup>5</sup> <https://spec.jpl.nasa.gov>



**Рис. 2.** Карты интегрального излучения молекул в центральном сгустке WB 673 и трех крайних. Красные эллипсы – IRAS-источники (эллипс показывает область неопределенности положения), синие кружки – MSX-источники, черные контуры – уровни излучения пыли на 1.1 мм (Bolocam), где внешний контур соответствует уровню  $3\sigma$ , а внутренние показывают 35% и 65% от уровня максимальной интенсивности в каждом из сгустков отдельно (табл. 8), черный круг в левом нижнем углу – диаграмма направленности телескопа.

**Таблица 6.** Линии, отождествленные в центральном сгустке WB 673

Линия	Переход	Частота, МГц	$W$ , (К км/с)	$T_{mb}$ , К	$\Delta V$ , км/с	$V$ , км/с	$E_u$ , К
HCN	1–0	88631.8	0.8 (0.2)	0.4 (0.2)	1.7 (0.4)	–26.3 (0.2)	4.3
			6.0 (0.2)	2.3 (0.2)	2.6 (0.1)	–20.0 (0.1)	
			1.0 (0.2)	0.6 (0.2)	1.7 (0.3)	–15.1 (0.1)	
HCO <sup>+</sup>	1–0	89188.5	14.6 (0.4)	5.1 (0.1)	2.7 (0.1)	–20.1 (0.03)	4.3
HNC	1–0	90663.6	9.0 (0.4)	3.0 (0.1)	2.8 (0.1)	–19.6 (0.02)	4.4
			1.5 (0.1)	0.7 (0.1)	2.3 (0.1)	–28.0 (0.1)	
N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	1–0	93173.8	6.9 (0.7)	2.5 (0.1)	2.7 (0.04)	–19.6 (0.02)	4.5
			3.7 (0.1)	1.5 (0.1)	2.3 (0.06)	–13.9 (0.03)	
C <sup>34</sup> S	2–1	96412.9	1.7 (0.3)	0.7 (0.2)	2.1 (0.4)	–19.2 (0.2)	6.9
			0.6 (0.2)	0.5 (0.3)	1.2 (0.4)	–29.7 (0.1)	
CH <sub>3</sub> OH	2–1	96741.4	5.8 (0.3)	2.1 (0.3)	2.6 (0.2)	–19.2 (0.1)	7.0
			4.0 (0.3)	1.7 (0.3)	2.2 (0.2)	–12.9 (0.04)	
<sup>34</sup> SO	3.2–2.1	97715.4	0.6 (0.1)	0.2 (0.03)	2.8 (0.3)	–21.0 (0.2)	9.1
CS	2–1	97980.9	17.2 (0.2)	5.1 (0.1)	3.2 (0.03)	–19.8 (0.01)	7.1
H <sub>2</sub> CS	3(1,2)–2(1,1)	104617.1	0.8 (0.1)	0.4 (0.1)	1.9 (0.5)	–18.9 (0.2)	23.2
SO	3.2–2.1	109252.2	1.2 (0.2)	0.4 (0.1)	3.2 (0.7)	–19.1 (0.3)	21.1
C <sup>18</sup> O	1–0	109782.2	6.6 (0.2)	1.9 (0.2)	3.3 (0.1)	–19.3 (0.1)	5.3
HCCCN	12–11	109173.6	0.7 (0.1)	0.5 (0.1)	1.3 (0.2)	–18.7 (0.1)	34.1
<sup>13</sup> CO	1–0	110201.4	54.2 (0.5)	13.2 (0.3)	3.9 (0.04)	–19.4 (0.03)	5.3

**Примечание.**  $W$  – интегральная интенсивность,  $T_{mb}$  – яркостная температура пика,  $\Delta V$  – ширина линии,  $V$  – лучевая скорость пика яркостной температуры в спектре,  $E_u$  – энергия верхнего уровня вращательного перехода. Для линий со сверхтонким расщеплением (HNC, HNC, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) показана частота компонента с наибольшей относительной силой, остальные параметры разделены. В скобках указана ошибка измерения.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

##### 4.1. Обзор линий излучения молекул в пике излучения линии CS сгустка WB 673

В направлении на пик лучевой концентрации CS, найденный в работе [19] ( $\alpha$ (J2000) = 05<sup>h</sup>38<sup>m</sup>00<sup>s</sup>.0,  $\delta$ (J2000) = 35°59'17.0") в центральном сгустке WB 673 был зарегистрирован ряд линий, параметры которых показаны в табл. 6, а спектры – на рис. 3. В таблице приведена ошибка определения интегральной интенсивности, для всех линий она не превышает 20%, для ярких линий CS(2–1), C<sup>18</sup>O(1–0), <sup>13</sup>CO(1–0), N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0), HNC(1–0), HCN(1–0) ошибка не превышает 10%. Для спектров SO(3.2–2.1), <sup>34</sup>SO(3.2–2.1), HCCCN(13–12), C<sup>34</sup>S(2–1) проведена процедура усреднения по 3 каналам. В спектрах <sup>13</sup>CO(1–0), CS(2–1) и HNC(1–0) видно небольшое красное крыло, а в спектре HCO<sup>+</sup>(1–0) – синее. Излучение в линиях со сверхтонкими компонентами является оптически тонким, как показал анализ с пакетом CLASS. Оптическая толщина линии

CS(2–1) составляет 3.4, линии SO(3.2–2.1) – 17.6, линии <sup>13</sup>CO(1–0) – 0.4.

Лучевые концентрации и относительные обилия в направлении пика излучения CS(2–1) плотного сгустка WB 673 показаны в табл. 7. Мы ожидаем, что ошибка определения лучевых концентраций молекул не превышает 10%, ошибка определения обилий – 50%.

**Таблица 7.** Лучевые концентрации и относительные обилия молекул в направлении пика излучения CS(2–1) в WB 673

Молекула	$N$ , см <sup>–2</sup>	$N/N(\text{H}_2)$
CO	$5.12 \times 10^{18}$	$1.1 \times 10^{-4}$
N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	$1.6 \times 10^{13}$	$3.4 \times 10^{-10}$
HCN	$1.7 \times 10^{13}$	$3.6 \times 10^{-10}$
HNC	$1.6 \times 10^{13}$	$3.4 \times 10^{-10}$
CS	$2.8 \times 10^{14}$	$5.9 \times 10^{-9}$
SO	$2.5 \times 10^{14}$	$5.3 \times 10^{-9}$
HCCCN	$5.8 \times 10^{12}$	$1.2 \times 10^{-10}$

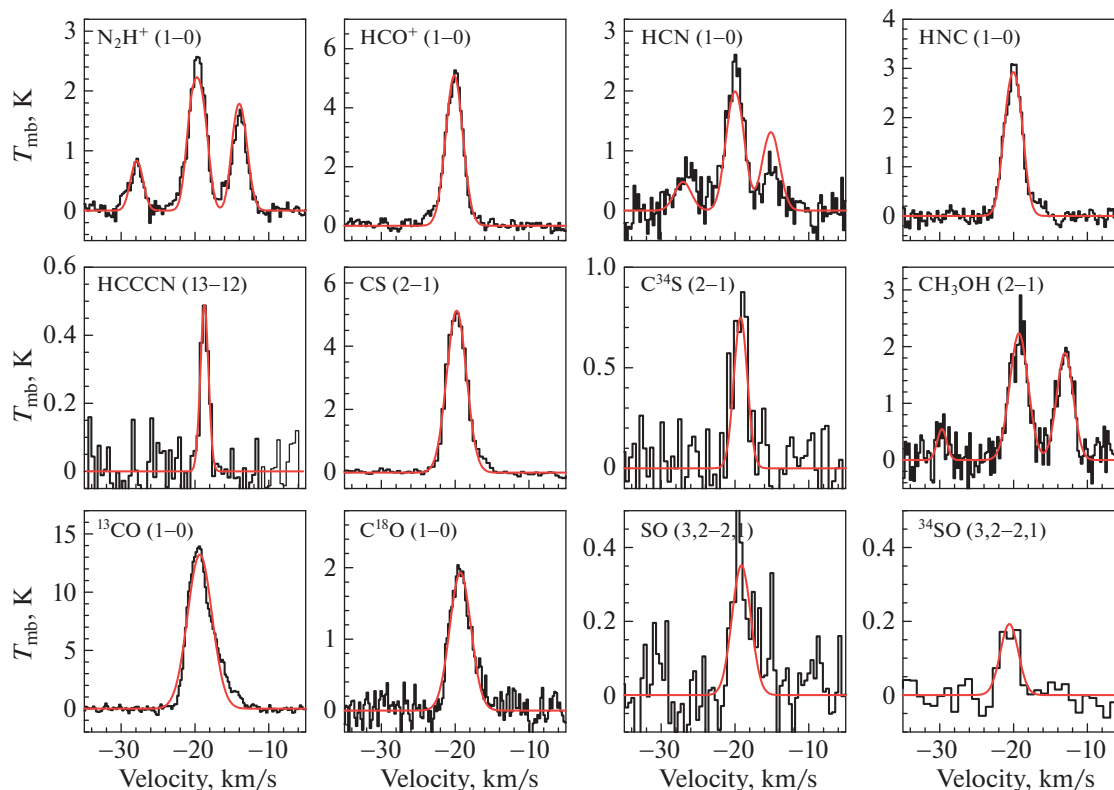


Рис. 3. Спектры линий излучения молекул в направлении центрального сгустка WB 673. Красной линией показано приближение спектра гауссовыми функциями.

#### 4.2. Карты излучения молекул и распределения обилий молекул в сгустках

Построены карты интегральной интенсивности излучения в линиях молекул CS(2–1), C<sup>18</sup>O(1–0), <sup>13</sup>CO(1–0), N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0), HNC(1–0), HCN(1–0) в сгустках WB 673, WB 668, S233–IR и G173.57+2.43 (рис. 2). Из-за нехватки наблюдательного времени данные по всем молекулам есть не для всех сгустков.

Из рис. 2 видно, что пики излучения в линиях молекул, в основном, совпадают с пиками излучения пыли на длине волны 1.1 мм. Излучение линий C<sup>18</sup>O и <sup>13</sup>CO во всех сгустках распределено более равномерно, без ярко выраженного контраста, так как линии C<sup>18</sup>O(1–0) и <sup>13</sup>CO(1–0) имеют низкую критическую плотность и переходят в насыщение в плотных регионах.

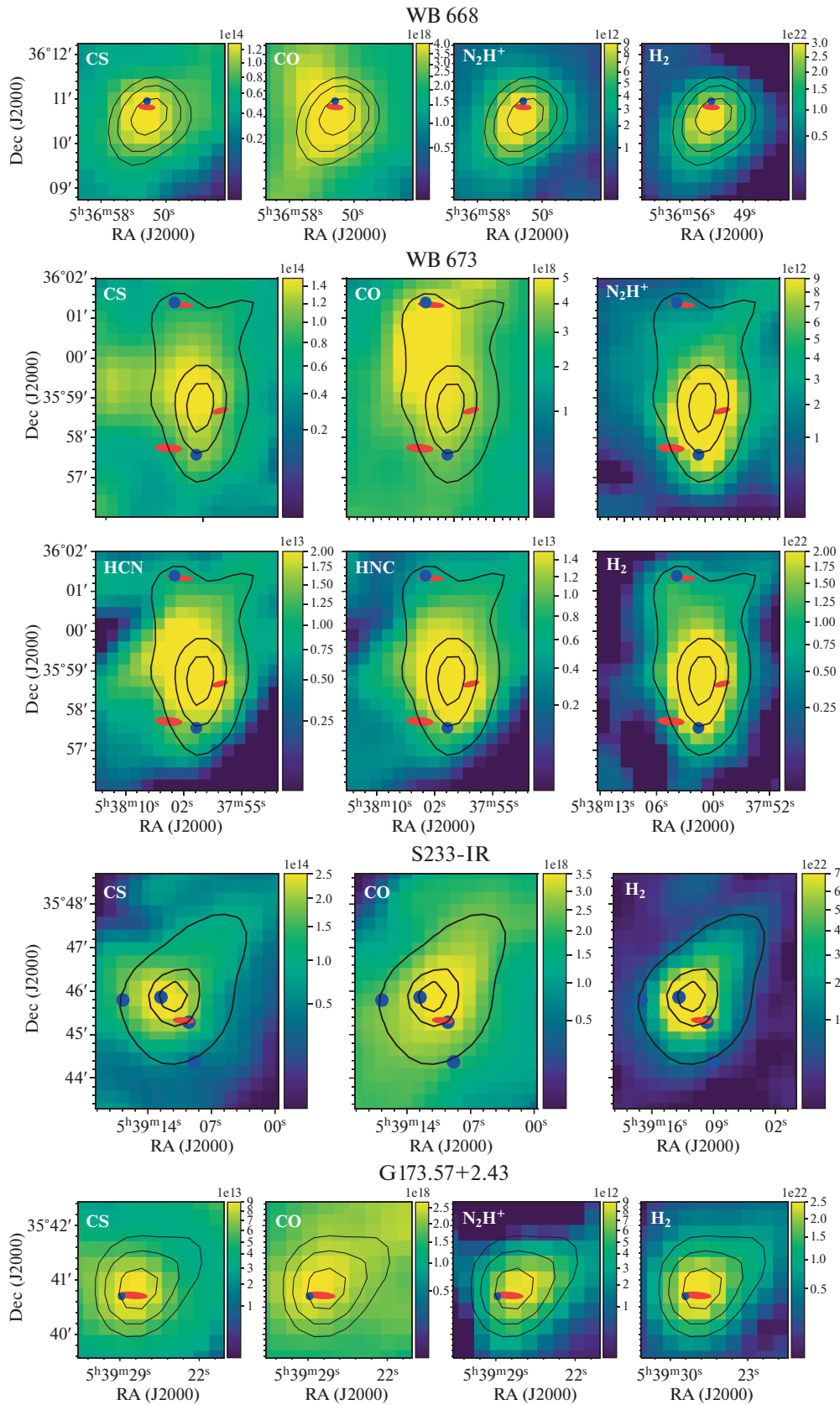
Мы приводим карты  $N(\text{H}_2)$  вместе с лучевыми концентрациями других молекул на рис. 4. Для всех карт проведена процедура конволюции с функцией Гаусса для того, чтобы пространственное разрешение карт было одинаковым, таким же как для карты излучения в линии N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1–0), для которой размер диаграммы направленности 20-метрового телескопа равен 43". Также все карты лучевых концентраций были приведены к од-

ной и той же координатной сетке, соответствующей карте  $N(\text{CO})$ . Лучевая концентрация CO была получена из карты лучевой концентрации <sup>13</sup>CO с использованием отношения <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C = 80 [43]. Черные контуры на рис. 2, 4, 5 показывают уровни излучения пыли в полосе 1.1 мм, где внешний контур соответствует уровню отношения сигнал/шум ≈ 3, а внутренние показывают ~35% и ~65% от уровня максимальной интенсивности в каждом из сгустков отдельно. В табл. 8 приведены уровни лучевой концентрации водорода в сгустках. На уровне 3σ лучевая концентрация водорода составляет  $7.2 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ .

В сгустке WB 673 пики  $N(\text{CS})$ ,  $N(\text{CO})$ ,  $N(\text{N}_2\text{H}^+)$ ,  $N(\text{HCN})$  и  $N(\text{HNC})$  находятся в центральной части сгустка, также виден вторичный максимум  $N(\text{CO})$  в северо-восточной части сгустка, где расположены точечные ИК-источники.

На рис. 5 показаны карты относительных обилий молекул  $x = N/N(\text{H}_2)$  в сгустках. Предварительно со всех карт излучения молекул были удалены пиксели, в которых отношение сигнал/шум было меньше 3, чтобы удалить ненадежные данные. Та же процедура была проведена с картами излучения пыли, а затем были получены обилия





**Рис. 4.** Лучевая концентрация молекул CS, CO, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HNC, HCN, H<sub>2</sub> в центральном сгустке WB 673. Обозначения как на рис. 2.

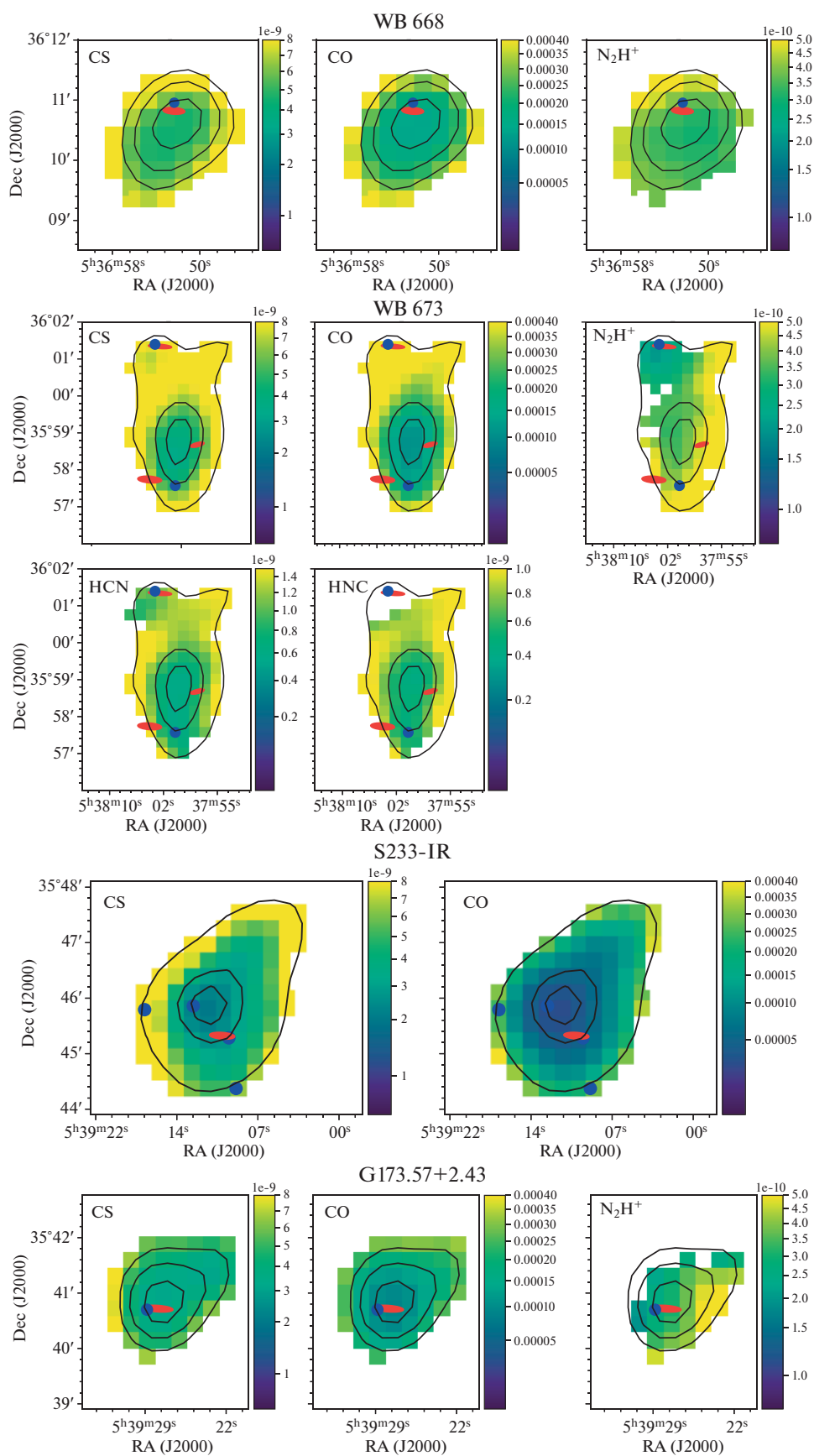


Рис. 5. Обилия молекул CS, CO,  $N_2H^+$ , HNC, HCN в плотных сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.

**Таблица 8.** Уровни лучевой концентрации водорода в сгустках,  $\text{см}^{-2}$ 

Уровень	WB89 668	WB 673	S233–IR	G173.57+2.43
35%	$1.9 \times 10^{22}$	$2.4 \times 10^{22}$	$6.4 \times 10^{22}$	$1.6 \times 10^{22}$
65%	$3.0 \times 10^{22}$	$4.0 \times 10^{22}$	$1.2 \times 10^{23}$	$2.4 \times 10^{22}$
Максимум	$4.4 \times 10^{22}$	$5.7 \times 10^{22}$	$2.0 \times 10^{23}$	$4.2 \times 10^{22}$

молекул путем деления лучевых концентраций молекул и  $N(\text{H}_2)$  попиксельно.

В табл. 9 приведены обилия молекул, усредненные по сгусткам. Средние обилия одних и тех же молекул сохраняются примерно равными во всех сгустках.

Во всех сгустках обилия молекул уменьшаются в направлении максимума величины  $N(\text{H}_2)$ , за исключением обилий  $\text{N}_2\text{H}^+$  в центральном сгустке WB 673 и в южном G173.57+2.43. В них максимумы  $x(\text{N}_2\text{H}^+)$  находятся в юго-западных частях сгустков, и виден плавный градиент величины  $x(\text{N}_2\text{H}^+)$  в направлении с северо-востока к юго-западу, а в сгустке WB 668 наблюдается противоположный градиент величины  $x(\text{N}_2\text{H}^+)$ . Во всех сгустках максимум обилия  $\text{N}_2\text{H}^+$  находится в области с пониженным обилием CO, что хорошо согласуется с теорией: молекулы CO быстро разрушают  $\text{N}_2\text{H}^+$  [31].

Мы сравнили результат наших наблюдений с данными излучения пыли на 30-м телескопе IRAM [51]. Максимальное значение лучевой концентрации водорода в направлении источника IRAS 05358+3543 в сгустке S233–IR составляет  $5.8 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$ , для трех менее плотных пиков лучевая концентрация лежит в пределах  $(1.1-1.8) \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$ . Согласно нашим расчетам по данным Bolocam максимальная лучевая концентрация в сгустке S233–IR равна  $2.0 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$ . Также в работе [51] определена лучевая концентрация CS в направлении на пик плотности,  $(1.7-10) \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , которая приближается к концентрации, полученной в данной работе ( $3.1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ).

**Таблица 9.** Обилия молекул, усредненные по сгусткам

Молекула	WB 668	WB 673	S233–IR	G173.57+2.43
CS	$7.0 \times 10^{-9}$	$7.8 \times 10^{-9}$	$6.6 \times 10^{-9}$	$4.8 \times 10^{-9}$
CO	$2.7 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-4}$
$\text{N}_2\text{H}^+$	$3.8 \times 10^{-10}$	$4.3 \times 10^{-10}$	–	$3.6 \times 10^{-10}$
HCN	–	$1.2 \times 10^{-9}$	–	–
HNC	–	$8.34 \times 10^{-10}$	–	–

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод “химических часов”, который мы в дальнейшем собираемся использовать для анализа полученных распределений обилий, требует информации о температуре и плотности газа и пыли. Значения  $N(\text{H}_2)$ , полученные в каждом из пикселей наших карт, предполагают постоянство температуры пыли по всем картам ( $T_d = 10 \text{ K}$ ), что может не соответствовать действительности. Поэтому мы будем работать над определением физических параметров газа, например, по излучению молекул аммиака. Значения температуры газа в работе [18] получены с пространственным разрешением  $2'$ , что сравнимо с размером плотных сгустков из волокна WB 673, карты излучения в линиях молекул в нашей работе обладают более чем в 2.5 раза лучшим разрешением, поэтому мы не используем значения температуры газа из [18]. Температура пыли может быть получена из более тонкого анализа ИК-излучения пыли, над чем мы также планируем работать далее.

Мы формулируем выводы по проделанной работе следующим образом:

- Проведен обзор линий излучения молекул в центральном сгустке волокна WB 673. Уверенно обнаружено 13 линий молекул, излучающих в миллиметровом диапазоне. Для этих линий определены интегральные интенсивности, яркостные температуры пика, уровень шума, ширины линий, лучевые скорости пика яркостной температуры. Для молекул со сверхтонким расщеплением (HCN,  $\text{N}_2\text{H}^+$ , HNC) определены параметры всех видимых компонентов.

- Построены карты интегральных интенсивностей излучения молекул в линиях CS(2–1),  $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$ ,  $^{13}\text{CO}(1-0)$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+(1-0)$ , HNC(1–0), HCN(1–0) в плотных сгустках WB 673, WB 668, S233–IR, G173.57+2.43, проведен анализ распределения газа. Пики излучения в линиях молекул совпадают в пиками излучения пыли на длине волны 1.1 мм. Также определены лучевые концентрации, обилия молекул относительно концентрации водорода.

- Построены карты распределения обилий молекул в плотных сгустках; показано, что обилия CO и CS во всех сгустках, а также HCN и

HNC в центральном сгустке, уменьшаются в направлении наиболее плотной центральной части. Для распределения обилия молекулы  $N_2H^+$  наблюдается градиент в направлении с северо-востока на юго-запад в сгустках WB 673 и G173.57+2.43, и противоположный – в сгустке WB 668.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00917.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим А.О.Х. Олофссона за помощь при наблюдениях на 20-м телескопе обсерватории Онсала; А.М. Соболева и Д.З. Вибе за плодотворные обсуждения; рецензента за замечания и комментарии, которые позволили нам сделать лучше текст статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *F. H. Shu, F. C. Adams, and S. Lizano*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **25**, 23 (1987).
2. *F. Motte, S. Bontemps, and F. Louvet*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 41 (2018).
3. *S. Schneider and B.-G. Elmegreen*, *Astrophys. J. Suppl.* **41**, 87 (1979).
4. *N. M. McClure-Griffiths, J. M. Dickey, B. M. Gaensler, A. J. Green, and M. Haverkorn*, *Astrophys. J.* **652** (2), 1339 (2006).
5. *P. André, J. Di Francesco, D. Ward-Thompson, S.-I. Inutsuka, R. E. Pudritz, and J. E. Pineda*, *Protostars and Planets VI*, edited by *H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, and T. Henning* (Tucson: University of Arizona Press, 2014), p. 27.
6. *P. André, V. Révère, V. Könyves, D. Arzoumanian, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **592**, id. A54 (2016).
7. *S.-i. Inutsuka and S. M. Miyama*, *Astrophys. J.* **480**, 681 (1997).
8. *J. H. Bieging, W. L. Peters, B. Vila Vilaro, K. Schlotzman, and C. Kulesa*, *Astron. J.* **138** (3), 975 (2009).
9. *J. C. Mottram and C. M. Brunt*, *The Dynamic Interstellar Medium: A Celebration of the Canadian Galactic Plane Survey*, edited by *R. Kothes, T. L. Landecker, and A. G. Willis*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **438**, 98 (2010).
10. *J. H. Bieging and W. L. Peters*, *Astrophys. J. Suppl.* **196** (2), id. 18 (2011).
11. *J. H. Bieging, S. Patel, W. L. Peters, L. V. Toth, G. Marton, and S. Zahorecz*, *Astrophys. J. Suppl.* **226** (1), id. 13 (2016).
12. *S. Sharpless*, *Astrophys. J. Suppl.* **4**, 257 (1959).
13. *F. P. Israel and M. Felli*, *Astron. and Astrophys.* **63**, 325 (1978).
14. *M. Felli, L. Testi, R. Valdettaro, and J.-J. Wang*, *Astron. and Astrophys.* **320**, 594 (1997).
15. *M. Felli, F. Massi, A. Navarrini, R. Neri, R. Cesaroni, and T. Jenness*, *Astron. and Astrophys.* **420**, 553 (2004).
16. *M. Felli, F. Massi, M. Robberto, and R. Cesaroni*, *Astron. and Astrophys.* **453**, 911 (2006).
17. *D. A. Ladeyschikov, A. M. Sobolev, S. Yu. Parfenov, S. A. Alexeeva, and J. H. Bieging*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **452** (3), 2306 (2015).
18. *D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. P. Tsvilev, and A. M. Sobolev*, *Astrophys. Bull.* **71** (2), 208 (2016).
19. *M. S. Kirsanova, S. V. Saliu, A. M. Sobolev, A. O. H. Olofsson, D. A. Ladeyschikov, and M. Thomasson*, *Open Astronomy* **26**, 99 (2017).
20. *E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, et al.*, *Astron. J.* **140** (6), 1868 (2010).
21. *J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, Q. F. Yin, R. A. Perley, G. B. Taylor, and J. J. Broderick*, *Astron. J.* **115**, 1693 (1998).
22. *L. Bronfman, L.-A. Nyman, and J. May*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **115**, 81 (1996).
23. *G. Tofani, M. Felli, G. B. Taylor, and T. R. Hunter*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 299 (1995).
24. *A. Porras, I. Cruz-González, and L. Salas*, *Astron. and Astrophys.* **361**, 660 (2000).
25. *H. Beuther, P. Schilke, K. M. Menten, F. Motte, T. K. Sridharan, and F. Wyrowski*, *Astrophys. J.* **566** (2), 945 (2002).
26. *H. Beuther, P. Schilke, F. Gueth, M. McCaughrean, M. Andersen, T. K. Sridharan, and K. M. Menten*, *Astron. and Astrophys.* **387**, 931 (2002).
27. *H. Beuther, P. Schilke, T. K. Sridharan, K. M. Menten, C. M. Walmsley, and F. Wyrowski*, *Astron. and Astrophys.* **383**, 892 (2002).
28. *V. Minier, M. G. Burton, T. Hill, M. R. Pestalozzi, C. R. Purcell, G. Garay, A. J. Walsh, and S. Longmore*, *Astron. and Astrophys.* **429**, 945 (2005).
29. *H. Beuther, S. Leurini, P. Schilke, F. Wyrowski, K. M. Menten, and Q. Zhang*, *Astron. and Astrophys.* **466** (3), 1065 (2007).
30. *S. Leurini, H. Beuther, P. Schilke, F. Wyrowski, Q. Zhang, and K. M. Menten*, *Astron. and Astrophys.* **475** (3), 925 (2007).
31. *E. A. Bergin and W. D. Langer*, *Astrophys. J.* **486**, 316 (1997).
32. *V. Belitsky, I. Lapkin, M. Fredrixon, E. Sundin, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **580**, id. A29 (2015).
33. *S. Maret, P. Hily-Blant, J. Pety, S. Bardeau, and E. Reynier*, *Astron. and Astrophys.* **526**, id. A47 (2011).
34. *R. J. Sault, P. J. Teuben, and M. C. H. Wright*, *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV*, edited by *R. A. Shaw, H. E. Payne, and J. J. E. Hayes*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **77**, 433 (1995).
35. *A. M. Price-Whelan, B. M. Sipőcz, H. M. Günther, P. L. Lim, et al.*, *Astron. J.* **156**, id. 123 (2018).
36. *J. Bally, J. Aguirre, C. Battersby, E. T. Bradley, et al.*, **721**, 137 (2010).
37. *A. Ginsburg, J. Glenn, E. Rosolowsky, E. and T. P. Ellsworth-Bowers*, *Astrophys. J. Suppl.* **208**, id. 14 (2013).
38. *P. Caselli, P. C. Myers, and P. Thaddeus*, *Astrophys. J.* **455**, L77 (1995).
39. *A. M. Mullins, R. M. Loughnane, M. P. Redman, B. Willes, N. Guegan, J. Barrett, and E. R. Keto*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **459**, 2882 (2016).

40. *M. A. Frerking, W. D. Langer, and R. W. Wilson*, *Astrophys. J.* **232**, L65 (1979).
41. *P. G. Wannier*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **18**, 399 (1980).
42. *T. L. Wilson*, *Rep. Prog. Phys.* **62** (2), 143 (1999).
43. *J. H. Bieging, S. Patel, W. L. Peters, L. V. Toth, G. Marton, and S. Zahorecz*, *Astrophys. J. Suppl.* **226** (1), id. 13 (2016).
44. *J. G. Mangum and Y. L. Shirley*, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **127**, 266 (2015).
45. *R. H. Hildebrand*, *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* **24**, 267 (1983).
46. *V. Ossenkopf and Th. Henning*, *Astron. and Astrophys.* **291**, 943 (1994).
47. *V. V. Akimkin, M. S. Kirsanova, Ya. N. Pavlyuchenkov, and D. S. Wiebe*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **449** (1), 440 (2015).
48. *V. V. Akimkin, M. S. Kirsanova, Ya. N. Pavlyuchenkov, and D. S. Wiebe*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **469** (1), 630 (2017).
49. *R. A. Burns, H. Imai, T. Handa, T. Omodaka, A. Nakagawa, T. Nagayama, and Y. Ueno*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **453** (3), 3163 (2015).
50. *J. Kauffmann, F. Bertoldi, T. L. Bourke, N. J. Evans II, and C. W. Lee*, *Astron. and Astrophys.* **487**, 993 (2008).
51. *H. Beuther, P. Schilke, K. M. Menten, and F. Motte, T. K. Sridharan, and F. Wyrowski*, *Astrophys. J.* **566** (2), 945 (2002).