ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи УДК <u>xxx.xxx</u>

Рябухина Ольга Леонидовна

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ВОЛОКОН В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Специальность 01.03.02 — «Астрофизка и звездная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук Кирсанова Мария Сергеевна

Москва — 2022

Оглавление

		(Стр.
Введе	ние.		5
Глава	1. Ha6	блюдения радиолиний молекул в гигантском	
	MOJ	іекулярном облаке G174+2.5 и методы исследования	18
1.1	Гиган	тское молекулярное облако G174+2.5	18
1.2	Набли	одения	22
	1.2.1	Карты линий излучения молекул в волокне WB 673	22
	1.2.2	Обзор радиолиний молекул 3 – 4 мм в направлении	
		плотных сгустков облака G174+2.5	23
	1.2.3	Наблюдение радиолиний аммиака в направлении волокна	
		WB 673	26
	1.2.4	Архивные данные об излучении пыли	27
1.3	Метод	цы исследования в диссертационной работе	27
	1.3.1	Лучевая концентрация молекул	27
	1.3.2	Анализ линий излучения аммиака	29
	1.3.3	Вращательные диаграммы CH ₃ CCH	33
	1.3.4	Анализ данных Bolocam	35
Глава	2. Стр	руктура и физические условия в областях	
	зве	здообразования G174 $+2.5$	37
2.1	Карти	ы излучения молекул в молекулярном волокне WB 673	37
	2.1.1	Линии излучения молекул в центральном сгустке WB 673	41
2.2	Анали	из излучения в линиях аммиака в волокне WB 673	46
	2.2.1	Параметры излучения в линиях аммиака	46
	2.2.2	Физические условия газа	51
	2.2.3	Аномалии сверхтонкой структуры аммиака	53
2.3	Обзор) спектральных линий в плотных сгустках гигантского	
	молек	хулярного облака G174+2.7	55
	2.3.1	Результаты наблюдений	55
	2.3.2	Вращательные диаграммы CH ₃ CCH	65

	2.3.3	Лучевые концентрации	65
	2.3.4	Доля дейтерия	69
Глава	3. Аст	рохимическое моделирование плотных сгустков	
	G17	$4{+}2.5$	75
3.1	Модел	ирование химической эволюции плотных сгустков волокна	
	WB 67	73 по радиальному профилю	75
	3.1.1	Описание модели	75
	3.1.2	Результаты моделирования	77
	3.1.3	Обсуждение результатов моделирования	83
Заклю	чение		85
Списон	к лите <u></u>	ратуры	88
Списон	к рису	нков	103
Списон	с таблі	иц	106

Введение

Межзвездная среда и гигантские молекулярные облака

Межзвездное пространство галактиках состоит из нескольких компонент: газ, пыль, магнитное поле, космические лучи и электромагнитное излучение. Все компоненты межзвездной среды тесно взаимосвязаны: межзвездный газ, ионизируемый космическими лучами и жестким электромагнитным излучением, взаимодействует с магнитными полями; магнитное поле воздействует на движение ионов и электрически заряженных пылинок. Из вещества межзвездной среды в галактиках образуются звезды. В процессе эволюции звезд благодаря термоядерным реакциям формируются элементы тяжелее водорода и гелия, которые впоследствии выбрасываются в межзвездную среду. Таким образом во Вселенной происходит гигантский круговорот вещества, в процессе которого межзвездная среда обогащается тяжелыми элементами [1].

Несмотря на постоянное пополнение межзвездной среды (МЗС) тяжелыми элементами, наиболее обильной составляющей является водород (90% по числу атомов). Остальные элементы входят в МЗС в малом количестве, однако эти небольшие примеси существенны для теплового баланса межзвездного газа. Кроме того, знания о физических условиях в МЗС в значительной мере обязаны наблюдениям именно линий излучения тяжелых элементов. Физические условия, описывающие межзвездный газ, варьируются в очень широких пределах; например, кинетическая температура меняется от ~ 5 К в плотных молекулярных облаках до $\sim 10^6$ K в галактическом корональном газе, а плотность от $\sim 10^{-4}$ до $\sim 10^{12}$ частиц в см³. Однако в большинстве случаев среду можно считать находящейся в динамическом равновесии. Наиболее низкая температура соответствует среде с наиболее высокой плотностью, так что давления в разных областях по порядку величины равны. Наиболее плотные и холодные части межзвездной среды называют молекулярными облаками, поскольку газ в них находится в молекулярном состоянии. В межзвездной среде постоянно происходят процессы, выводящие среду из состояния равновесия: столкновения

облаков, прохождение облаков через спиральные волны плотности, ионизация среды во время вспышек сверхновых звезд.

В Галактике межзвездный газ сосредоточен в основном в спиральных ветвях. Основная масса газа собрана в общирные газово-пылевые комплексы, называемые гигантскими молекулярными облаками. Это очень холодные (10 – 20 K) и плотные облака, состоящие, в основном, из молекулярного водорода. Масса гигантских молекулярных облаков может превышать $10^5 M_{\odot}$, а размеры достигают 40 пк [2]. Низкая температура поддерживается благодаря процессам охлаждения через излучение пыли в ИК диапазоне, а так же излучения в линиях молекул, например, СО и ОН. Вследствие этих процессов в широком диапазоне плотностей температура молекулярных облаков остается в пределах 5–50 K [3].

Волокна и звездообразование

Исследования последних лет показали, что межвездная среда состоит из волокон. В целом волокнообразная форма облаков известна давно, например, еще в 1979 году был составлен каталог из 23-х волокон, которые наблюдались в поглощении на оптических снимках [4]. Однако количество известных волокон было небольшим [3; 5]. Наблюдения областей звездообразования на телескопе им. Гершеля в далеком инфракрасном (ИК) диапазоне показали, что близлежащие молекулярные облака имеют форму волокон [6].

В работе [7] были систематизированы наблюдения волокон и на основе этого авторы сформулировали определение: «волокно» - это любая удлиненная структура межзвездной среды с соотношением сторон больше, чем ~ 5:1, которая значительно плотнее своего окружения. В среднем более 15% общей массы газа в облаках и более 80% массы плотного газа (с лучевой концентрацией водорода $N(H_2) > 7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$) находится в форме волокон [7]. Волокнистая структура выделяется и в облаках, где нет признаков активного звездообразования, что указывает на ее появление до начала процесса образования звезд [8]. Распространенность волокон предполагает, что они могут сохраняться в течение значительной части типичного времени жизни облака. Образование волокон может быть необходимой стадией эволюции молекулярных облаков на пути к образованию звезд, и именно образование волокон обусловливает вид начальной функции масс звезд [9]. Теоретические расчеты (напр., [10]), показывают, что формирование молекулярных волокон возможно после множественных сжатий газа ударными волнами, источником которых являются расширяющиеся области ионизованного водорода Н II и остатки сверхновых звезд. Другие модели показывают, что волокна формируются в результате аккумуляции вещества вдоль силовых линий магнитного поля [11]. Согласно [12], формирование волокон происходит вследствие фрагментации межзвездных "листов" - протяженных областей межзвездного газа.

Кроме того, ударные волны так же могут влиять на темп звездообразования. Согласно [13], формирование более чем 30% массивных звезд в Галактике может быть спровоцировано ударными волнами. Согласно динамическим моделям эволюции межзвездных молекулярных облаков, внешнее воздействие увеличивает темп аккреции вещества и уменьшает время холодной фазы сжатия плотного молекулярного сгустка, в котором еще не сформировались звезды [14—16].

Согласто наблюдательным данным обсерватории им. Гершеля, ближайшие к нам волокна имеют характерную ширину 0.1 пк. Однако последующие наблюдения на телескопе APEX показали, что наблюдается значительный разброс ширины вплоть до 3 пк со средним значением 0.5 пк [17]. Последний обзор охватывает структуры на масштабах Галактики, в то время как телескоп им. Гершеля дал информацию только о ближайших облаках. Исследования с использованием интерферометра ALMA предоставляют информацию о самых минимальных масштабах, и в работе [18] показано волокно шириной 0.035 пк, расположенное в облаке Ориона.

Гравитационная устойчивость волокон определяется отношением величины массы на единицу длины, называемой "линейная масса" [17]. Если линейная масса превышает критическое значение, которое зависит от скорости звука в среде $c_{\rm s}$ и гравитационной постоянной *G* [6]:

$$M_{\rm line,cr} = \frac{2c_{\rm s}}{G},\tag{1}$$

волокно становится неустойчивым и начинает сжиматься вдоль своей радиальной оси, то есть возникают движения газа вдоль волокна, что приводит к формированию плотных ($n \sim 10^4 - 10^6 \text{сm}^{-2}$) сгустков газа. При повышении плотности до таких значений охлаждение облаков через излучение становится существенным, поскольку столкновения молекул и пылинок происходит чаще. В наиболее холодных и плотных сгустках возможно образование звезд [19]. Гравитационная неустойчивость возникает когда сила тяжести сгустка превышает силы газового давления, препятствующие сжатию. Предел устойчивости описывается массой Джинса [20]:

$$M = \frac{5\sigma_v^2 R}{G},\tag{2}$$

где σ_v - дисперсия скорости, R - радиус сгустка. Гравитационно нестабильные сгустки с массой выше критической массы Джинса начинают сжиматься в шкале свободного времени, при этом температура в центре сгустка падает, потенциальная энергия высвечивается в ИК диапазоне, что приводит к повышению критической массы - сгусток разбивается на фрагменты, каждый из которых сжимается отдельно [20]. Этот процесс приводит к образованию звезд и звездных скоплений.

Химические реакции в молекулярных облаках

Плотные молекулярные облака характеризуются низкими температурами вплоть до 5–10 К, столь низкие значения главным образом обусловлены ИКизлучением пыли. Плотность в таких облаках < 10^6 см⁻². Края молекулярных облаков подвержены облучению мощным УФ-излучением от ближайших ярких звезд, так же молекулярные облака пронизаны космическими лучами. Водород в этих облаках находится в виде молекул H₂. В холодных условиях молекулярных облаков водород не имеет вращательных переходов, так как молекула симметрична, поэтому он ненаблюдаем. Вторая по распространенности молекула в плотных облаках — CO, углерод в основном входит ее состав. Количество остальных молекул составляет малую долю от H₂ и CO, однако разнообразие их внушительно, на данный момент в межзвездной среде зарегистрировано более 200 молекул согласно базе данных CDMS [21], и открытие новых происходит ежегодно. В условиях молекулярных облаков реализуются различные химические реакции, происходящие в газовой фазе или на поверхности пылинок [22].

В межзвездной среде протекают следующие типы газофазных реакций:

- 1. Нейтраль-нейтральные реакции с химически активными радикалами;
- 2. Ион-молекулярные реакции (перераспределение или перезарядка);
- 3. Диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов (разрыв связей);
- 4. Реакции радиативной ассоциации (радиативный захват);
- 5. Ионизация и диссоциация космическимими лучами и рентгеновским излучением;
- 6. Фотодиссоциация и фотоионизация УФ-излучением;
- 7. Фотопроцессы, индуцированные космическими лучами.

Нейтраль-нейтральные реакции в холодных межзвездных облаках маловероятны, так как молекула сразу после образования в такой реакции обладает избыточной энергией и сразу распадется, для стабилизации она должна быстро (< 1 с.) столкнуться с третьей частицей, которая унесла бы избыточную энергию. Среднее время столкновения между частицами в газе плотностью ~ 10^4 см⁻³ порядка млн секунд, поэтому нейтраль-нейтральные реакции в не являются основным типом реакций. Ион-молекулярные реакции не обладают энергетическим барьером и эффективны даже при низких температурах. Но для протекания этих реакций нужен ионизирующий фактор, такой как УФ- или рентгеновское излучение или космические лучи. Реакции радиативной ассоциации происходят следующим образом: при сближении двух атомов они на короткое время пролета образуют молекулу в состоянии с положительной энергией. Если вероятность спонтанного перехода для такой молекулы в состояние с отрицательной энергией достаточно велика, то образуется молекула.

В центральных частях плотных молекулярных сгустков, куда не проникает ультрафиолетовое излучение, цепочка реакций начинается с ионизации молекул водорода и атомов гелия космическими лучами. Примерно с равными вероятностями образуются ионы H^+ , H_2^+ и He^+ . Ион молекулы H_2^+ вступает в реакцию с H_2 и образует ион H_3^+ , который способен вступить в реакции даже с такими инертными молекулами, как СО. Ионы H^+ и He^+ вступают в обменные реакции с другими простыми молекулами, которые в результате распадаются на ионы углерода, азота, кислорода. После этого становится возможной вся последовательность ионно-молекулярных реакций. Ион-молекулярные и другие газофазные реакции в холодных молекулярных облаках позволяют образовывать главным образом двух-четырех атомные молекулы [23].

Однако наиболе
е распространенная молекула межзвездной среды H_2 образуется на поверхности пылинок, так как газофазные реакции для нее являются неэффективными [24]. Пылинка в реакции выступает в качестве катализатора. Изначально в плотной среде происходит абсорбция молекул из газовой фазы на поверхность пылинок. Таким образом на пылинках образуется мантия — слой "загрязненного льда", состоящий из воды, аммиака, метана и других соединений с различными примесями. Равновесная температура пылинок опеределяется балансом между поглощением ими оптического и УФ-излучения и собственным ИК-излучением. Как правило, в плотных молекулярных облаках температура пылинок близка к 10–20 К. При этих характерных температурах атомы и молекулы на их поверхности достаточно быстро преодолевают потенциальные барьеры и мигрируют по поверхности. Вследствие этой миграции образуются молекулы. Таким образом, пылинка является химическим реактором в межзвездной среде. Если при образовании молекулы выделяется энергия, способная оторвать ее от пылинки, молекула переходит в газовую фазу. Таким образом формируется, например, Н₂ [25]. Так же на поверхности пылинок формируются сложные органические молекулы: H₂CO, H₂O, CH₃OH и другие [26].

Химический состав молекулярных сгустков меняется с эволюцией облака. В холодных плотных сгустках молекулы постепенно вымерзают на пылинки, и в центральной части формируются области, обедненные молекулами. Наиболее обильная после H_2 молекула CO разрушает азотосодержащие молекулы NH₃ и N₂H⁺. Однако при уплотнении молекулярного облака температура в нем понижается, и CO вымораживается на пылинки. Вследствие этого обилие NH₃ и N₂H⁺ повышается. Таким образом, молекулы условно делятся на трассеры "ранней" (CO, CS) и "поздней"(NH₃, N₂H⁺) химии. Однако с формированием звезд ситуация меняется, так как происходит нагрев облака и ледяные мантии пылинок нагреваются и испаряются, молекулы возвращаются обратно в газовую среду. Поскольку на пылинках происходили химические реакции, химический состав облака так же меняется. Таким образом, наблюдатели видят такие объекты уже не как обедненные молекулами области, а как горячие ядра с богатым химическим составом, окруженные плотным холодным газом. Таким образом, исследуя химический состав облака, можно определить его эволюционную стадию, разделить разные этапы формирования звезд и оценить их продолжительность. Многие молекулы межзвездной среды имеют вращательные переходы, излучающие в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне, наблюдение которых доступно с Земли. Исследование этих линий позволяет с высокой точностью изучить состав облака.

Для построения химической модели нужно знать начальный химический состав облака и реакции в нем. Современные модели включают в себя сотни и тысячи химических реакций, например, модель Presta включает в себя 582 компонента и 4524 газофазных реакции [27], модель MONAKO - 662 компонента и 5693 химических реакций [28], модель Nautilus - 717 компонент и более чем 11500 реакций [29]. На скорость химических реакций влияют физические условия, такие как кинетическая температура газа и пыли, плотность газа, интенсивность поля излучения (G_0), оптическая экстинкция (A_V) и скорость ионизации космическими лучами (ζ).

Доля дейтерия как показатель возраста

В молекулярных облаках наблюдается значительное обилие дейтерированных молекул, в которых атом водорода H заменяется дейтерием D. Отношение концентрации дейтерированного изотополога к концентрации основного называют долей дейтерия, например, для пары H_2D^+ и H_3^+ доля дейтерия определяется через концентрацию как $D_{\text{frac}}(H_3^+) = N(H_2D^+)/N(H_3^+)$.

Реакция с H₂D⁺ — дейтерированным аналогом H₃⁺ происходит в условиях низких температур потому что они экзотермичны, а обратная реакция эндотермична и имеет термальный энергетический барьер 232 K [30]:

$$H_3^+ + HD \rightleftharpoons H_2D^+ + H_2 + 232K.$$

Таким образом, при низких температурах $D_{\rm frac}({\rm H}_3^+)$ постепенно повышается, затем ${\rm H}_2{\rm D}^+$ передает атом дейтерия другими молекулам (CO, H₂), что приводит к повышению доли дейтерия различных молекул. Доля дейтерия относительно водорода во Вселенной не превышает D/H ~ 10^{-5} [31], в то время как в холодных плотных молекулярных облаках доля дейтерия в различных молекулах может достигать десятков процентов [32]. Однако при повышении температуры облака доля дейтерия резко начинает падать, поскольку возрастает эффективность обратной реакции перехода D в HD [33]. Таким образом, D_{frac} позволяет разграничить холодную дозвездную стадию и появление источника нагрева в межзвездных молекулярных облаках [34; 35].

Доля дейтерия со временем меняется не одинаково для разных молекулах, так как они образуются в ходе различных реакций. Например, N₂H⁺ и HNC образуется только в газовой фазе, аммиак частично образуется на пылинках, а метанол образуется преимуществено на пылинках [36; 37]. По результатам наблюдений в статье [32] показано, что $D_{\text{frac}}(N_2\text{H}^+)$ и $D_{\text{frac}}(\text{HNC})$ меняется на порядок при нагреве облака. В массивных беззвездных ядрах $D_{\text{frac}}(N_2\text{H}^+)$ повышается до значений ~ 0.2 – 0.3, а при повышении температуры (появлении звезд) понижается до ~ 0.03 [32]. Величина $D_{\text{frac}}(\text{HCN})$ менее чувствительна к изменению температуры, поскольку разрушение DNC происходит в более медленных реакциях с ионами HCO⁺ и H⁺ [38]. $D_{\text{frac}}(\text{NH}_3)$ не меняется при нагреве облака. Таким образом, анализ значений доли дейтерия в разных молекулах позволяет разграничить разные стадии звездообразования.

Цели и задачи диссертационной работы

На сегодняшний день известно, что процесс формирования звезд происходит в плотных молекулярных сгустках газа. Ударные волны в межзвездной среде ускоряют процесс звездообразования и создают условия для образования массивных звезд [13]. Одной из возможностей для оценки стадий процесса звездообразования в молекулярных облаках является использование обилий различных молекул и т.н. метод "химических часов". Этот метод требует определения обилий (содержаний относительно водорода) молекул-трассеров "ранней", например, CS, и "поздней", например, N₂H⁺, химии в сгустках, поскольку отношение этих двух молекул очень чувствительно к температуре и плотности [39].

Цель диссертации — изучить влияние ударных волн от областей HII на процесс звездообразования в волокнах. Для исследования было выбрано ги-

гантское молекулярное облако G174+2.5, состоящее из нескольких волокон с плотными сгустками. Часть сгустков находится вблизи расширяющейся области H II.

Задачи диссертационной работы:

- 1. Провести наблюдения молекулярного облака G174+2.5 в линиях излучения молекул.
- 2. Определить плотность и температуру газа по данным наблюдений.
- 3. Определить лучевую концентрацию и относительные обилия молекул в плотных сгустках G174+2.5.
- 4. Оценить возраст сгустков методом "химических часов".
- 5. Провести сравнительный анализ физических условий и возраста сгустков, находящихся вблизи областей Н II и вдали от них.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Получены карты излучения в линиях CS(2–1), C¹⁸O(1–0), ¹³CO(1–0), N₂H⁺(1–0), HNC(1–0), HCN(1–0), NH₃(1–0) и NH₃(1,1) в плотных сгустках волокна WB 673. Получены карты лучевой концентрации CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, NH₃ и H₂, а так же обилий молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, NH₃ относительно водорода. Показано, что обилия молекул в центральных частях сгустков систематически ниже чем на периферии на 20 – 40 %.
- 2. Получены карты объемной плотности водорода и кинетической температуры газа в плотных сгустках волокна WB 673 по данным линий излучения NH₃. Плотность водорода достигает ≈ 2 · 10⁴ см⁻³, температура достигает 30 К. Так же в направлении плотных сгустков определены вращательные температуры по линиям излучения CH₃CCH. В пределах ошибок вращательные температуры CH₃CCH совпадают с кинетической температурой газа.
- 3. Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линий излучения NH₃(1,1). Аномалии указывают на сжатие сгустка WB 673 и на мелкомасштабную структуру S233-IR, которая описывается наличием неразрешенных малых сгустков размером меньше диаграммы направленности (43"), окруженных менее плотным газом.
- 4. Определены лучевые концентрации молекул NH_2D , N_2H^+ , N_2D^+ , HCO^+ , DCO^+ , HCN, DCN, HNC, DNC, CS, SO, D_2CS , $c C_3H_2$, C_2H ,

HCS⁺, CH₃CCH в направлении пиков яркости излучения пыли в направлении 12-ти сгустков гигантского молекулярного облака G174+2.5.

- 5. Получена доля дейтерия в молекулах NH₃, N₂H⁺, HCO⁺, HCN, HNC. Показано, что доля дейтерия в сгустках вокруг зоны H II систематически ниже значений в волокне в 2 - 5 раз в разных линиях.
- 6. Определен химический возраст плотных сгустков волокна WB 673. Показано, что возраст сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 одинаков и составляет t = 1-3×10⁵ лет. Следовательно, формирование волокна WB 673 согласуется с представлениями о быстром звездообразовании в гравотурбулентной модели межзвездной среды.

Научная новизна:

- Впервые построены карты лучевых концентраций и обилий молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, NH₃ в направлении плотных сгустков волокна WB 673.
- 2. Впервые определены кинетическая температура газа и объемная плотность водорода в направлении плотных сгустков волокна WB 673.
- Впервые получены лучевые концентрации молекул NH₂D, N₂H⁺, N₂D⁺, HCO⁺, DCO⁺, HCN, DCN, HNC, DNC, CS, SO, D₂CS, c - C₃H₂, C₂H, HCS⁺, CH₃CCH в направлении 12-ти сгустков гигантского молекулярного облака G174+2.5.
- 4. Впервые получена доля дейтерия молекул NH₃, N₂H⁺, HCO⁺, HCN, HNC в направлении 12-ти сгустков G174+2.5;
- 5. Впервые получен химический возраст плотных сгустков волокна WB 673: G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668.

Научная и практическая значимость: Результаты диссертации представляют интерес для специалистов в области изучения межзвездной среды и процессов звездообразования. Оценка возраста молекулярных сгустков, находящихся в различных условиях, позволяет расширить парадигму знаний о звездообразовании.

Степень достоверности: обусловлена обсуждением результатов диссертации на научных конференциях и семинарах, а так же публикацией их в рецензируемых журналах. **Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях:

- 48-я студенческая научная конференция "Физика космоса", 2019, УрФУ, Екатеринбург, Россия, устный доклад "Исследование волокнообразного темного облака WB 673";
- Конференция "Современная звездная астрономия 2019", САО, Россия, устный доклад "Астрохимическое исследование межзвездного волокна WB 673";
- 49-я студенческая научная конференция "Физика космоса", 2020, УрФУ, Екатеринбург, Россия, устный доклад "Температура газа в молекулярном волокне WB 673";
- "Звездообразование и планетообразование", 10 11 ноября 2020, НСА РАН, Россия, устный доклад "Исследование волокна WB 673 в радиолиниях аммиака";
- "Астрономия и исследование космического пространства", 1-5 февраля 2021, УрФУ, Екатеринбург, Россия, устный доклад "Исследование волокна WB 673 в радиолиниях аммиака";
- "Всероссийская астрономическая конференция 2021", 23-28 августа 2021, МГУ, Москва, Россия, устный доклад "Астрохимическое исследование плотных сгустков волокна WB 673"

Личный вклад. Автор принимал активное участие в наблюдениях на обсерватории в Эффельсберге (Германия), в обработке всех полученных данных. Автор определял физические параметры волокна WB 673 (кинетическую температуру газа и плотность водорода), лучевую концентрацию молекул NH₂D, N₂H⁺, N₂D⁺, HCO⁺, DCO⁺, HCN, DCN, HNC, DNC, CS, SO, D₂CS, c – C₃H₂, C₂H, HCS⁺, CH₃CCH в направлении плотных сгустков молекулярного облака G174+2.55. Кроме того, автор проводил химическое моделирование плотных сгустков волокна WB 673 и сравнивал результаты с наблюдательными данными. Автор принимал активное участие в обсуждении результатов. Автором диссертации был написан основной текст всех совместных работ по теме диссертации.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4—в тезисах докладов.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Обзор линий излучения молекул в межзвездном волокие WB 673 // Астрономический журнал. — 2020. — Т. 64, № 5. — С. 394-405.
- Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S., Henkel C. and Wiebe D. S. Star formation timescale in the molecular filament WB 673 // MNRAS — 2022. — submitted.
- Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S., Wiebe D. S and Punanova A. F. Chemical age of dense clumps near the HII region and far from them. - 2022. — in preparation.

Другие публикации автора по теме диссертации

- 1. Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Обзор спектральных линий молекул в центральном ядре волокна WB 673 // Сборник научных трудов ИНА-САН (Москва 2019г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2019. — С. 11–15.
- Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Исследование волокнообразного темного облака WB 673 // Физика Космоса: труды 48-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 28 01 февр. 2019г.). Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2019. Т. 1. С. 194–195.
- Рябухина О. Л., Кирсанова М. С., Виенен М., Хенкель К. Аммиак в плотных сгустках волокна WB 673 // Сборник научных трудов ИНА-САН (Москва 2020г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2020. — С. 207–209.
- Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Температура газа в молекулярном волокне WB 673 // Физика Космоса: труды 49-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 27 - 31 янв. 2020г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2020 г. — Т. 1. — С. 200–201.
- 5. Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Исследование волокна WB 673 в радиолиниях аммиака // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой (Екатеринбург, 1 - 5 февр. 2021г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2021 г. — Т. 1. — С. 174–177.
- 6. Ryabukhina O.L., Kirsanova M.S., Wiebe D.S. Astrochemical study of a dense molecular clump of WB673 filament // Astronomy at the epoch of

multimessenger studies. Proceedings of the VAK-2021 conference (Moscow, Aug 23–28, 2021). — Moscow — 2021 г. — Т. 1. — С. 180–182.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Полный объём диссертации составляет 107 страниц с 26 рисунками и 19 таблицами. Список литературы содержит 133 наименования.

Глава 1 посвящена описанию проведенных наблюдений на телескопах обсерваторий в Онсала (Швеция) и Эффельсберге (Германия). Был получен большой массив наблюдательных данных, включающий в себя линии излучения 30-ти молекул миллиметрового и сантиметрового диапазона. Выбраны методы дальнейших исследований.

В Главе 2 описаны полученные физические параметры и химическая структура плотных сгустков гигантского молекулярного облака G174+2.5: карты лучевой концентрации CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, NH₃ и H₂, а так же обилия молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, NH₃ относительно водорода; карты объемной плотности водорода и кинетической температуры газа. Описаны полученные лучевые концентрации NH₂D, N₂H⁺, N₂D⁺, HCO⁺, DCO⁺, HCN, DCN, HNC, DNC, CS, SO, D₂CS, $c - C_3H_2$, C₂H, HCS⁺, CH₃CCH в направлении пиков яркости излучения пыли 1.1 мм обзора Bolocam в направлении 12-ти сгустков G174+2.5: S235-AB, S235 East1, S235 East2, S235 Central, G173.17+2.55, G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 и WB 690. Так же в направлении сгустков AB, CE, E1, S233-IR, WB 668 и WB 673 определены вращательные температуры CH₃CCH. Получена доля дейтерия молекул NH₃, N₂H⁺, HCO⁺, HCN, HNC, HNC.

В Главе 3 приводятся результаты химического моделирования плотных сгустков волокна. Для сгустков было проведено моделирование по радиальному профилю, результаты модели сравнивались с лучевой концентрацией молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN и NH₃.

Глава 1. Наблюдения радиолиний молекул в гигантском молекулярном облаке G174+2.5 и методы исследования

1.1 Гигантское молекулярное облако G174+2.5

В диссертации исследовано гигантское молекулярное облако G174+2.5. Расстояние до облака составляет $1.56^{+0.09}_{-0.08}$ кпк по параллаксам мазерных пятен H₂O [40]. Этому комплексу принадлежат три протяженных области ионизированного водорода H II: S231, S232 и S235 (см. каталог [41]). Кроме того, имеются три компактных области H II: S235A и S235C [42–44], а также S233 [45] (далее S233). Диаметры областей S231, S232 и S235 составляют 8.0 ± 2.4 pc, 11.6 ± 3.5 и 4.7 ± 1.5 пк [46]. Область S235 была образована звездой BD+35°1201 спектрального класса O9.5V, которая ионизировала окружающий газ [47]. Наблюдения в линиях CO дают полную массу области $M = 3 - 4 \cdot 10^3 M_{\odot}$ [48]. Наиболее выраженные области звездообразования в G174+2.5 расположены вблизи областей ионизированного водорода [49].

В работе [50] на основе данных об излучении в молекулярных линиях ¹³CO были определены размеры, лучевые концентрации и массы плотных сгустков в G174+2.5. Вириальные параметры всех сгустков указывают на гравитационную неустойчивость. В работе [50] 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 [51] было показано, что вторая группа плотных сгустков образует молекулярное волокно, поскольку между сгустками есть плотный газ. Волокно содержит четыре плотных молекулярных сгустка WB 668, WB 673 [52], S233-IR [53; 54] и G173.57+2.43 [55] и названо по самому массивному из них WB 673. Волокно с западной стороны граничит с разреженной протяженной оболочкой, видимой в ИК-диапазоне. Молекулярная оболочка вблизи области Н II S235 содержит несколько сгустков: S235-Central, S235-East1, S235-East2, S235-AB [56—58]. Морфология области следующая: S235-East1 и S235-East2 располагаются на границе области S235 в картинной плоскости, S235-Central располагается в нейтральном газе позади S235 [56], S235-AB расположен южнее S235. Так же в G174+2.5 есть сгустки, нахо-



Рисунок 1.1 — Изображение гигантского молекулярного облака G174+2.5, составленное по ИК-данным WISE 22 μм (красный), 12 μм (зеленый) и 3.4 μм (синий). Бирюзовые эллипсы - исследуемые в работе газовые сгустки, выделенные в работе [50] в линиях СО, фиолетовые окружности расширяющиеся области Н II.

дящиеся на отдалении как от волокна, так и от S235: WB 690 и G173.17+2.55. Полная картина расположения объектов в облаке показана на Рис. 1.1.

В направлении плотных сгустков облака обнаружено 6 звездных скоплений: S235-Central, S235-East1, S235-East2, S235-AB [56—58], S233-IR [54; 59] и G173.57+2.43 [53; 55]. S235-Central, S235-East1, S235-East2 и S235-AB расположены вблизи области S235, а S233-IR и G173.57+2.43 принадлежат волокну WB 673. В работах [56; 60] показано, что молодые звездные скопления могут быть продуктом сценария "сбора и коллапса" ("collect-and-collapse"), в котором образование звезд нового поколения вызвано расширением области H II, которая сформирована массивной звездой предыдущего поколения. Кроме того, в среднем ИК-диапазоне аторами работы [61] по данным Spitzer-Infrared Array Camera (IRAC) выделены молодые звездные объекты (M3O): 83 M3O класса 0/I и 144 M3O класса II в комплексе S235.

В направлении S235-AB находится самое богатое звездное скопление из исследуемых областей с наибольшей звездной плотностью. S235-AB находится к югу от S235 и расположено между областью H II S235-A и отражательной туманностью S235-B. В области S235-A находится ионизующая звезда спектрального класса B0.5 и область H II [62], а в S235-B – отражательная туманность около звезды Be-Хербига S235B^{*} [63].

В направлении сгустка S233-IR находится IRAS 05358+3543 - протозвездный объект, детально исследованный за последние несколько лет [53; 59; 64— 66]. Он характеризуется квадрупольной системой истечений, где биполярная часть имеет длину ~ 1 пк. В миллиметровом континууме найдено 3 источника вблизи центра квадрупольного истечения, каждый с массой 75 – 100 M_☉ [64]. Общая светимость области и начальная функция масс указывает на раннюю стадию процесса образования массивных звезд [67]. Согласно работе [68], IRAS 05358+3543 ассоциирован с молодым скоплением возрастом ≤ 2 млн лет. Спектральный класс самого массивного объекта скопления, вероятно, находится между В2 и В1 (10 M_☉ \leq M \leq 13 M_☉). Рядом расположено молодое скопление возрастом около 3 млн лет[68]. G173.57+2.34 находится к югу от S233-IR. В нем также есть истечения [69]. В волокне WB 673, помимо упомянутых звездных скоплений S233-IR и G173.57+2.43 расположены так же молекулярные сгустки WB 673 и WB 668 [50].

В области G174+2.5 так же есть сгустки, расположенные вдали от области Н II S235 и волокна WB 673: WB 690 и G173.17+2.55. Эти сгустки обладают наименьшей плотностью из всех объектов области [50].

Во всех исследуемых сгустках наблюдаются точечные ИК-источники IRAS и MSX. Практически во всех сгустках, за исключением G173.17, наблюдаются мазерные источники. В Таб. 1 показаны ИК-источники, мазеры и истечения во всех сгустках. Мазеры воды и CH₃OH I-го класса накачиваются столкновениями и указывают на истечения; мазеры CH₃OH II-го класса наблюдаются в областях образования массивных звезд. Таким образом, все исследуемые области показывают признаки активного звездообразования, в том числе образования массивных звезд.

		1	0
Region	IRAS	MSX [70]	Мазеры и истечения
S235-AB	05375 + 3540	G173.7123+02.7014	H_2O maser 22 GHz [71]
		$G173.7215{+}02.6924$	Outflow [72; 73]
		$G173.7509{+}02.6711$	CH ₃ OH I maser $36 - 95$ GHz [74–7]
		$G173.7072 {+} 02.6941$	$CH_{3}OH II maser 132-157 GHz [77]$
		$G173.7188 {+} 2.6980$	
S235-Central	05374 + 3549	G173.6339+02.8218	H_2O maser 22 GHz [78; 79]
	05377 + 3548	$G173.6328 {+} 02.8064$	$CH_3OH I maser 36 GHz [50]$
		G173.6026+02.7946	CH_3OH II maser 6.6 GHz [80]
		G173.6098+02.8183	
		G173.6095 + 02.7733	
		G173.6137 + 02.8094	
S235-East1	05379 + 3550	G173.6909+02.8788	$CH_3OH I maser 36 GHz [50]$
		$G173.6791 {+} 02.8534$	CH_3OH II maser 6.6 GHz [81]
		G173.6822+02.8650	
		$G173.6819 {+} 02.8491$	
		G173.6910 + 02.8819	
S235-East2		G173.6515+02.8853	H_2O maser 22 GHz [82]
		G173.6243+02.8734	$CH_3OH I maser 36 GHz [50]$
		G173.6073+02.8789	$CH_{3}OH II maser 6.6 GHz [81; 83]$
G173.17	05352 + 3558		
	05354 + 3604		
G173.57	05361 + 3539	G173.5826+02.4452	H_2O maser 22 GHz [78; 82; 84; 85]
			$CH_3OH I maser 36-95 GHz [50; 86;$
			CH_3OH II maser 6.6 GHz [81; 88]
S233-IR	05358 + 3543	G173.4902+02.4577	H_2O maser 22 GHz [71]
		G173.4956+02.4218	OH maser 1665, 1667 GHz [89]
		G173.4839+02.4317	$CH_3OH I maser 36-95 GHz$ [50; 75;
		G173.4815+02.4459	$CH_3OH II maser 6.6 GHz [91; 92]$
WB 668	05335 + 3609	G172.8742+02.2687	H_2O maser 22 GHz [78; 82; 84]
			$CH_3OH I maser 36 GHz [50]$
			$CH_{3}OH II maser 6.6 GHz [81; 88]$
WB 673	05345 + 3556	G173.1862+02.3438	H_2O maser 22 GHz [82; 84]
			L / J

Таблица 1 — IRAS-источники в направлении сгустков G174+2.5

	05346 + 3559	$G173.1371 {+} 2.3855$	$CH_3OH I maser 36 GHz [50]$
	05347 + 3556		$CH_3OH II maser 6.6 GHz$ [83; 88; 93
WB 690	05380 + 3608	G173.3737+03.0346	H_2O maser 22 GHz [82; 84]
			$CH_3OH I maser 36 GHz [50]$

Таким образом, есть 3 основные группы объектов: плотные сгустки вблизи области H II S235; плотные сгустки волокна WB 673 и сгустки, расположенные вдали от области H II и волокна. Во всех объектах видны признаки звездообразования, все они являются гравитационно неустойчивыми, однако поток ИК-излучения во второй группе объектов ниже (Рис. 1.1).

1.2 Наблюдения

1.2.1 Карты линий излучения молекул в волокне WB 673

В декабре 2016 и в феврале 2017 г. был проведен обзор линий излучения молекул в волокие WB 673 на 20-м телескопе обсерватории Онсала (Швеция). Для наблюдений использовался приемник на длине волны 3 мм (85-116 GHz) [94], принимающий излучение в двух ортогональных поляризациях. 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 мазерным линиям SiO (2–1) в источниках R Cas, U Ori, χ Cyg 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 частотной модуляции с разницей частот 5 МГц. Наблюдения охватили всю площадь волокна в картинной плоскости WB 673 размером 10' × 50'. Обнаружены линии CO (1-0), N₂H⁺ (1-0), CS (2-1), HCN (1-0), HNC (1-0) и другие, показанные в Таб. 2. Значения частоты и энергии верхнего уровня E_{μ} молекул взяты из базы данных CDMS [95]. Температура приводилась из шкалы

антенной температуры $T_{\rm A}$ в шкалу температуры главного луча $T_{\rm mb}$ с помощью коэффициента эффективности главного лепестка η :

$$T_{\rm mb} = \frac{T_{\rm A}}{\eta} \tag{1.1}$$

Угловое разрешение полученных карт лежит в пределах 17-24".

Таблица 2 — Список линий, обнаруженных на телескопе Онсала в 2016-2017 г. в направлении волокна WB 673

Переход	Частота	$E_{\rm u}$
-	МΓц	Κ
1 - 0	88631.8	4.3
1 - 0	89188.5	4.3
1 - 0	90663.6	4.4
1 - 0	93173.8	4.5
2 - 1	96412.9	6.9
2 - 1	96741.4	7.0
3.2 - 2.1	97715.4	9.1
2 - 1	97980.9	7.1
3 - 2	104617.1	23.2
3.2 - 2.1	109252.2	21.1
1 - 0	109782.2	5.3
1 - 0	110201.4	5.3
	Переход - 1 - 0 1 - 0 1 - 0 1 - 0 2 - 1 3.2 - 2.1 2 - 1 3 - 2 3.2 - 2.1 1 - 0 1 - 0 1 - 0 1 - 0	ПереходЧастота-МГц1 - 088631.81 - 089188.51 - 090663.61 - 093173.82 - 196412.92 - 196741.43.2 - 2.197715.42 - 197980.93 - 2104617.13.2 - 2.1109252.21 - 0109782.21 - 0110201.4

1.2.2 Обзор радиолиний молекул 3 – 4 мм в направлении плотных сгустков облака G174+2.5

В 2019 году были проведены наблюдения с использованием приемников 3 мм (86-116 ГГц) и 4 мм (67-87 ГГц) Наблюдения проводились в направлении

на максимумы излучения холодной пыли по данным Bolocam 1.1 мм во всех плотных сгустках G174+2.5 (см. Таб. 3, координаты даны на эпоху J2000). В обзоре обнаружены линии 28 молекул (Таб. 4, для линий со сверхтонким расщеплением дана частота наиболее интенсивной компоненты). На длине волны 4 мм наблюдения велись 22 часа, на длине волны 3 мм 25 часов. Процедура калибровки и точность наведения аналогичны тем, что были описаны в разделе 1.2.1. Уровень шума (σ) лежит в пределах 0.03 – 0.05 K для приемника 4 мм и 0.1 – 0.2 K для 3 мм. Наблюдения проводились в режиме диаграммной модуляции, для более ровной базовой линии.

Таблица 3 — Координаты направлений на максимумы излучения холодной пыли по данным Bolocam 1.1 мм, в которых велись наблюдения на телескопе в Онсала в 2019 г.

Источник	Склонение	Прямое восхождение
-	h m s	o / //
S235AB	05:40:53.00	+35:41:30.0
S235 East1	05:41:29.00	+35:49:40.0
S235 East2	05:41:23.99	+35:52:30.0
S235 Central 1	05:41:07.03	+35:49:41.0
S235 Central 2	05:41:00.30	+35:49:28.0
WB668	05:36:53.00	+36:10:30.0
WB673	05:38:00.00	+35:58:30.0
S233-IR	05:39:11.00	+35:45:59.0
$G173.57 {+} 2.43$	05:39:27.00	$+35{:}40{:}50.0$
WB690	05:41:22.00	+36:09:60.0
G173.17 + 2.55	05:38:49.00	+36:03:41.0

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
Линия	Переход	Частота	$E_{\rm u}$
-	-	МΓц	Κ
DCO ⁺	1 - 0	72039.3	3.5
DCN	1 - 0	72414.9	3.5
SO_2	6 - 5	72758.2	19.2
HCCCN	8 - 7	72783.8	15.7
$\rm H_2CO$	1 - 0	72837.9	3.5
DNC	1 - 0	76305.7	3.7
CH ₃ CHO	4 - 3	76866.4	9.3
N_2D^+	1-0	77109.3	3.7
CH ₃ OH	5 - 4	84521.2	40.34
D_2CS	3 - 2	85153.9	8.2
$\mathrm{HC}^{18}\mathrm{O}^+$	1 - 0	85162.2	4.1
$c-C_3H_2$	2 - 1	85338.9	6.4
HCS^+	2 - 1	85347.9	6.1
CH ₃ CCH	5 - 4	85457.3	12.3
$\rm NH_2D$	1,1	85926.3	20.7
$\mathrm{HC}^{15}\mathrm{N}$	1 - 0	86054.9	4.1
SO	2 - 1	86093.9	19.3
SiO	2 - 1	86243.4	6.3
$\rm H^{13}CO^+$	1 - 0	86754.3	4.2
$\mathrm{HN^{13}C}$	1 - 0	87090.9	4.2
C_2H	1 - 0	87316.9	4.2
HCN	1 - 0	88631.8	4.3
$\rm HCO^+$	1 - 0	89188.5	4.3
HNC	1 - 0	90663.6	4.4
^{13}CS	2 - 1	92494.3	6.7
N_2H^+	1 - 0	93173.5	4.5
SO	3 - 2	99299.9	9.2

Таблица 4 — Список линий, обнаруженных на телескопе в Онсала в 2019 г.

1.2.3 Наблюдение радиолиний аммиака в направлении волокна WB 673

В 2019 году были проведены наблюдения инверсионных переходов аммиака NH₃ (1,1), (2,2) и (3,3) на 100-м телескопе в Эффельсберге (Германия) в направлении волокна WB 673. Частоты линий и соотвествующие энергии верхнего уровня показаны в Таб. 5. Суммарное время наблюдений (ON+OFF) составило 60 часов. Наблюдения проводились в режиме непрерывного картирования с использованием вторично-фокусного приемника диаметром 1,3 см с полосой пропускания 500 МГц, обеспечивающей спектральное разрешение 0.2 км/с. Наблюдалась та же самая площадь волокна, что и в разделе 1.2.1. Полученные карты имеют угловое разрешение 16". Наблюдения проводились в режиме переключения положения с положением OFF при α (J2000) = 05^h37^m00^s, $\delta(J2000) = +35^{\circ}30'00''$. Проверка точности наведения и фокусировка производились примерно каждый час. Температура системы T_{svs} лежала в диапазоне 100–120 К по шкале Т_А. Однако в плохих погодных условиях она возрастала до 200 К. Калибровка проводилась с использованием сканирования радиоконтинуума в направлении на планетарную туманность NGC 7027 [96] сотрудниками обсерватории в Эффельсберг.

Линия	Переход	Частота	$E_{\rm u}$
-	-	МΓц	Κ
	(1,1)	23.6945	23.4
NH_3	(2,2)	23.7226	64.9
	(3,3)	23.8701	124.5

Таблица 5 — Частоты переходов, наблюдавшихся на телескопе в Эффельсберге в 2019 г. в направлении волокна WB 673

1.2.4 Архивные данные об излучении пыли

Поскольку пыль и газ в межзвездных молекулярных облаках равномерно перемешаны, анализ излучения пыли позволяет оценить лучевую концентрацию водорода. Были взяты из обзора галактической плоскости Bolocam данные об излучении пыли в непрерывном спектре на длине волны $\lambda = 1.1$ мм [97; 98]. Этот обзор охватывает практически всю галактическую плоскость с эффективным пространственным разрешением ≈ 33 ". Как показал анализ этих данных в работе [98], источники Bolocam представляют собой относительно плотные ($\sim 10^{3.5}$ см⁻³) структуры в молекулярных облаках с угловыми размерами 0.5'-2', поэтому они подходят для анализа плотности в молекулярных сгустках. Была использована версия 2.1 этого обзора.

1.3 Методы исследования в диссертационной работе

В диссертации для определения физических условий газа и обилий различных молекул молекул было использовано предположение о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) которое выполняется в G174+2.5, согласно работе [99] Формулы, приведенные далее, соответствуют решению уравнений переноса и уравнений баланса населенности в предположении ЛТР.

1.3.1 Лучевая концентрация молекул

Обнаруженные линии молекул HCN, HNC, NH₃ и N_2H^+ обладают сверхтонким расщеплением. Для них был использован стандартный пакет CLASS [100] для одновременного приближения сверхтонких компонент в спектрах этих линий в предположении, что ширины всех компонент одинаковы, и соотношение между интенсивностью компонент зависит только от оптической толщины au. Дли линий со сверхтонким расщеплением пакет CLASS так же позволяет определить температуру возбуждения линии $T_{\rm ex}$.

Для линий молекул без сверхтонкого расщепления необходимо было определить оптическую толщину и температуру возбуждения из анализа интенсивностей изотопологов. Оптические толщины линий CS (2–1), SO (3–2), 13 CO (1–0), HCO⁺ (1–0), а так же для HCN (1–0) и HNC (1–0) были найдены из отношения интенсивностей линий с основными изотопами серы ³²S, углерода 12 C и кислорода ¹⁸O и их менее обильными изотопологами, для которых линии предполагались оптически тонкими. Анализ был проведен для следующих пар молекул: CS и C³⁴S, SO и ³⁴SO, C¹⁸O и ¹³CO, HCO⁺ и H¹³CO⁺, HCN, HC¹⁵N и HN¹³C. Для каждой пары были определены интегральные интенсивности в одинаковом диапазоне скоростей для основного изотопомера $W_{\rm m}$ и для менее обильного $W_{\rm nm}$. Таким образом, с использованием отношения обилий изотопов α :

$$\frac{W_{\rm m}}{W_{\rm nm}} = \frac{1 - \exp -\tau}{1 - \exp -\tau/\alpha}.$$
 (1.2)

Уравнение решается методом итераций. Были использованы отношения обилий изотопов $\alpha = {}^{32} \text{ S}/{}^{34}\text{S} = 23 \text{ [101]}, {}^{12}\text{C}/{}^{13}\text{C} = 80 \text{ [99]}, {}^{16}\text{O}/{}^{18}\text{O} = 557 \pm 30 \text{ и} {}^{14}\text{N}/{}^{15}\text{N}$ = 488 ± 154 [102]. Так же отношение ${}^{12}\text{C}/{}^{13}\text{C} = 80 \text{ [99]}$ было использовано для получения карт N(CO) из $N({}^{13}\text{CO})$

Была получена температура возбуждения:

$$T_{\rm ex} = \frac{T_{\rm mb}}{1 - \exp(-\tau)} + T_{\rm bg},$$
 (1.3)

где $T_{\rm mb}$ - интенсивность излучения линии, $T_{\rm bg}=2.73~{\rm K}$ - температура микроволнового фона.

Для определения лучевой концентрации в оптически тонком случае используется выражение [103]:

$$N^{\text{thin}} = \left(\frac{3h}{8\pi^3 S\mu^2}\right) \left(\frac{Q_{\text{rot}}}{g_{\text{J}}g_{\text{K}}g_{\text{I}}}\right) \frac{\exp\left(\frac{E_{\text{U}}}{kT_{\text{ex}}}\right)}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) - 1} \frac{1}{J_{\nu}(T_{\text{ex}}) - J_{\nu}(T_{\text{bg}})} \int \frac{T_{\text{mb}}dv}{f}, \quad (1.4)$$

$$J_{\nu}(T) = \frac{h\nu/k}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{ex}}\right) - 1},$$
(1.5)

где $J_{\nu}(T)$ - эквивалентная температура Рэлея-Джинса, h - постоянная Планка, $S = J_u/2J_u + 1$ - относительная сила линии, μ - дипольный матричный момент, $Q_{\rm rot}$ - статистическая сумма, $g_{\rm J} = 2J + 1$ - статистический вес, $g_{\rm K}$ - К-вырожденность, $g_{\rm I}$ - вырожденность ядерного спина, f- коэффициент заполнения диаграммы направленности телескопа. В работе было использовано значение f = 1, поскольку размеры источников больше чем диаграмма направленности. Для линейных молекул $g_{\rm K} = g_{\rm I} = 1$, $Q_{\rm rot} = \frac{kT}{hB} + \frac{1}{3}$, и Q примет вид $Q = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\pi}{ABC}} \left(\frac{kT}{h}\right)^3$, где A, B, C - вращательные постоянные, а σ - номер вращательной симметрии. В диссертации рассчитывались лучевые концентрации для более чем 10 молекул, из которых большая часть является симметричными роторами, и только NH₂D и D₂CS, с-C₃H₂ - ассиметричные роторы. Дипольные матричные моменты и вращательные постоянные для молекул взяты из базы данных CDMS [95] и приведены в Таб. 6.

Для оптически толстых линий учет τ происходит следующим образом [103]:

$$N = N^{\text{thin}} \frac{\tau}{1 - \exp(-\tau)}.$$
(1.6)

Поскольку на длинах волн 3–4 мм, которые используются в этой работе, наблюдается только орто-аммиак, значение лучевой концентрации аммиака будет недооценено [104]. Отношение орто/пара дейтерированного аммиака о/pNH₂D составляет 3/1. Соответственно, чтобы получить полное значение лучевой концентрации дейтерированного аммиака, включающее в себя орто- и пара- формы, полученное значение нужно умножить на коэффициент 1.3.

1.3.2 Анализ линий излучения аммиака

Нижние метастабильные энергетические состояния аммиака возбуждаются только столкновениями, поэтому они широко используются для измерения температуры холодного газа в межзвезднной среде. Для холодного плотного молекулярного газа возбуждение линий аммиака хорошо описывается ЛТР. Линия перехода (1,1) молекулы NH₃ вследствие взаимодействия квадрупольного

Молекула	А	В	С	μ	E_{u}
	МΓц	МΓц	МΓц	Дб	Κ
¹³ CO	-	55101.01	-	0.11	5.29
CS	-	24495.56	-	1.96	7.05
N_2H^+	-	46586.88	-	3.37	4.47
$\overline{N_2D^+}$	-	38554.74	-	3.37	3.70
HCN	-	44315.97	-	2.98	4.25
DCN	-	36207.46	-	2.99	3.48
HNC	-	45331.98	-	3.05	4.35
DNC	-	38152.99	-	3.05	3.66
HCO+	-	44677.15	-	3.89	4.28
DCO ⁺	-	36019.76	-	3.89	3.46
D_2CS	146399.	14904.27	13495.85	1.66	8.18
^{13}CS	-	23123.85	-	1.96	6.66
SO	-	21523.556	-	1.54	9.23
$\overline{\mathrm{HCS}^+}$	-	21337.14	-	1.96	6.14
C_2H	-	43674.52	-	0.77	4.19
NH ₂ D	290077.0	192176.5	140808.0	1.46	20.68
$c-C_3H_2$	35092.6	32212.8	16749.1	3.43	6.45

Таблица 6 — Константы для вычисления лучевой концентрации



Рисунок 1.2 — Схема, показывающая квадрупольное и магнитное сверхтонкое расщепление спектра NH₃ (1,1) (взято из работы [105])

момента с электрическим полем электронов расщепляется на 18 сверхтонких компонент (см. Рис. 1.2), однако в областях образования массивных звезд они сливаются и образуют 5 групп.

Для оценки оптической толщины линии (J,K) = (1,1) и температуры возбуждения $T_{\rm ex}$ был использован пакет CLASS. Этот метод предполагает гауссову форму линии в оптически тонком случае и одинаковые температуры возбуждения для всех сверхтонких компонент. Для перехода (1,1) оптическая толщина главной (центральной из пяти) группы сверхтонкой компоненты $\tau_{(1,1)m}$ связана с полной оптической толщиной всего мультиплета как $\tau_{(1,1)m} = \tau_{(1,1)}/2$ [106].

Используя формулу Больцмана для населенностей уровней (1,1) и (2,2) мы можем найти вращательную температуру, которая является показателем относительной заселенности этих двух уровней [107]:

$$T_{\rm rot} = -41.5 \ln \left(\frac{-0.282}{\tau_{(1,1)\rm{m}}} \ln \left(1 - \frac{T_{\rm mb(2,2)}}{T_{\rm mb(1,1)}} (1 - \exp(-\tau_{(1,1)\rm{m}})) \right) \right)^{-1} (\rm{K}), \quad (1.7)$$

где $T_{\mathrm{m}b(1,1)}$ и $T_{\mathrm{m}b(2,2)}$ – интенсивности главных компонент линий (1,1) и (2,2) соответственно. В тех пикселях, где интенсивность линии слишком слабая $(T_{\mathrm{m}b(2,2)} < 3\sigma)$, было использовано значение $T_{\mathrm{rot}} = 10$ K.

В тех направлениях, где $\tau_{(1,1)m} \ll 1$, либо сателлитные компоненты не видны, линия (1,1) принималась оптически тонкой. В этом случае $T_{\rm rot}$ и $N_{1,1}$ определяются в оптически тонком приближении:

$$T_{\rm rot} = -41.5/\ln\left(0.2\frac{\int T_{\rm mb(2,2)}dV}{\int T_{\rm mb(1,1)}dV}\right) (\rm K), \qquad (1.8)$$

где $\int T_{\mathrm{m}b(2,2)} dv$ и $\int T_{\mathrm{m}b(1,1)} dv$ – интегральная интенсивность линий (2,2) и (1,1) соответственно. Значение лучевой концентрации аммиака, излучающего в линии (1,1) $N_{1,1}$ определяется согласно [106]:

$$N_{1,1} = 6.6 \times 10^{14} \frac{T_{\text{rot}}}{\nu_{(1,1)}} \tau_{(1,1)m} \Delta V_{(1,1)} (\text{cm}^{-2}), \qquad (1.9)$$

где $\nu_{(1,1)}$ – частота перехода NH₃ (1,1) в ГГц, а $\Delta V_{(1,1)}$ ширина линии в км/с. В оптически тонком приближении:

$$N_{1,1} = 3.3 \times 10^{14} \frac{T_{\rm rot}}{\nu_{(1,1)}} \frac{\int T_{\rm mb(1,1)} dV}{J(T_{\rm rot}) - J(T_{\rm bg})} ({\rm cm}^{-2}).$$
(1.10)

Полная лучевая концентрация определяется по четырем самым низким метастабильным энергетическим уровням как:

$$N_{\rm NH_3} = N_{1,1} \left(\frac{\exp(21.3/T_{\rm rot})}{3} + 1 + \frac{5\exp(-41.2/T_{\rm rot})}{3} + \frac{14\exp(-99.4/T_{\rm rot})}{3} \right) (\rm cm^{-2}).$$
(1.11)

С помощью $T_{\rm rot}$ можно получить кинетическую температуру газа [108; 109]:

$$T_{\rm kin} = \frac{T_{\rm rot}}{1 - \frac{T_{\rm rot}}{41.5}\ln(1 + 1.1\exp(\frac{-16}{T_{\rm rot}}))} (\rm K).$$
(1.12)

где 41.5 К – энергетическая щель между уровнями (1,1) и (2,2).

Используя полученные температуры T_{ex} и T_{kin} , мы можем получить плотность водорода $n(\text{H}_2)$ [107]:

$$n(\mathrm{H}_2) = \frac{A}{C} \frac{J(T_{\mathrm{ex}}) - J(T_{\mathrm{bg}})}{J(T_{\mathrm{kin}}) - J(T_{\mathrm{ex}})} \left[1 + \frac{J(T_{\mathrm{kin}})}{h\nu/k} \right] (\mathrm{cm}^{-3}), \qquad (1.13)$$

где A и C – коэффициент Эйнштейна и столкновительный коэффициент, соответственно. Согласно [110], для типичной для межзвездных молекулярных облаков $T_{\rm kin} = 25$ K эти коэффициенты равны $A = 1.7 \times 10^{-7}$ с⁻¹ и $C = 8.6 \times 10^{-11}$ см³с⁻¹.

В условиях ЛТР и без градиента лучевой скорости две внутренние сателлитные линии и две внешние сателлитные линии (1,1) молекулы NH₃ имеют одинаковую интенсивность. Однако иногда в молекулярных облаках наблюдаются аномалии яркости сверхтонких компонент [111—113]. Обозначим внутренние (inner) компоненты красного и синего смещения как $T_{\text{in,r}}$ и $T_{\text{in,b}}$, а внешние (outer) $T_{\text{out,r}}$ и $T_{\text{out,b}}$. Тогда показатели аномалий для внутренних и внешних компонент будут рассчитываться как $A_{\text{IS}} = T_{\text{in,r}}/T_{\text{in,b}}$ и $A_{\text{OS}} = T_{\text{out,r}}/T_{\text{out,b}}$. Отношение $A_{\text{OS}} = A_{\text{IS}} = 1$ означает отсутствие аномалий. Случай $A_{\text{OS}} > 1$ и $A_{\text{IS}} < 1$, рассмотренный в работе [111], может быть описан моделью, в которой молекулярное облако может состоять из неразрешенных малых сгустков размером меньше диаграммы направленности телескопа, окруженных менее плотным газом. На градиент скорости по лучу зрения указывает комбинация аномалий $A_{\text{OS}} > 1$ и $A_{\text{IS}} > 1$ и $A_{\text{IS}} > 1$ (расширение) или $A_{\text{OS}} < 1$ and $A_{\text{IS}} < 1$ (сжатие) [112; 114; 115].

1.3.3 Вращательные диаграммы CH₃CCH

В случае, когда проведены наблюдения нескольких линий одной и той же молекулы, возможно построить вращательную диаграмму. Полная лучевая концентрация $N_{\rm tot}$ связана с лучевой концентрацией уровня и посредством стат суммы $Q_{\rm rot}$ [103]:

$$\frac{N_{\rm u}}{N_{\rm tot}} = \frac{g_{\rm u}g_{\rm I}g_{\rm K}}{Q_{\rm rot}} \exp\left(-\frac{E_{\rm u}}{kT_{\rm ex}}\right),\tag{1.14}$$

а лучевая концентрация $N_{\rm u}$ в оптически тонком случае определяется из интегральной интенсивности линий:

$$\frac{N_{\rm u}}{g_{\rm u}} = \frac{3k \int T_{\rm mb(1,1)} dV}{8\pi^3 \nu S \mu^2 g_{\rm I} g_{\rm K}}.$$
(1.15)

Объединяя выражения 1.14 и 1.15, получаем главную формулу для вращательных диаграмм [116]:

$$\ln\frac{N_{\rm u}}{g_{\rm u}} = \ln\frac{g_{\rm u}g_{\rm I}g_{\rm K}}{Q_{\rm rot}}\exp\left(-\frac{E_{\rm u}}{kT_{\rm ex}}\right) = \ln\frac{N}{Q_{\rm rot}} - \frac{E_{\rm U}}{kT_{\rm rot}}.$$
(1.16)

График зависимости величины $\ln \frac{N_u}{g_u}$ от от $\frac{E_U}{k}$ называется вращательной диаграммой. Для графика точки, соответствующие разным линиям, должны ложиться на прямую, тангенс угла наклона которой обратно пропорционален вращательной температуре с отрицательным знаком $(\tan(\alpha) \sim -T_{\rm rot})$, а ордината точки пересечения с осью Y равна значению $\ln(Q)$.

СН₃ССН является хорошим индикатором температуры газа в плотных молекулярных облаках [117]. Статистическая сумма для него [118]:

$$Q = \frac{5.34 \cdot 10^6}{\sigma} \left[\frac{T^3}{B^2 A} \right]^{1/2} = 0.523 \cdot T^{3/2}$$
(1.17)

Таблица 7 — Частота и энергия уровней сверхтонкой структуры CH₃CCH J = 5–4, K = 0, 1, 2, 3.

K	Частота, ГГц	$E_{\rm u},{\rm K}$
3	85442.600	76.55265
2	85450.765	41.21012
1	85455.665	19.44279
0	85457.299	12.30399

1.3.4 Анализ данных Bolocam

Для определения лучевой концентрации водорода $N(H_2)$ по данным Bolocam был использован подход, предложенный в работе [119]: для каждого пикселя карты излучения пыли считалось, что излучение создается одинаковыми по размеру и свойствам пылинками с температурой T_d (см. также [97]). Излучение пыли на длине волны 1.1 мм является оптически тонким. Тогда для каждого пикселя масса пыли:

$$M = \frac{10^{-23} S_{1,1} D^2}{k_{1,1} B_{1,1}(T_d)} (r p^{-2}), \qquad (1.18)$$

где $B_{1,1}(T_{\rm d})$ - функция Планка для принятой температуры пыли $T_{\rm d}$ в единицах $m C\Gamma C, \ k_{1,1} = 0.0114 \
m cm^2/
m r$ - непрозрачность пыли, в этом значении уже учтено, что отношение массы газа к массе пыли в молекулярных облаках равно 100 $[120-122], S_{1,1}$ - плотность потока на длине волны 1.1 мм, D - расстояние до объекта [см], соответствующее 1.6 к
пк [40], коэффициент 10^{-23} используется для перевода плотности потока из единиц СГС в Янские для Bolocam. Так как в архивных fits-файлах обзора Bolocam данные записаны в единицах [Янские/диаграмма направленности], т.е. в каждом пикселе плотность потока S_{1.1} проинтегрирована по всей площади диаграммы направленности телескопа, то и масса М является в этом смысле величиной интегральной. Для того, чтобы получить значение лучевой концентрации молекулярного водорода $N({\rm H}_2)$ в единицах [см⁻²], необходимо учесть 1) среднюю молекулярную массу $\mu_{\rm H_2} = 2.8$ в единицах массы атома водорода; также учесть вклад гелия и металлов (вклад атомарного водорода несущественный [123]), 2) массу атома водорода $m_{\rm H} = 1.66053 \cdot 10^{24}$ г и 3) площадь, которую охватывает диаграмма направленности в картинной плоскости на расстоянии объекта $S = \pi (tg(FWHM/4 \ln 2/206265)D)^2 \text{ см}^2$, где FWHM = 33" - размер диаграммы направленности в угловых секундах:

$$N(H_2) = \frac{M}{S\mu_{H_2}m_H} (cM^{-2}).$$
(1.19)

Неопределенности калибровки данных обзора Bolocam лежат в пределе 20 – 30% [97].

Резюме

Глава 1 посвящена описанию проведенных наблюдений на телескопах обсерваторий в Онсала (Швеция) и Эффельсберг (Германия). Был получен большой массив наблюдательных данных, включающий в себя линии излучения 30-ти молекул миллиметрового и сантиметрового диапазона. Определены методы дальнейших исследований.

Результаты главы представлены в статье [Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Обзор линий излучения молекул в межзвездном волокие WB 673 // Астрономический журнал. — 2020. — Т. 64, N^o 5. — С. 394-405.]

Глава 2. Структура и физические условия в областях звездообразования G174+2.5

В Главе 1 были получены карты в линиях молекул CS, CO, N₂H⁺, HCN, HNC и NH₃ для сгустков волокна WB 673, что позволяет получить полную картину распределения физических условий и химического состава. Для всех плотных сгустков гигантского молекулярного облака G174+2.5 проведен обзор радиолиний молекул 3 – 4 мм в направлениях наибольшей интенсивности излучения пыли 1.1 мм по данным Bolocam. Карты излучения в линиях аммиака, а так же физические условия в направлении сгустков вблизи S235 были взяты из работы [57].

С использованием этих данных в Главе 2 будут получены лучевые концентрации и относительные обилия различных молекул в гигантском молекулярном облаке G174+2.5, кинетическая температура газа, плотность водорода и доля дейтерия.

2.1 Карты излучения молекул в молекулярном волокне WB 673

Карты интегральной интенсивности линий CS (2–1), C¹⁸O (1–0), ¹³CO (1–0), N₂H⁺ (1–0), HNC (1–0) и HCN (1–0) показаны на Рис. 2.1, где черные контуры — уровни излучения пыли в полосе 1.1 мм (Bolocam), где внешний контур соответствует уровню отношения сигнал/шум \approx 3, а внутренние показывают ~ 35% и ~ 65% от уровня максимальной интенсивности в каждом из сгустков отдельно. В Таб. 8 приведены уровни лучевой концентрации водорода в сгустках. На уровне 3 σ (Bolocam) лучевая концентрация водорода составляет 7.2 ·10²¹ см⁻². Видно, что пики излучения в линиях молекул, в основном, совпадают с пиками излучения пыли на длине волны 1.1 мм. Излучение линий C¹⁸O (1–0) и ¹³CO (1–0) во всех сгустках распределено равномерно, без ярко выраженного контраста, например интегральная интенсивность ¹³CO (1–0) в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43 лежит в пределах 25-35 K км/с, а в центральных сгустках в пределах 30-55 K км/с. Интегральная интенсивность
$\rm C^{18}O~(1-0)$ лежит в пределах 3-5 K км/с в периферийных сгустках и 3-7 K км/с в центральных. Это соответствует теории: линии C¹⁸O (1-0) и $^{13}\rm CO~(1-0)$ имеют низкую критическую плотность и переходят в насыщение в плотных регионах.

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

Таблица 8 — Уровни лучевой концентрации водорода в сгустках волокна WB 673, см $^{-2}$

Методом, описанным в Главе 1, найдены лучевые концентрации молекул CS, CO, N_2H^+ , HCN, HNC в сгустках волокна WB 673. Так же были получены карты лучевой концентрации водорода ($N(H_2)$) по данным Bolocam.

Карты $N(H_2)$ вместе с лучевыми концентрациями других молекул показаны на Рис. 2.2. 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_2H^+ (1–0). Также все карты лучевых концентраций были приведены к одной и той же координатной сетке.

В сгустке WB 673 пики N(CS), N(CO), $N(N_2H^+)$, N(HCN) и N(HNC) находятся в центральной части сгустка, также виден вторичный максимум N(CO)в северо-восточной части сгустка, где расположены ИК-источники. В остальных сгустках пики лучевой концентрации молекул совпадают с контурами Bolocam.

На Рис. 2.3 показаны карты относительных обилий молекул $X_i = N_i/N_i(H_2)$ в сгустках. Предварительно со всех карт излучения молекул и пыли были удалены пиксели, в которых отношение сигнал/шум было меньше 3, чтобы удалить ненадежные данные. Затем были получены обилия молекул путем деления лучевых концентраций молекул и $N(H_2)$ 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 $N(H_2)$, за исключением обилий N_2H^+ в центральном сгустке WB 673 и в южном G173.57+2.43. В них максимумы $X(N_2H^+)$ находятся в юго-западных частях сгустков, и виден плавный градиент величины $X(N_2H^+)$ в направлении



Рисунок 2.1 — Интегральная интенсивность линий молекул CS(2–1), C¹⁸O(1–0), ¹³CO(1–0), N₂H⁺(1–0), HNC(1–0) и HCN(1–0) 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 отношения сигнал/шум ≈ 3, а внутренние показывают ~ 35% и ~ 65% от максимальной интенсивности, черный круг в левом нижнем углу - диаграмма направленности телескопа.



Рисунок 2.2 — Лучевая концентрация молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN, H_2 в центральном сгустке WB 673 и трех крайних. Обозначения как на Рис. 2.2

с северо-востока к юго-западу, а в сгустке WB 668 наблюдается противоположный градиент величины $X(N_2H^+)$. Во всех сгустках максимум обилия N_2H^+ находится в области с пониженным обилием CO, что хорошо согласуется с теорией: молекулы CO быстро разрушают N_2H^+ , и после вымерзания CO на пыль повышается обилие N_2H^+ [39].

Чтобы сравнить результаты Главы 2 с результатами других работ, проведен сравнительный анализ наблюдений с данными излучения пыли на 30-м телескопе IRAM [124]. Максимальное значение лучевой концентрации водорода в направлении источника IRAS 05358+3543 в сгустке S233-IR составляет $5.8 \cdot 10^{23}$ см⁻², для трех менее плотных пиков лучевая концентрация лежит в пределах $(1.1 - 1.8) \cdot 10^{23}$ см⁻². Согласно расчетам по данным Bolocam, максимальная лучевая концентрация в сгустке S233-IR равна $2.0 \cdot 10^{23}$ см⁻². Также в работе [124] определена лучевая концентрация CS в направлении на пик плотности, $(1.7 - 10) \cdot 10^{14}$ см⁻², которая в пределах ошибок согласуется с концентрацией, полученной в диссертации $(3.1 \cdot 10^{14}$ см⁻²).

Молекула	WB 668	WB 673	S233-IR	G173.57 + 2.43
CS	$7.0 \cdot 10^{-9}$	$7.8 \cdot 10^{-9}$	$6.6 \cdot 10^{-9}$	$4.8 \cdot 10^{-9}$
CO	$2.7 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$1.5\cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$
N_2H^+	$3.8 \cdot 10^{-10}$	$4.3 \cdot 10^{-10}$	-	$3.6 \cdot 10^{-10}$
HCN	-	$1.2 \cdot 10^{-9}$	-	-
HNC	-	$8.3 \cdot 10^{-10}$	-	-

Таблица 9 — Обилия молекул, усредненные по сгусткам волокна WB 673

2.1.1 Линии излучения молекул в центральном сгустке WB 673

Благодаря широкой полосе приема были зарегистрированы линии HCO⁺ (1–0), HCCCN (13–12), C³⁴S (2–1), CH₃OH (2–1), SO (3,2–2,1) и ³⁴SO (3,2–2,1). Параметры линий в направлении на пик лучевой концентрации CS, найденный в работе [51] (α (J2000) = 05^h38^m00^s.0, δ (J2000) = 35°59′17.0″) в центральном сгустке WB 673 показаны в Таб. 10, где W – интегральная ин-



Рисунок 2.3 — Обилия молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, H₂ в плотных сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1



центрального сгустка WB 673. Красной линией показано приближение спектров гауссовыми функциями

тенсивность, $T_{\rm mb}$ – яркостная температура пика в шкале главного луча, ΔV – пирина линии, V – лучевая скорость пика спектральной линии. В скобках указана ошибка гауссова приближения. Спектры обнаруженных линий показаны на Рис. 2.4. Для спектров SO (3.2–2.1), ³⁴SO (3.2–2.1), HCCCN (13–12), C³⁴S (2–1) проведена процедура усреднения по 3 каналам чтобы улучшить сигнал/шум. В спектрах ¹³CO (1–0), CS (2–1) и HNC (1–0) видно небольшое красное крыло, а в спектре HCO⁺ (1–0) — синее. Оптическая толщина линии CS (2–1) составляет 3.4, линии SO (3.2–2.1) — 17.6, линии ¹³CO (1–0) — 0.4. Лучевые концентрации и относительные обилия в направлении пика излучения CS (2–1) плотного сгустка WB 673 показаны в Таб. 11. Ошибка определения лучевых концентраций молекул не превышает 10%, ошибка определения обилий – 50%.

Линия	W	$T_{ m mb}$	ΔV	V
-	К км/с	Κ	км/с	км/с
	0.8(0.2)	0.4(0.2)	1.7(0.4)	-26.3 (0.2)
HCN	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^+	14.6(0.4)	5.1(0.1)	2.7(0.1)	-20.1 (0.03)
HNC	9.0(0.4)	3.0(0.1)	2.8(0.1)	-19.6 (0.02)
	1.5 (0.1)	0.7~(0.1)	2.3(0.1)	-28.0 (0.1)
N_2H^+	6.9(0.7)	2.5(0.1)	2.7(0.04)	-19.6 (0.02)
	3.7(0.1)	1.5(0.1)	2.3(0.06)	-13.9 (0.03)
$C^{34}S$	1.7 (0.3)	0.7~(0.2)	2.1 (0.4)	-19.2(0.2)
	0.6 (0.2)	0.5~(0.3)	1.2(0.4)	-29.7 (0.1)
CH ₃ OH	5.8(0.3)	$2.1 \ (0.3)$	2.6(0.2)	-19.2(0.1)
	4.0(0.3)	1.7 (0.3)	2.2(0.2)	-12.9 (0.04)
^{34}SO	0.6 (0.1)	$0.2 \ (0.03)$	2.8(0.3)	-21.0 (0.2)
CS	17.2 (0.2)	5.1(0.1)	3.2(0.03)	-19.8 (0.01)
H_2CS	0.8(0.1)	0.4(0.1)	1.9(0.5)	-18.9 (0.2)
SO	1.2 (0.2)	0.4(0.1)	3.2(0.7)	-19.1 (0.3)
$C^{18}O$	6.6(0.2)	1.9(0.2)	3.3(0.1)	-19.3 (0.1)
HCCCN	0.7(0.1)	0.5(0.1)	1.3(0.2)	-18.7 (0.1)
¹³ CO	54.2(0.5)	13.2 (0.3)	3.9 (0.04)	-19.4 (0.03)

Таблица 10 — Линии, отождествленные в центральном сгустке WB 673

Таблица 11 — Лучевые концентрации и относительные обилия молекул CO, N_2H^+ , HCN, HNC, CS, SO, HCCCN в направлении пика излучения CS (2–1) в сгустке WB 673

Молекула	N	$N/N({ m H_2})$
-	M^{-2}	-
СО	$5.12 \cdot 10^{18}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
N_2H^+	$1.6 \cdot 10^{13}$	$3.4 \cdot 10^{-10}$
HCN	$1.7 \cdot 10^{13}$	$3.6 \cdot 10^{-10}$
HNC	$1.6 \cdot 10^{13}$	$3.4 \cdot 10^{-10}$
CS	$2.8 \cdot 10^{14}$	$2.9 \cdot 10^{-9}$
SO	$2.5 \cdot 10^{14}$	$5.3 \cdot 10^{-9}$
HCCCN	$5.8 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{-10}$

Резюме анализа карт излучения молекул в молекулярном волокне WB 673

По результатам наблюдений на телескопе в Онсала в 2016-2017 гг. были получены карты линий излучения молекул в волокне WB 673, для которых выделены следующие результаты:

- 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, N₂H⁺, HNC) определены параметры всех видимых компонентов;
- Построены карты интегральных интенсивностей излучения молекул в линиях CS (2–1), C¹⁸O (1–0), ¹³CO (1–0), N₂H⁺ (1–0), HNC (1–0) и 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 N₂H⁺ 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.

2.2 Анализ излучения в линиях аммиака в волокне WB 673

2.2.1 Параметры излучения в линиях аммиака

Так же как и молекулы CS и N₂H⁺, излучение которых рассматривалось в разделе 2.1, аммиак является трассером плотного газа. Критическая плотность возбуждения линий аммиака довольно высока: $n_{\rm crit} = 1.8 \times 10^3$ см⁻³ для $T_{\rm kin} = 20$ K [125]. Поэтому линии аммиака показывают наиболее плотные области сгустков. Кроме этого, аммиак является трассером температуры газа, поскольку нижние метастабильные уровни аммиака возбуждаются посредством столкновений [109]. В следующем разделе будут приведены результаты обработки наблюдений излучения в линиях аммиака.



Рисунок 2.5 — Карты интегральной интенсивности линий NH₃ (1,1) и (2,2) в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1.

Карты интегральной интенсивности линий NH₃ (1,1) и (2,2) в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 показаны на Рис. 2.5. Контуры, как и на предыдущих рисунках, показывают уровни излучения пыли по данным Bolocam 1.1 мм. Интегральная интенсивность аммиака увеличивается в центрах сгустков. Наибольшая интенсивность достигается в сгустках WB 673 и S233-IR, где пиковые интенсивности линий (1,1) и (2,2) достигают 18 K км/с и 5 K км/с соответственно. В сгустках WB 668 и G173.57+2.43 линии аммиака слабее, с пиковыми интенсивностями 8 K км/с и 2,5 K км/с для линий (1,1) и (2,2) соответственно. Пики излучения аммиака совпадают с положением источников IRAS во всех наблюдаемых сгустках, кроме WB 673, где IRAS-источники расположены на периферии сгустка.



Рисунок 2.6 — Карта лучевой скорости V_{LSR} и ширины линии ΔV NH₃ (1,1) в плотных сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1.

По сгусткам наблюдаются градиенты лучевой скорости $V_{\rm LSR}$ линии NH₃(1,1). Карты $V_{\rm LSR}$ и ширины линии ΔV показаны на Рис. 2.6. На карте видно, что в сгустке WB 673 наблюдается значительный градиент скорости в направлении север-восток и запад-юг от более высоких значений (-17 км/с) к более низким (-20 км/с). Градиенты скорости в других сгустках менее существенны. Ширина линии повышается до значений ~ 3 км/с на периферии центральных сгустков WB 673 и S233-IR, в сгустках WB 668 и G173.57+2.43 ширина лежит в пределах 1.5–2 км/с.



Рисунок 2.7 — Линии аммиака в пиках излучения плотных сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Красные линии показывают Гауссовы профили.

Примеры линий излучения NH₃ (1,1), (2,2) и (3,3) в пиках излучения линии NH₃ (1,1) показаны на Рис. 2.7. Спектральное разрешение линий (1,1) и (2,2) составляет 0.2 км/с, спектр линии (3,3) был сглажен до разрешения 0.4 км/с. Пять групп компонент сверхтонкой структуры видны в спектре линии (1,1), в линиях (2,2) и (3,3) сателлитные компоненты не обнаруживаются, а в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43 не обнаруживается линия (3,3).

Параметры приближения линии Гауссовой функцией показаны в Таб. 12, где $\tau_{(1,1)}$ – общая оптическая толщина мультиплета (1,1), $T_{\rm MB}$ и ΔV - интенсивность излучения и ширина линий (1,1), (2,2) и (3,3). Ширина линии во всех направлениях включает тепловую и нетепловую составляющую. Тепловая ширина линии составляет 0.22 км/с для температуры газа T = 20 K (см. ниже), а наблюдаемая ширина линии составляет ~1.1 км/с в сгустке G173.57+2.43 и ≈ 2.0 км/с в остальных сгустках. Следовательно, присутствует нетепловая составляющая.

Оптическая толщина линии (1,1) во всех сгустках не превышает значения 2, средние значения по пикселям на картах составляют $\tau_{(1,1)} \approx 0.8$ в цен-

Параметр	WB 668	WB 673	S233-IR	G173.57+2.43
$\overline{\alpha_{2000}}$, h m s	$5 \ 36 \ 53$	5 38 01	5 39 12	5 39 27
$\delta_{2000},$ o / //	$+36 \ 10 \ 37$	+35 58 55	$+35 \ 45 \ 53$	$+35 \ 40 \ 35$
au(1,1)	1.4(0.3)	1.1 (0.2)	0.8(0.2)	0.8~(0.3)
$T_{\rm MB}(1,1), { m K}$	2.7(0.3)	2.8(0.2)	3.7(0.2)	2.5(0.2)
riangle V(1,1), км/с	1.6(0.1)	2.0(0.1)	2.0(0.1)	1.1 (0.2)
$T_{\rm MB}(2,2), {\rm K}$	1.3(0.3)	0.9(0.2)	2.1 (0.2)	0.9(0.2)
riangle V(2,2), км/с	1.1 (0.1)	2.1 (0.2)	2.1 (0.1)	1.9(0.4)
$T_{\rm MB}(3,3), {\rm K}$	-	0.3(0.1)	1.1 (0.2)	-
$\Delta V(3,3),$ км/с	-	2.2(0.6)	1.7(0.2)	

Таблица 12 — Параметры линий в направлении на пики интегральной интенсивности NH_3 (1,1)

тральных сгустках WB 673 и S233-IR и достигают $\tau_{(1,1)}\approx 1.8$ в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43.



2.2.2 Физические условия газа

Рисунок 2.8 — Карты лучевой концентрации аммиака (сверху), кинетической температуры газа (середина сверху), обилия NH₃ (середина снизу) и плотности водорода (снизу) в сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1

Карты лучевой концентрации аммиака $(N_{\rm NH_3})$, кинетической температуры газа $(T_{\rm kin})$, относительного обилия аммиака $(X_{\rm NH_3})$ и объемной плотности водорода $(n_{\rm H_2})$ показаны на Рис. 2.8. Пик $N_{\rm NH_3}$ соответствует пику излучения

пыли на 1.1 мм. Максимальное значение $N_{\rm NH_3} = (1-2) \cdot 10^{15}$ см⁻² в сгустках WB 668, WB 673 и S233-IR.

Кинетическая температура газа лежит в пределах 20–30 К. Наиболее высокая температура $T_{\rm kin} \approx 30$ К найдена в центральной части сгустка S233-IR. Температура $T_{\rm kin} \approx 18 - 22$ К наблюдается по всей площади сгустков WB 668 и WB 673. В G173.57+2.43, умеренно холодная средняя часть $T_{\rm kin} \approx 18$ К окружена более теплой оболочкой $T_{\rm kin} \approx 26$ К. Таким образом, в четырех исследованных сгустках обнаружены разные условия: холодное ядро с теплой оболочкой (G173.57+2.43), теплое ядро с холодной оболочкой (S233-IR) или примерно равное распределение температуры по поверхности сгустка в WB 668 и WB 673. Средние ошибки определения температуры составляют 12%, 6%, 10% и 16% в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 соответственно.

 $X_{\rm NH_3}$ уменьшается на порядок величины в центральной наиболее плотной части сгустков WB 673 и S233-IR относительно их окраин. Маскимальное значение $X_{\rm NH_3} = 2 \cdot 10^{-7}$ найдено в северной части сгустка WB 673, где обилие уменьшается до $2 \cdot 10^{-8}$ в пике излучения пыли. Минимальное обилие $\approx 1 - 2 \cdot 10^{-8}$ в центре сгустка S233-IR, на периферии которого обилие достигает $8 \cdot 10^{-8}$. Обилие меняется по направлениях север-юг и запад-восток с 0.2 до $1 \cdot 10^{-7}$ в сгустках WB 668 и G173.57+2.43 без уменьшения в центральной части. Наиболее низкое значение $x_{\rm NH_3}$ найдено в наиболее теплой части сгустка S233-IR. Других значимых трендов соответствия между параметрами $N_{\rm NH_3}$, $T_{\rm kin}$ и $X_{\rm NH_3}$ в исследуемых сгустках не наблюдается.

Плотность водорода достигает $2 \cdot 10^4$ см⁻³ в двух центральных сгустках: WB 673 и S233-IR, в периферийных сгустках плотности ниже в 1.5-2 раза. Пик плотности в WB 673 соответствует максимуму излучения пыли Bolocam 1.1 мм, а в сгустке S233-IR пик смещен к югу относительно пика излучения пыли на ~36", что соответствует размеру диаграммы направленности. Пики плотности газа совпадают с пиками излучения пыли и расположением ИК-источников в двух периферийных сгустках.



Рисунок 2.9 — Аномалии сверхтонкой структуры в плотных сгустках волокна WB 673.

2.2.3 Аномалии сверхтонкой структуры аммиака

Для анализа аномалий сверхтонкой структуры аммиака были построены диаграммы рассеяния $A_{\rm IS}$ и $A_{\rm OS}$, см. Рис. 2.9. Прерывистые линии делят диаграмму на четыре отдельных квадранта, в которые соответствуют разным моделям (см. п. 1.3.2).

Большинство значений $A_{\rm IS}$ и $A_{\rm OS}$ сгустка WB 673 соответствуют модели локального градиента скорости, показывающей сжатие сгустка (левый нижний квадрант) [112]. Для сгустка S233-IR точки лежат в верхнем левом квадранте с $A_{\rm IS} < 1$ и $A_{\rm OS} > 1$, что соответствует модели молекулярного облака, состоящего из неразрешенных плотных малых сгустков размером меньше диаграммы направленности телескопа, окруженных менее плотным газом [111]. Так же несколько точек лежат в квадранте, соответствующем расширению сгустка. Значения аномалий в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43 в пределах ошибок ≈ 1 . Следовательно, низкий уровень отношения сигнал-шум в не позволяет исследовать динамику газа в сгустках WB 668 и G173.57+2.43.

Резюме анализа излучения в линиях аммиака в волокне WB 673

В разделе проведен анализ линий излучения аммиака в плотных сгустках волокна WB 673. По результатам анализа получено:

- Пики излучения в линиях аммиака соответствуют пикам излучения пыли 1.1 мм (Bolocam). Линии аммиака обладают умеренной оптической толщиной с 0,8 ≤ *τ*_(1,1) ≤ 1,8 в пиках излучения;
- С использованием подхода ЛТР определены лучевая концентрация и относительное обилие аммиака. Значения $N(\rm NH_3)$ в наиболее плотных частях сгустков примерно равны и достигают $\approx 1 2 \cdot 10^{15}$ см⁻²;
- Определены кинетическая температура газа и объемная плотность водорода. Плотность водорода достигает $\approx 2 \cdot 10^4$ см⁻³ в центральных сгустках, $\approx 1.4 \cdot 10^4$ см⁻³ в периферийных сгустках. Температура во всех сгустках не превышает 30 К;
- Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линий излучения NH₃(1,1). Аномалии указывают на сжатие сгустка WB 673 и на структуру S233-IR, которая описывается наличием неразрешенных малых сгустков размером меньше диаграммы направленности (43"), окруженных менее плотным газом.

2.3 Обзор спектральных линий в плотных сгустках гигантского молекулярного облака G174+2.7

2.3.1 Результаты наблюдений

По результатам спектрального обзора на 3-4 мм на телескопе Онсала в 2019 году были получены линии излучения для пиков яркости пыли 1.1 мм обзора Bolocam в направлении 12-ти сгустков G174+2.5: S235-AB, S235 East1, S235 East2, S235 Central, G173.17+2.55, G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 и WB 690. Их взаимное расположение показано на Рис. 1.1. Подробное описание сгустков представлено в разделе 1.1. В ходе наблюдений S235-Central было выделено 2 сгустка - западное и восточное, которые называются соответственно S235 Central-West и S235 Central-East. Кроме того, были проведены наблюдения в направлении звездного скопления S235-AB-cluster, погруженного в родительский плотный газ к югу от S235-AB. Все эти сгустки можно разделить на три группы по расположению: сгустки около расширяющейся области Н II S235: S235-AB, S235-AB,-cluster S235 East1, S235 East2, S235 Central-West и S235 Central-East; сгустки, принадлежащие волокну WB 673: G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 и сгустки меньшей плотности, не ассоциирующиеся ни в волокном, ни с областью ионизированного водорода: G173.17+2.55 и WB 690. Для простоты записи названия сгустков в дальнейшем будут написаны в сокращенном варианте: AB, AB cl, CE, CW, E1, E2, G173.17, G173.57.

В обзоре обнаружены линии более 20-ти молекул, и подробный анализ проведен для 16-ти молекул: NH_2D , N_2H^+ , N_2D^+ , HCO^+ , DCO^+ , HCN, DCN, HNC, DNC, ^{13}CS , SO, D_2CS , $c - C_3H_2$, C_2H , HCS^+ , CH_3CCH . Полученные спектры линий показаны на рис. 2.10 - 2.15. На спектрах видно, что линии дейтерированных молекул (NH_2D , N_2D^+ , DCO^+ , DCN, DNC и D_2CS) имеют более низкую интенсивность относительно их основных изотопологов в сгустках, расположенных вблизи S235 (AB, AB-cl, E1, E2, CW и CE), а так же в сгустке S233-IR из волокна WB 673. Например, интенсивность излучения линии N_2H^+ в сгустке AB составляет 3 K, а линия N_2D^+ в данном направлении не превышает уровень шума 0.05 K. Интенсивность линии DCN в данном направлении составляет 0.1 К, а HCN - 9 К. И, напротив, в сгустках WB 668, G173.57, G173.17 и WB 690 интенсивность излучения дейтерированных молекул повышается относительно сгустков вблизи S235. Например, интенсивность N_2D^+ составляет 0.3 К в направлении G173.57.

Интегральные интенсивности линий представлены в Таб. 13. В таблице так же представлены интегральные интенсивности изотопологов HN¹³C, HC¹⁵N и H¹³CO⁺, которые использовались для определения оптической толщины основного изотопа. Интегральные интенсивности в линиях HN¹³C (1–0), DNC (1–0), HC¹⁵N (1–0), DCN (1–0), H¹³CO⁺ (1–0), DCO⁺ (1–0), N₂D⁺ (1–0), C₃H₂ (2–1), NH₂D (1,1), C₂H (1–0), ¹³CS (1–0), SO (2–1), HCS⁺ (2–1) и D₂CS (3–2) меньше единицы, поэтому для удобства работы с таблицей представлены значения $W \cdot 10$ K км/с. В среднем наиболее высокой интегральной интенсивностью выделяются молекулы HCN и HCO⁺ с медианным значением по всем сгусткам 15 и 14 K км/с соответственно, ниже интенсивности HNC и N₂H⁺ с медианными значения 8 и 6 K км/с соответственно.

Таблица 13 — Интегральные интенсивности линий молекул NH₂D (1,1), N₂H⁺ (1–0), N₂D⁺ (1–0), HCO⁺ (1–0), DCO⁺ (1–0), HCN (1–0), DCN (1–0), HNC (1–0), DNC (1–0), ¹³CS (2–1), SO (3–2), D₂CS (3–2), c – C₃H₂ (2–1), C₂H (1–0), HCS⁺ (2–1), CH₃CCH (5–4), HN¹³C (1–0), HC¹⁵N (1–0) и H¹³CO⁺ (1–0) в направлении плотных сгустков облака G174+2.5, K км/c

Сгусток	HNC	$\mathrm{HN^{13}C}$	DNC	HCN	$\mathrm{HC^{15}N}$	DCN
		\times 10	\times 10		\times 10	\times 10
AB	11.9(0.2)	3.8(0.3)	2.2(0.2)	38.6(0.2)	5.8(0.2)	1.7(0.3)
AB cl	10.6(0.2)	-	3.8(0.2)	25.5(0.2)	1.3(0.2)	1.5(0.3)
CE	8.7(0.2)	3.6(0.3)	2.9(0.2)	23.8(0.2)	2.0(0.2)	7.2(0.4)
CW	5.7(0.2)	1.2 (0.3)	2.0(0.2)	16.7(0.2)	1.1 (0.2)	2.1 (0.3)
E1	9.8(0.2)	4.6(0.3)	1.2(0.2)	24.9(0.2)	2.2(0.2)	$1.1 \ (0.3)$
E2	7.0(0.2)	2.5(0.3)	4.5(0.2)	13.3(0.2)	1.8(0.2)	1.8(0.3)
G173.17	4.1(0.2)	0.9(0.2)	6.1(0.2)	7.9(0.2)	1.0(0.1)	4.3(0.3)
G173.57	6.4(0.2)	2.0(0.3)	5.4(0.2)	11.1 (0.2)	0.8(0.1)	1.0(0.3)
S233IR	13.7(0.2)	13.9(0.3)	4.7(0.2)	29.1(0.1)	2.4(0.2)	4.8(0.3)
WB668	5.6(0.1)	5.2(0.2)	11.8(0.2)	7.9(0.1)	0.5(0.1)	6.6(0.2)
WB673	8.9(0.1)	6.6(0.3)	8.3(0.2)	$10.1 \ (0.2)$	2.1(0.2)	6.0(0.2)
WB690	2.8(0.2)	0.6 (0.3)	3.9(0.2)	4.5(0.2)	0.3(0.2)	3.6(0.3)

Сгусток	HCO^+	$\mathrm{H}^{13}\mathrm{CO}^+$	DCO ⁺	N_2H^+	N_2D^+	C_3H_2
		$\times 10$	\times 10		\times 10	\times 10
AB	21.4(0.2)	13.8(0.5)	0.9(0.4)	9.8(0.0)	2.9(0.2)	7.3 (0.7)
AB cl	14.4(0.2)	11.8(1.0)	3.2(0.3)	4.6(0.1)	0.4(0.2)	4.6(0.5)
CE	26.0(0.2)	11.6(0.4)	0.7(0.4)	6.6(0.1)	2.8(0.2)	6.2(0.3)
CW	13.9(0.2)	6.5(0.3)	4.2(0.3)	1.7(0.1)	0.3(0.2)	7.2(0.2)
E1	20.5(0.2)	16.0(0.5)	4.4(0.2)	5.5(0.1)	0.2(0.1)	8.2(0.2)
E2	13.3(0.2)	9.9(0.4)	9.7(0.3)	3.8(0.1)	2.9(0.2)	7.6(0.2)
G173.17	6.8(0.2)	3.7(0.2)	9.1(0.3)	1.6(0.1)	0.9(0.1)	3.3(0.2)
G173.57	12.5(0.2)	14.4(0.3)	7.5(0.2)	6.6(0.1)	0.6(0.2)	7.4(0.2)
S233IR	31.2(0.2)	29.9(0.3)	4.4(0.3)	20.9(0.1)	1.9(0.2)	8.7(0.4)
WB668	8.9(0.1)	10.6(0.2)	20.6(0.3)	7.0(0.1)	4.7(0.2)	$15.1 \ (0.3)$
WB673	16.5(0.1)	16.1(0.4)	18.6(0.2)	9.3(0.1)	0.4(0.2)	16.2(0.4)
WB690	5.3(0.2)	4.8(0.4)	8.8(0.4)	1.2(0.1)	0.2(0.1)	3.7(0.2)
Сгусток	$\rm NH_2D$	C_2H	^{13}CS	SO	HCS^+	D_2CS
	\times 10	\times 10	\times 10	\times 10	\times 10	\times 10
AB	3.6(0.2)	98.8(0.6)	21.9(0.5)	13.2(0.2)	5.2(0.3)	0.6(0.2)
AB cl	1.5(0.2)	-	-	4.9(0.3)	3.2(0.3)	1.3(0.2)
CE	5.2(0.2)	27.1(0.4)	6.1(0.9)	4.5(0.2)	0.4(0.2)	-
CW	2.9(0.2)	16.8(0.4)	7.1 (0.5)	6.0(0.2)	1.3(0.2)	0.8(0.2)
E1	4.2(0.2)	39.8(0.4)	1.0(0.7)	8.8(0.3)	1.1 (0.2)	0.2 (0.2)
E2	5.4(0.2)	13.1 (0.4)	-	3.3(0.2)	0.8(0.3)	-
G173.17	2.5(0.1)	5.5(0.3)	9.4(0.5)	3.1(0.2)	-	-
G173.57	9.3(0.1)	23.7(0.4)	-	5.8(0.2)	0.3(0.2)	-
S233IR	9.3(0.2)	72.2(0.4)	3.7(0.8)	17.7(0.3)	5.3(0.2)	0.6(0.2)
WB668	6.4(0.1)	46.9(0.2)	5.9(0.9)	3.2(0.2)	2.7(0.1)	-
WB673	5.4(0.2)	8.9(0.4)	9.0(0.9)	10.7 (0.3)	2.6(0.2)	-
WDCOO						

Медианное значение интегральных интенсивностей излучения в сгустках, сконцентрированных вокруг S235, почти для всех молекул выше, чем для сгустков волокна WB 673, при этом отношение интенсивностей областей S235/WB 673 для дейтерированных изотопологов молекул HCN (1–0), N_2H^+ (1–0) и HCO⁺ (1–0) на 20 – 30 % ниже, чем для основного изотополога.



Рисунок 2.10 — Линии молекул NH₂D (1,1), N₂H⁺ (1–0), N₂D⁺ (1–0), HCO⁺ (1–0), DCO⁺ (1–0), HCN (1–0), DCN (1–0), HNC (1–0), DNC (1–0), ¹³CS (2–1), SO (3–2), D₂CS (3–2), c – C₃H₂ (2–1), C₂H (1–0), HCS⁺ (2–1), CH₃CCH (5–4) в направлении сгустков AB и AB cluster



Main beam temperature, K 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 Նիկեռնան տչչանն with the հան իլ 0 72042 88629 88635 72039 88632 72414 72417 90660 90663 90666 -10 -30 -10 -20 -30 -10 -10 -30 20 20 DNC 0.05 ¹³CS D₂CS 0.2 SO 0.2 0.1 0.00 ւոյ 0.00 0.0 ູໄປ մկյ 0.0 -0.05 76305 76308 85150 85155 85160 86091 86094 86097 92493 92496 -10 -20-30200 0 -200 -10-20 -30 20 0 -20 0.10 0.050 $c - C_3 H_2$. C₂H HCS + CH₃CCH 0.2 0.05 0.025 0.5 0.1 0.000 0.00 Մ ഹിഗ 0.0 -0.025 0.0 Ir 0.05 85341 85350 85440 85450 87300 87360 85344 85347 85460 85338 87420 Frequency, MHz

Рисунок 2.11 — Линии для CE и CW

CE



E2



Рисунок 2.12 — Линии для Е1 и Е2



WB690



Рисунок 2.13 — Линии для G173.57 и WB 690



Рисунок 2.14 — Линии для S233-IR и G173.17



Frequency, N

Рисунок 2.15 — Линии для WB 668 и WB 673

WB668

Сгусток	$\tau(\text{HNC})$	$\tau(\text{HCN})$	$\tau(\mathrm{HCO^+})$	$\tau(\mathrm{N_2H^+})$	$ au(\mathrm{NH}_2\mathrm{D})$
AB	2.4(0.2)	7.3(0.4)	5.3(0.2)	0.5(0.2)	-
AB cl	-	2.2(0.8)	6.8(0.7)	-	-
CE	3.2(0.3)	4.1 (0.8)	3.5(0.2)	-	1.0(0.9)
CW	1.2 (0.5)	3.0(1.1)	3.8(0.3)	1.8(1.1)	-
E1	3.7(0.2)	4.2(0.6)	6.5(0.3)	0.5(0.4)	2.9(1.0)
E2	2.7(0.3)	6.6(1.3)	6.2(0.3)	1.1 (0.0)	3.1(0.8)
G173.17	-	6.5(2.0)	4.4(0.4)	-	-
G173.57	2.3(0.4)	3.2(1.5)	9.7(0.4)	1.0(0.2)	3.2(0.6)
S233IR	8.6(0.2)	4.0(0.5)	8.0 (0.1)	0.2(0.0)	1.9(0.7)
WB 668	7.8(0.5)	3.1(1.4)	10.1 (0.4)	2.6(0.6)	0.6(0.4)
WB 673	6.1(0.3)	10.1 (1.2)	8.2(0.3)	-	2.4(0.9)
WB 690	-	-	7.6(0.9)	-	-

Таблица 14 — Оптическая толщина линий HNC (1–0), HCN (1–0), HCO⁺ (1–0), N_2H^+ (1–0), NH₂D (1,1) в направлении центров 12-ти сгустков

Для HNC (1–0) подобной корреляции не наблюдается. Понижение концентрации дейтрерированных молекул прослеживается и на спектрах: в направлении S235 линии дейтерированных молекул слабые, а в направлении волокна WB 673 интенсивность повышается. Однако из этой корреляции выбивается направление S233-IR, которое находится в волокне WB 673 и отличается низкой лучевой концентрацией дейтерированных молекул, и E2, обладающий высокой концентрацией дейтерированных молекул.

Для тех молекул, для которых это возможно, определены оптические толщины, которые приведены в Таб. 14. Видно, что оптическая толщина в линиях HCN (1–0), HNC (1–0) и HCO⁺ (1–0) достигает 10 в сгустках WB 668 и WB 673. Оптическая толщина линий N₂H⁺ (1–0) и NH₂D (1,1) не превышает ~ 2 во всех сгустках.



Рисунок 2.16 — Линии CH₃CCH, J = 5–4, K = 0, 1, 2, 3 с гауссовой функцией, вписанной в K-компоненты.

2.3.2 Вращательные диаграммы CH₃CCH

Методом, описанным в разделе 1.3.3, построены вращательные диаграммы молекулы CH₃CCH в направлении сгустков AB, CE, E1, S233-IR, WB 668 и WB 673. В остальных направлениях линии слишком слабые для анализа (см. Puc. 2.10 — Puc. 2.15). Для построения вращательной диаграммы нужно получить интегральную интенсивность отдельных *K*-компонент CH₃CCH. Для этой цели в спектры были вписаны гауссовы функции 3-х линий J = 5–4 (K = 0, 1, 2). В направлении S233-IR для линии K = 3 отношение сигнал-шум больше трех, поэтому вращательная диаграмма была построена для четырех линий. На Рис. 2.16 показаны вращательные диаграммы.

В Таб. 15 представлены вращательные температуры CH₃CCH и кинетическая температура газа из NH₃. В пределах ошибок эти величины совпадают.

2.3.3 Лучевые концентрации

Для молекул NH₂D, N₂H⁺, N₂D⁺, HCO⁺, DCO⁺, HCN, DCN, HNC, DNC, 13 CS, SO, D₂CS, c - C₃H₂, C₂H и HCS⁺ найдены лучевые концентрации мето-



Рисунок 2.17 — Вращательные диаграммы CH₃CCH. $T_{\rm rot}$ и N показаны в правом верхнем углу

Сгусток	$T_{\rm rot}$ (CH ₃ CCH)	$T_{\rm kin}~({\rm NH_3})$
AB	64.6 (14.9)	66.09 (30.4)
AB cl	-	20.76(3.48)
CE	34.7(22.9)	27.92(5.19)
CW	-	13.41 (3.33)
E1	33.0(15.7)	31.53(5.48)
E2	-	20.81(1.47)
G173.57	-	20.09 (2.61)
S233IR	25.6(1.3)	24.92(2.99)
WB668	48.2 (16.6)	19.11 (1.75)
WB673	37.1 (15.9)	18.31 (4.03)

Таблица 15 — Вращательные температуры линий CH₃CCH и кинетическая температура газа из NH₃, (K)

дом, представленным в п. 1.3.1. Соответственно, для NH₂D, N₂H⁺, HCO⁺, HCN и HNC лучевая концентрация была найдена с поправкой на оптическую толщину в тех направлениях, где ее удалось определить. Лучевая концентрация CH₃CCH была получена с помощью метода вращательных диаграмм, описанного в п. 1.3.3. Значения лучевых концентраций для всех направлений показаны в Таб. 16.

Таблица 16 — Лучевые концентрации молекул NH_2D , N_2H^+ , N_2D^+ , HCO^+ , DCO^+ , HCN, DCN, HNC, DNC, ${}^{13}CS$, SO, D_2CS , $c - C_3H_2$, C_2H и HCS^+ в направлении 12-ти сгустков (см⁻²)

Сгусток	HNC	DNC	HCN	DCN
	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{10}
AB	17.3(3.3)	10.9(1.2)	192.1 (38.5)	17.5(1.9)
AB cluster	5.7(0.5)	29.2(2.4)	38.3(12.3)	14.1 (2.0)
CE	16.6(5.7)	21.9(1.5)	59.6(23.1)	65.3(2.1)
CW	3.4(0.3)	18.1(2.1)	32.7(16.1)	20.1 (2.0)
E1	21.5(5.9)	9.2(1.3)	63.5(19.3)	10.2(1.7)
E2	11.4(3.9)	36.2(1.2)	53.3(17.1)	17.1 (2.0)

G173.17	2.6(0.3)	45.6(3.2)	39.5(19.4)	51.6(3.2)
G173.57	9.2(3.3)	46.6(1.3)	24.9(8.3)	10.9(1.9)
S233IR	65.9(16.7)	37.5(1.0)	71.7(17.7)	44.4(1.7)
WB668	28.3(14.2)	110.0(2.9)	18.1(5.8)	70.2(2.2)
WB673	31.6(7.7)	66.5(1.2)	68.9(20.1)	62.2(1.9)
WB690	1.5(0.2)	31.0(2.3)	2.8(0.1)	34.4(2.9)
Сгусток	$\rm NH_2D$	N_2H^+	N_2D^+	D_2CS
	10^{12}	10^{12}	10^{10}	10^{10}
AB	3.0(1.6)	8.9 (1.8)	10.7(2.6)	2.0(0.9)
AB cluster	0.9(0.2)	2.7(0.3)	2.5(1.2)	11.7(1.9)
CE	6.6(2.4)	3.7(0.4)	3.0(1.5)	-
CW	0.6(0.1)	$1.7 \ (0.9)$	11.3(6.2)	12.5(2.0)
E1	15.7(4.5)	4.1 (0.9)	2.0(1.1)	7.8(1.5)
E2	23.3(4.8)	1.8(0.1)	22.5(1.1)	3.5(1.0)
G173.17	1.7 (0.4)	0.9(0.1)	5.9(1.1)	7.9(1.6)
G173.57	25.9(3.9)	7.6(1.3)	47.1(8.1)	-
S233IR	15.5(3.8)	41.7(1.7)	8.5(2.2)	7.4(1.8)
WB668	7.4(1.5)	4.6(0.5)	54.9(5.4)	0.3~(0.7)
WB673	10.6(3.1)	4.7(0.5)	23.8(4.2)	1.0(0.9)
WB690	1.7(0.4)	0.8(0.1)	11.3(1.4)	3.9(1.1)
Сгусток	$\rm HCO^+$	DCO^+	SO	^{13}CS
	10^{12}	10^{11}	10^{11}	10^{11}
AB	43.3(10.3)	0.6(0.1)	29.2(1.3)	43.4(1.7)
AB cluster	34.6(24.8)	1.7 (0.1)	18.1 (0.9)	-
CE	37.1(5.3)	0.4(0.1)	11.8(0.7)	12.2 (1.8)
CW	18.6(5.0)	2.3(0.1)	13.8(0.8)	14.0(1.1)
E1	46.4(12.6)	2.4(0.1)	19.3(1.0)	2.0(1.5)
E2	28.7 (9.5)	5.3(0.1)	10.5(0.7)	-
G173.17	11.7(5.0)	5.6(0.2)	6.4(0.6)	18.6(1.1)
G173.57	42.3(15.2)	4.1(0.1)	14.1 (0.7)	-
S233IR	90.7(12.1)	2.5(0.1)	43.8(1.9)	7.2(1.5)
WB668	33.4(12.2)	12.1 (0.2)	8.8(0.5)	11.6(1.8)
WB673	47.3(12.6)	$10.2 \ (0.1)$	23.1(1.1)	17.9(1.9)
WB690	15.4(14.4)	5.3(0.2)	5.0(0.5)	1.4(1.2)

Сгусток	$c-C_3H_2$	C_2H	HCS^+	CH ₃ CCH
	10^{12}	10^{11}	10^{11}	10^{13}
AB	2.1(0.4)	43.4(1.7)	43.4(1.7)	46.7 (16.57)
AB cluster	$1.1 \ (0.2)$	-	-	-
CE	1.8(0.4)	12.2(1.8)	12.2(1.8)	5.96(6.27)
CW	2.1 (0.4)	14.0(1.1)	14.0(1.1)	-
E1	2.3(0.5)	2.0(1.5)	2.0(1.5)	7.13(5.42)
E2	2.2(0.4)	-	-	-
G173.17	1.0(0.2)	18.6(1.1)	18.6(1.1)	-
G173.57	2.2(0.4)	-	-	-
S233IR	2.5(0.5)	7.2(1.5)	7.2(1.5)	36.11 (3.01)
WB668	4.4(0.9)	11.6(1.8)	11.6(1.8)	$16.58 \ (8.86)$
WB673	4.6(0.9)	17.9(1.9)	17.9(1.9)	10.44(7.05)
WB690	1.1 (0.2)	1.4(1.2)	1.4(1.2)	-

В направлении AB практически для всех недейтерированных молекул достигается наиболее высокая лучевая концентрация относительно других направлений: $N(N_2H^+) \sim 9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N(SO) \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N(^{13}\text{CS}) \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N(C_2H) \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N(\text{HCN}) \sim 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, так же обнаружена высокая лучевая концентрация в направлении S233-IR: $N(N_2H^+) \sim 9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N(\text{HCO}) \sim 9 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $N(SO) \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N(c - C_3H_2) \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N(\text{HNC}) \sim 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$.

2.3.4 Доля дейтерия

В обзоре есть шесть линий молекул, содержащих дейтерий: DCN, DNC, DCO⁺, N_2D^+ , NH_2D и D_2CS . Причем последняя молекула содержит 2 атома D, что указывает на более высокий уровень дейтерирования. Была рассчитана доля дейтерия для NH_3 , N_2H^+ , HCO^+ , HCN, HNC. Лучевые концентрации аммиака в сгустках волокна WB 673 были взяты из данных, описанных в п. 2.2, для сгустков вблизи S235 использовались лучевые концентрации из работы [57]. Полученные значения доли дейтерия представлены в Taб. 17.

Сгусток	HCN	HNC	HCO^+	N_2H^+	NH ₃
AB	$0.001 \ (0.0)$	$0.005 \ (0.002)$	$0.001 \ (0.001)$	$0.01 \ (0.003)$	0.006 (0.007)
AB cl	$0.004 \ (0.003)$	$0.051 \ (0.009)$	$0.005\ (0.002)$	$0.009\ (0.005)$	$0.002 \ (0.001)$
CE	$0.011 \ (0.009)$	$0.011 \ (0.005)$	$0.001 \ (0.001)$	$0.008\ (0.005)$	$0.015\ (0.01)$
CW	$0.006\ (0.007)$	$0.054\ (0.011)$	$0.012 \ (0.004)$	$0.03\ (0.028)$	$0.002 \ (0.002)$
E1	$0.002 \ (0.001)$	$0.005\ (0.002)$	$0.005\ (0.001)$	$0.004\ (0.003)$	$0.047 \ (0.029)$
E2	0.003(0.004)	$0.038\ (0.014)$	$0.019 \ (0.006)$	$0.073 \ (0.004)$	$0.183\ (0.05)$
G173.17	$0.013 \ (0.026)$	$0.175\ (0.03)$	$0.048\ (0.026)$	$0.065\ (0.019)$	-
G173.57	$0.004 \ (0.007)$	$0.057 \ (0.021)$	$0.01 \ (0.003)$	$0.039\ (0.009)$	$0.041 \ (0.03)$
S233IR	$0.006\ (0.003)$	$0.006\ (0.002)$	$0.003\ (0.001)$	$0.002 \ (0.0)$	$0.015\ (0.01)$
WB668	$0.039\ (0.051)$	$0.04\ (0.021)$	$0.036\ (0.016)$	$0.042 \ (0.011)$	$0.007\ (0.003)$
WB673	0.009(0.011)	$0.02 \ (0.005)$	$0.022 \ (0.004)$	$0.051 \ (0.014)$	$0.011 \ (0.007)$
WB690	$0.121 \ (0.023)$	0.207(0.042)	$0.035\ (0.033)$	0.143(0.034)	-

Таблица 17 — Доля дейтерия в направлении 12-ти сгустков



Рисунок 2.18 — Сравнение доли дейтерия в N₂H⁺, NH₃, HNC и HCN, HCO⁺ с лучевой концентрацией и плотностью водорода

Чтобы проследить тренд изменения доли дейтерия, была построена зависимость доли дейтерия от лучевой концентрации водорода (Bolocam), см. Рис. 2.18. Видно, что в направлениях с наименьшей лучевой концентрацией доля дейтерия всех молекул повышается. Диаграмма доли дейтерия по разным сгусткам показана на рис. 2.19. Кроме общих трендов понижения D_{frac} в сгустках около S235, видны другие особенности: например, в G173.17 доля дейтерия в HCN значительно ниже, чем в HNC; а в WB 668 $D_{\text{frac}}(\text{HCN})$ и $D_{\text{frac}}(\text{HNC})$ практически одинакова. В CE, E1 и E2 доля дейтерия аммиака превышает $D_{\text{frac}}(N_2\text{H}^+)$, а в AB, AB cluster, CW, WB 668 и WB 673 наоборот.



Рисунок 2.19 — Сравнение доли дейтерия в N₂H⁺, NH₃, HNC и HCN, HCO⁺ в разных сгустках

Резюме обзора спектральных линий в плотных сгустках гигантского молекулярного облака G174+2.7

- По результатам спектрального обзора 3-4 мм определена интенсивность излучения линий молекул NH₂D (1,1), N₂H⁺ (1–0), N₂D⁺ (1–0), HCO⁺ (1–0), DCO⁺ (1–0), HCN (1–0), DCN (1–0), HNC (1–0), DNC (1–0), ¹³CS (2–1), SO (3–2), D₂CS (3–2), c C₃H₂ (2–1), C₂H (1–0), HCS⁺ (2–1), CH₃CCH (5–4), HN¹³C (1–0), HC¹⁵N (1–0) и H¹³CO⁺ (1–0) в направлении пиков яркости излучения пыли 12-ти плотных сгустков G174+2.5: S235-AB, S235 East1, S235 East2, S235 Central, G173.17+2.55, G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 и WB 690. Определены оптические толщины линий HNC (1–0), HCN (1–0), HCO⁺ (1–0), N₂H⁺ (1–0), NH₂D (1,1).
- Получены лучевые концентрации молекул NH_2D , N_2H^+ , N_2D^+ , HCO^+ , DCO^+ , HCN, DCN, HNC, DNC, CS, SO, D_2CS , $c C_3H_2$, C_2H , HCS^+ ,

СН₃ССН в направлении 12-ти плотных сгустков G174+2.5. В направлении сгустков AB и S233-IR наблюдается наибольшая лучевая концентрация практически всех молекул;

- В направлении сгустков AB, CE, E1, S233-IR, WB 668 и WB 673 определены вращательные температуры CH₃CCH. В направлении AB температура достигает 66 К. В пределах ошибок вращательная температура CH₃CCH согласуется с кинетической температурой газа, полученной по линиям NH₃;
- Получена доля дейтерия молекул NH₃, N₂H⁺, HCO⁺, HCN, HNC. Проведен анализ изменения доли дейтерия в зависимости от лучевой концентрации газа. Доля дейтерия в сгустках вокруг зоны H II систематически ниже значений в волокне: значение D_{frac} , усредненное по сгусткам G173.57+2.43, S233-IR, WB 673 и WB 668, выше значения D_{frac} , усредненного по сгусткам S235-AB, S235 East1, S235 East2, S235 Central в 2 5 раз в разных линиях.

Положения, выносимые на защиту

В результате проделанной работы на защиту выносятся следующие положения:

- Получены карты излучения в линиях CS(2–1), C¹⁸O(1–0), ¹³CO(1–0), N₂H⁺(1–0), HNC(1–0), HCN(1–0), NH₃(1–0) и NH₃(1,1) в плотных сгустках волокна WB 673. Получены карты лучевой концентрации CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, NH₃ и H₂, а так же обилий молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, NH₃ относительно водорода. Показано, что обилия молекул в центральных частях сгустков систематически ниже чем на периферии;
- 2. Получены карты объемной плотности водорода и кинетической температуры газа в плотных сгустках волокна WB 673 по данным линий излучения NH₃. Плотность водорода достигает ≈ 2 · 10⁴ см⁻³. Температура во всех сгустках не превышает 30 К. Так же в направлении сгустков волокна S233-IR, WB 668, WB 673 и сгустков вблизи области
Н II S235-AB, S235-CE, S235-E1 определены вращательные температуры CH₃CCH. В пределах ошибок вращательные температуры CH₃CCH совпадают с кинетической температурой газа из NH₃;

- 3. Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линий излучения NH₃(1,1). Аномалии указывают на сжатие сгустка WB 673 и на структуру S233-IR, которая описывается наличием неразрешенных малых сгустков размером меньше диаграммы направленности (43"), окруженных менее плотным газом;
- Получены лучевые концентрации молекул NH₂D, N₂H⁺, N₂D⁺, HCO⁺, DCO⁺, HCN, DCN, HNC, DNC, CS, SO, D₂CS, c - C₃H₂, C₂H, HCS⁺, CH₃CCH в направлении пиков яркости излучения пыли в направлении 12-ти сгустков G174+2.5: S235-AB, S235 East1, S235 East2, S235 Central, G173.17+2.55, G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 и WB 690;
- 5. Получена доля дейтерия в молекулах NH_3 , N_2H^+ , HCO^+ , HCN, HNC. Доля дейтерия в сгустках вокруг зоны H II систематически ниже значений в волокне: значение $D_{\rm frac}$, усредненное по сгусткам G173.57+2.43, S233-IR, WB 673 и WB 668, выше значения $D_{\rm frac}$, усредненного по сгусткам S235-AB, S235 East1, S235 East2, S235 Central в 2 - 5 раз в разных линиях;

Глава 3. Астрохимическое моделирование плотных сгустков G174+2.5

В Главе 1 показаны результаты наблюдений плотных сгустках волокна WB 673 в радиолиниях CO, CS, N₂H⁺, HCN, HNC и NH₃. По этим данным были построены карты различных параметров, таких как кинетическая температура газа, плотность водорода и лучевая концентрация молекул CO, CS, HCN, HNC, N₂H⁺ и NH₃, которые приведены в Главе 2. Так же проведен спектральный обзор в радиолиниях на 3–4 мм в направлении наиболее плотных участков сгустков гигантского молекулярного облака G174+2.5: S235-AB, S235 East1, S235 East2, S235 Central, G173.17+2.55, G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 и WB 690. По результатам спектрального обзора 3-4 мм получены лучевые концентрации молекул NH₂D, N₂H⁺, N₂D⁺, HCO⁺, DCO⁺, HCN, DCN, HNC, DNC, CS, SO, D₂CS, c – C₃H₂, C₂H, HCS⁺, CH₃CCH; а так же вращательная температура CH₃CCH. С полученным набором наблюдательных данных в Главе 3 было проведено химическое моделирование плотных сгустков G174+2.5, чтобы оценить звездообразования в них.

3.1 Моделирование химической эволюции плотных сгустков волокна WB 673 по радиальному профилю

3.1.1 Описание модели

Для химического моделирования была использована модель Presta [27]. В диссертации модель включает как газофазные, так и твердофазные процессы, взятые из базы данных ALCHEMIC [126] с дополнениями, описанными [127]. Для моделирования плотных сгустков волокна Presta включала в себя 582 компонента и 4524 газофазных реакции. Исходный химический состав газа был взят из [128] и представлен в таблице 18. Работа модели начинается с атомарного начального содержания без молекул, за исключением молекулярного водорода H₂. Была смоделирована химическая эволюция плотных сгустков в течение 10⁸ лет. Одномерная модель представляет собой сферически-симметричные слои, где профили параметров задаются в зависимости от расстояния до центра сгустка. В результате модель дает радиальные профили обилий разных молекул в разные моменты времени. Однако из наблюдений известна лучевая концентрация молекул (см. разделы 2.1 и 2.2). Чтобы перейти от обилий к лучевым концентрациям, обилия в модели были интегрированы по радиальному профилю и умножены на лучевую концентрацию водорода.

Таблица 18 — Начальные обилия компонент химической модели по отношению к водороду.

Элемент	Обилие
Не	$9.0\cdot10^{-2}$
С	$7.3\cdot 10^{-5}$
Ν	$2.1\cdot 10^{-5}$
0	$1.7\cdot 10^{-4}$
Cl	$1.0\cdot 10^{-9}$
S	$8.0\cdot 10^{-8}$
Si	$8.0\cdot10^{-9}$
Fe	$3.0\cdot10^{-9}$

Физические параметры сгустков для моделирования были заданы в предположении сферической симметрии, несмотря на более сложную структуру плотных ядер (см. разделы 2.1 и 2.2). Такой подход оправдан, так как все сгустки в наших наблюдениях представляются изолированными плотными ядрами, окруженными менее плотными оболочками, и в картинной плоскости приближены к форме круга. На карте плотности водорода (Рис. 2.8) были построены и затем усреднены по углу радиальные профили из точки наибольшей лучевой концентрации водорода по данным Bolocam. После чего усредненные профили плотности были степенной функцией [6]:

$$n(r) = \frac{n_0}{(1 + (r/r_0)^2)^{p/2}},$$
(3.1)

где n_0 — плотность в центре сгустка, r_0 — радиус плоской внутренней области, p— показатель степени при $r > r_0$. Плоская внутренняя область означает, что при радиусе меньше r_0 плотность равна n_0 . Получившиеся параметры приведены в таблице 19. Поскольку диапазон температур в сгустках невелик, для моделей была принята постоянная температура T = 20 К. Модель с плотностью, описанной степенной функцией, и средней температурой T = 20 К принималась за эталонную, соответствующую наблюдениям.

Сгусток	n_0	r_0	p
	$10^3 \mathrm{~cm^{-3}}$	pc	_
WB 668	7.4	0.126	0.20
WB 673	13.3	0.219	0.40
S233-IR	16.9	0.014	0.11
G173.57 + 2.43	12.8	0.040	0.35

Таблица 19 — Параметры радиального распределения плотности водорода в сгустках волокна WB 673

3.1.2 Результаты моделирования

Профили $n(H_2)$ для сгустков WB 673, WB 668, S233-IR и G173.57+2.43 показаны на Рис. 3.1 – 3.4 соответственно. На Рис. 3.1 для сгустка WB 673 также показаны радиальные профили лучевых концентраций CO, CS, HCN, HNC, N₂H⁺ и NH₃, усредненные аналогично профилю $n(H_2)$. Бары ошибок по радиальным профилям показывают разброс неусредненных значений. Для остальных сгустков отсутствуют данные излучения в линиях HCN и HNC, поэтому в анализе они не используются.

В эталонной модели было принято, что УФ-поле внутри и снаружи облака несущественно, потому что в окрестностях волокна нет мощных источников УФ-излучения. Скорость ионизации космическими лучами составляла $\zeta = 1.3 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1} [129]$ для каждого сгустка.



Рисунок 3.1 — Распределение плотности водорода $n(H_2)$, полученной по данным излучения линий аммиака, лучевой концентрации молекул N₂H⁺, CO, CS, NH₃, HCN и HNC в сгустке WB 673 (черные линии с барами ошибок). Панель с $n(H_2)$ так же показывает вписанную степенную функцию. Цветные сине-зелено-желтые линии на панелях с лучевыми концентрациями показывают результаты модели Presta в разные моменты времени.



Рисунок 3.2 — Распределение плотности водорода $n(H_2)$ и лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS, NH₃, в сгустке WB 668. Обозначения как на Рис. 3.1



Рисунок 3.3 — Распределение плотности водорода $n(H_2)$ и лучевой концентрации молекул CO, CS и NH₃ в сгустке S233-IR. Обозначения как на Рис. 3.1



Рисунок 3.4 — Распределение плотности водорода $n(H_2)$ и лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS и NH₃ в сгустке G173.57+2.43. Обозначения как на Рис. 3.1

В результате моделирования были получены профили лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS, NH₃, HCN и HNC. На Рис. **3**.1 – **3**.4 показаны модельные лучевые концентрации цветными сине-зелено-желтыми линиями. Видно, что модельные лучевые концентрации CS и CO в основном ниже, чем наблюдательные (черные линии с барами ошибок), а модельные концентрации для HCN и HNC в основном выше на 2–3 порядка величины. При этом для молекул N_2H^+ , CO, CS и NH₃ модельные лучевые концентрации, соответствующие модельному возрасту облака 100–300 тыс. лет (сплошные линии) наилучшим образом соответствуют наблюдательным данным.

Для проверки соответствия модельной лучевой концентрации молекул (N_{model}) с наблюдательными значениями (N_{obs}) был введен критерий соответствия Σ . Если отношение между значениями N_{obs} и N_{model} было меньше порядка величины во всех точках по радиусу сгустка, то модель и наблюдения считались согласованными и $\Sigma = 1$. В противном случае $\Sigma = 0$. Такой критерий вычислялся для каждой рассматриваемой молекулы для каждого момента времени. Таким образом, для определенного момента времени наибольшее значение Σ говорит о наилучшем соответствии между моделью и наблюдении.

Используя модель Presta и проверяя критерии соответствия на каждом временном шаге, был найден химический возраст, когда модельные и наблюдаемые лучевые концентрации молекул находятся в наилучшем согласии и Σ принимает наибольшее значение.

Моделирование проводилось для широкого диапазона входных параметров, варьируемых по отношению к эталонной (с физическими параметрами, соответствующими наблюдениям) модели. А именно, в модели использовались более низкие и более высокие температуры (до ± 10 K в каждой расчетной ячейке), плотность (варьировалась до одного порядка), также были рассмотрены модели с дополнительной длительной ($5 \cdot 10^5$ лет) предшествующей холодной стадией при температуре T = 10 K, характерной для темных молекулярных облаков (например, [130]). Однако проведенное моделирование показало, что наилучшее соответствие достигается при эталонной модели, описанной выше.



Рисунок 3.5 — Критерий соответствия моделе
й Σ для сгустков волокна WB 673.

3.1.3 Обсуждение результатов моделирования

Двухфазные (газо-пылевые) астрохимические модели молекулярных облаков показывают два режима эволюции межзвездного молекулярного облака, при которых доминируют различные химические соединения: "ранний" и "поздний" [39; 131; 132]. Такие молекулы, как СО и СЅ, быстро образуются в газовой фазе и становятся индикаторами "ранней" химии. "Поздние" молекулы N₂H⁺ и NH₃ образуются после аккреции СО на холодные пылинки. Таким образом, стадия уменьшения "ранних" и увеличения "поздних" молекул, имеющая место в наших моделях в момент времени $t = 1 - 3 \times 10^5$ лет, представляет собой переход между двумя химическими режимами, см. Рис. 3.1.

Как видно на Рис. 2.3 и 2.8, обилия практически всех молекул уменьшаются в центральной части сгустков. Это может быть связано с их вымораживанием на поверхности пылинок и обычно наблюдается в темных беззвездных облаках. Однако плотные сгустки в этом исследовании демонстрируют признаки образования массивных звезд: водяные мазеры, мазеры CH₃OH, источники IRAS и MSX и молодые звездные скопления (см. пункт 1.1). Несоответствие между наличием признаков звездообразования и химией, типичной для холодных дозвездных ядер в сгустках, можно объяснить высокой плотностью молекулярного газа, окружающего молодые звездные объекты. Повышение температуры, связанное с активным звездообразованием, недостаточно для прогрева молекулярных сгустков.

Результат о быстром звездообразовании подтверждает идею образования волокон после многократного сжатия остатками сверхновых или областями H II. В работе [133] найден молодой остаток сверхновой в направлении G174+2.5, возраст которой составляет ~ 3,3 × 10⁵ лет. В работе [51] показано, что волокно расположено на границе протяженной слабой инфракрасной оболочки, происхождение которой до сих пор неизвестно. Химический возраст волокна аналогичен возрасту остатка сверхновой, поэтому нельзя исключить его влияние на формирование волокна. Область Н II S231 расположена на восточной стороне волокна. Отметим более плотное расположение областей звездообразования в тех частях волокна, которые граничат с областью H II. Этот факт косвенно подтверждает влияние S231 на звездообразование в волокне.

Резюме моделирования химической эволюции плотных сгустков волокна WB 673 по радиальному профилю

В Главе 3 приведены результаты астрохимического моделирования плотных сгустков волокна WB 673 по радиальному профилю. Результаты модели сравнивались с наблюдательными лучевыми концентрациями молекул N₂H⁺, CO, CS, NH₃, HCN и HNC. Моделирование проводилось для широкого диапазона входных параметров, варьируемых по отношению к эталонной (с физическими параметрами, соответствующими наблюдениям) модели. В результате моделирования определено, что химический возраст сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 одинаков и составляет $t = 1 - 3 \times 10^5$ лет.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

- 1. Проведены наблюдения на телескопе в Онсала (Швеция) и построены карты интегральных интенсивностей излучения молекул в линиях CS(2-1), $C^{18}O(1-0)$, $^{13}CO(1-0)$, $N_2H^+(1-0)$, HNC(1-0) и 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 лучевых концентраций молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN, и H_2 ;
- 2. Построены карты распределения обилий молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC и HCN в плотных сгустках волокна WB 673; 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 N₂H⁺ 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;
- Пики излучения в линиях аммиака соответствуют пикам излучения пыли 1.1 мм (Bolocam). Линии аммиака обладают умеренной оптической толщиной с 0,8 ≤ τ_(1,1) ≤ 1,8 в пиках излучения;
- 4. С использованием подхода ЛТР определены лучевая концентрация и относительное обилие аммиака. Значения $N(\rm NH_3)$ в наиболее плотных частях сгустков примерно равны и достигают $\approx 1 2 \cdot 10^{15}$ см⁻²;
- Определены кинетическая температура газа и объемная плотность водорода. Плотность водорода достигает ≈ 2 · 10⁴ см⁻³ в центральных сгустках, ≈ 1.4 · 10⁴ см⁻³ в периферийных сгустках. Температура во всех сгустках не превышает 30 К;
- 6. Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линий излучения NH₃(1,1). Аномалии указывают на сжатие сгустка WB 673 и на структуру S233-IR, которая описывается наличием неразрешенных малых

сгустков размером меньше диаграммы направленности (43"), окруженных менее плотным газом.

- 7. По результатам спектрального обзора 3-4 мм определена интенсивность излучения линий молекул NH₂D (1,1), N₂H⁺ (1–0), N₂D⁺ (1–0), HCO⁺ (1–0), DCO⁺ (1–0), HCN (1–0), DCN (1–0), HNC (1–0), DNC (1–0), ¹³CS (2–1), SO (3–2), D₂CS (3–2), c C₃H₂ (2–1), C₂H (1–0), HCS⁺ (2–1), CH₃CCH (5–4), HN¹³C (1–0), HC¹⁵N (1–0) и H¹³CO⁺ (1–0) в направлении пиков яркости излучения пыли 12-ти плотных сгустков G174+2.5: S235-AB, S235-East1, S235-East2, S235-Central, G173.17+2.55, G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 и WB 690. Определены оптические толщины линий HNC (1–0), HCN (1–0), HCO⁺ (1–0), N₂H⁺ (1–0), NH₂D (1,1).
- Получены лучевые концентрации молекул NH₂D, N₂H⁺, N₂D⁺, HCO⁺, DCO⁺, HCN, DCN, HNC, DNC, CS, SO, D₂CS, c - C₃H₂, C₂H, HCS⁺, CH₃CCH в направлении 12-ти плотных сгустков G174+2.5. В направлении сгустков S235-AB и S233-IR наблюдается наибольшая лучевая концентрация практически всех молекул;
- 9. В направлении сгустков S235-AB, S235-East1, S235-Central, S233-IR, WB 673 и WB 668 определены вращательные температуры CH₃CCH. В направлении S235-AB температура достигает 66 К. В пределах ошибок вращательная температура CH₃CCH согласуется с кинетической температурой газа, полученной по линиям NH₃;
- Получена доля дейтерия молекул NH₃, N₂H⁺, HCO⁺, HCN, HNC. Проведен анализ изменения доли дейтерия в зависимости от лучевой концентрации газа. Доля дейтерия в сгустках вокруг зоны H II систематически ниже значений в волокне: значение D_{frac}, усредненное по сгусткам G173.57+2.43, S233-IR, WB 673 и WB 668, выше значения D_{frac}, усредненного по сгусткам S235-AB, S235-East1, S235-East2, S235-Central в 2 5 раз в разных линиях.
- 11. Проведено астрохимическое моделирование плотных сгустков волокна WB 673 по радиальному профилю. Результаты модели сравнивались с наблюдательными лучевыми концентрациями молекул N₂H⁺, CO, CS, NH₃, HCN и HNC. Моделирование проводилось для широкого диапазона входных параметров, варьируемых по отношению к эталонной (с

физическими параметрами, соответствующими наблюдениям) модели. В результате моделирования определено, что химический возраст сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 одинаков и составляет $t = 1 - 3 \times 10^5$ лет.

Список литературы

- 1. *Каплан С., Пикельнер С.* Физика межзвездной среды. Москва : Наука, 1979.
- 2. Засов А., Постнов К. Общая астрофизика. Издание 2-е, исправл. и дополн. — Фрязино : Век 2, 2011.
- Бисноватый-Коган Г. Физические вопросы теории звездной эволюции. Москва : Наука, 1989.
- 4. Schneider S., Elmegreen B. G. A catalog of dark globular filaments. // The Astrophysical Journal Supplement Series. 1979. Vol. 41. P. 87–95.
- Magnetically Dominated Strands of Cold Hydrogen in the Riegel-Crutcher Cloud / N. M. McClure-Griffiths, J. M. Dickey, B. M. Gaensler, A. J. Green, M. Haverkorn // Astrophysical Journal. — 2006. — т. 652, № 2. — с. 1339— 1347.
- From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation / P. André, J. Di Francesco, D. Ward-Thompson, S.-I. Inutsuka, R. E. Pudritz, J. E. Pineda // Protostars and Planets VI. - 2014. - c. 27-51.
- Characterizing the properties of nearby molecular filaments observed with Herschel / D. Arzoumanian, P. André, V. Könyves, P. Palmeirim, A. Roy, N. Schneider, M. Benedettini, P. Didelon, J. Di Francesco, J. Kirk, B. Ladjelate // Astronomy & Astrophysics. - 2019. - T. 621. - A42.
- Filamentary structure and magnetic field orientation in Musca / N. L. J. Cox, D. Arzoumanian, P. André, K. L. J. Rygl, T. Prusti, A. Men'shchikov, P. Royer, Á. Kóspál, P. Palmeirim, A. Ribas, V. Könyves, J. .-P. Bernard, N. Schneider, S. Bontemps, B. Merin, R. Vavrek, C. Alves de Oliveira, P. Didelon, G. L. Pilbratt, C. Waelkens // Astronomy & Astrophysics. — 2016. — т. 590. — A110.
- Characterizing filaments in regions of high-mass star formation: Highresolution submilimeter imaging of the massive star-forming complex NGC 6334 with ArTéMiS / P. André, V. Revéret, V. Könyves, D. Arzoumanian, J.

Tigé, P. Gallais, H. Roussel, J. Le Pennec, L. Rodriguez, E. Doumayrou, D. Dubreuil, M. Lortholary, J. Martignac, M. Talvard, C. Delisle, F. Visticot, L. Dumaye, C. De Breuck, Y. Shimajiri, F. Motte, S. Bontemps, M. Hennemann, A. Zavagno, D. Russeil, N. Schneider, P. Palmeirim, N. Peretto, T. Hill, V. Minier, A. Roy, K. L. J. Rygl // Astronomy & Astrophysics. — 2016. — т. 592. — A54.

- 10. Inutsuka S.-i., Miyama S. M. A Production Mechanism for Clusters of Dense Cores // Astrophysical Journal. — 1997. — т. 480, № 2. — с. 681—693.
- Lowering the Characteristic Mass of Cluster Stars by Magnetic Fields and Outflow Feedback / Z.-Y. Li, P. Wang, T. Abel, F. Nakamura // Astrophysical Journal. — 2010. — т. 720, № 1. — с. L26—L30.
- 12. Hartmann L. Flows, Fragmentation, and Star Formation. I. Low-Mass Stars in Taurus // Astrophysical Journal. — 2002. — т. 578, № 2. — с. 914—924.
- The Milky Way Project and ATLASGAL: The Distribution and Physical Properties of Cold Clumps Near Infrared Bubbles / S. Kendrew, H. Beuther, R. Simpson, T. Csengeri, M. Wienen, C. J. Lintott, M. S. Povich, C. Beaumont, F. Schuller // Astrophysical Journal. — 2016. — т. 825, № 2. c. 142.
- 14. Protostars in Perseus: Outflow-induced Fragmentation / M. Barsony, D. Ward-Thompson, P. André, J. O'Linger // Astrophysical Journal. 1998. T. 509, № 2. c. 733—748.
- Shematovich V. I., Shustov B. M., Wiebe D. S. Self-consistent model of chemical and dynamical evolution of protostellar clouds // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1997. — т. 292, № 3. — с. 601—610.
- Krumholz M. R., Matzner C. D. The Dynamics of Radiation-pressuredominated H II Regions // Astrophysical Journal. — 2009. — т. 703, № 2. с. 1352—1362.
- ATLASGAL: A Galaxy-wide sample of dense filamentary structures / G.-X. Li, J. S. Urquhart, S. Leurini, T. Csengeri, F. Wyrowski, K. M. Menten, F. Schuller // Astronomy & Astrophysics. - 2016. - T. 591. - A5.

- An ALMA study of the Orion Integral Filament. I. Evidence for narrow fibers in a massive cloud / A. Hacar, M. Tafalla, J. Forbrich, J. Alves, S. Meingast, J. Grossschedl, P. S. Teixeira // Astronomy & Astrophysics. — 2018. — т. 610. — A77.
- 19. Stahler S. W., Palla F. The Formation of Stars. 2004.
- Kauffmann J., Pillai T., Goldsmith P. F. Low Virial Parameters in Molecular Clouds: Implications for High-mass Star Formation and Magnetic Fields // Astrophysical Journal. — 2013. — т. 779, № 2. — с. 185.
- 21. The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS, in the Virtual Atomic and Molecular Data Centre, VAMDC / С. Р. Endres, S. Schlemmer, P. Schilke, J. Stutzki, H. S. MÃŒller // Journal of Molecular Spectroscopy. 2016. т. 327. с. 95—104 ; New Visions of Spectroscopic Databases, Volume II.
- Herbst E., Klemperer W. The Formation and Depletion of Molecules in Dense Interstellar Clouds // Astrophysical Journal. — 1973. — Vol. 185. — P. 505–534.
- Watson W. D. Ion-Molecule Reactions, Molecule Formation, and Hydrogen-Isotope Exchange in Dense Interstellar Clouds // Astrophysical Journal. — 1974. — т. 188. — с. 35—42.
- 24. Watson W. D. The Rate of Formation of Interstellar Molecules by Ion-Molecule Reactions // Astrophysical Journal. 1973. Vol. 183. P. L17.
- 25. H₂ formation on interstellar dust grains: The viewpoints of theory, experiments, models and observations / V. Wakelam, E. Bron, S. Cazaux, F. Dulieu, C. Gry, P. Guillard, E. Habart, L. Hornekær, S. Morisset, G. Nyman, V. Pirronello, S. D. Price, V. Valdivia, G. Vidali, N. Watanabe // Molecular Astrophysics. 2017. т. 9. с. 1—36.
- Schutte W. A., Allamandola L. J., Sandford S. A. Formaldehyde and Organic Molecule Production in Astrophysical Ices at Cryogenic Temperatures // Science. — 1993. — т. 259, № 5098. — с. 1143—1145.

- Modeling of the formation of complex molecules in protostellar objects / O. V. Kochina, D. S. Wiebe, S. V. Kalenskii, A. I. Vasyunin // Astronomy Reports. 2013. T. 57, № 11. c. 818-832.
- Vasyunin A. I., Herbst E. A Unified Monte Carlo Treatment of Gas-Grain Chemistry for Large Reaction Networks. II. A Multiphase Gas-surface-layered Bulk Model // Astrophysical Journal. — 2013. — т. 762, № 2. — с. 86.
- Ruaud M., Wakelam V., Hersant F. Gas and grain chemical composition in cold cores as predicted by the Nautilus three-phase model // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2016. — т. 459, № 4. — с. 3756—3767.
- 30. Chemistry of TMC-1 with multiply deuterated species and spin chemistry of H₂, H₂⁺, H₃⁺ and their isotopologues / L. Majumdar, P. Gratier, M. Ruaud, V. Wakelam, C. Vastel, O. Sipilä, F. Hersant, A. Dutrey, S. Guilloteau // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2017. Vol. 466, no. 4. P. 4470–4479.
- 31. Deuterium abundances / M. Lemoine, J. Audouze, L. Ben Jaffel, P. Feldman,
 R. Ferlet, G. Hébrard, E. B. Jenkins, C. Mallouris, W. Moos, K. Sembach,
 G. Sonneborn, A. Vidal-Madjar, D. G. York // New Astronomy. 1999. —
 T. 4, № 4. c. 231—243.
- 32. Deuteration and evolution in the massive star formation process. The role of surface chemistry / F. Fontani, G. Busquet, A. Palau, P. Caselli, Á. Sánchez-Monge, J. C. Tan, M. Audard // Astronomy & Astrophysics. 2015. Vol. 575. A87.
- 33. Millar T. J. Millar: Deuterium in Interstellar Space: Deuterium in interstellar clouds // Astronomy and Geophysics. 2005. т. 46, № 2. с. 2.29—2.32.
- 34. Caselli P. Deuterated molecules as a probe of ionization fraction in dense interstellar clouds // Planetary and Space Science. 2002. Vol. 50, no. 12/13. P. 1133–1144.
- 35. Chemical evolution in the early phases of massive star formation. II. Deuteration / T. Gerner, Y. L. Shirley, H. Beuther, D. Semenov, H. Linz, T. Albertsson, T. Henning // Astronomy & Astrophysics. 2015. Vol. 579. A80.

- 36. Molecular Evolution in Collapsing Prestellar Cores. III. Contraction of a Bonnor-Ebert Sphere / Y. Aikawa, E. Herbst, H. Roberts, P. Caselli // Astrophysical Journal. — 2005. — т. 620, № 1. — с. 330—346.
- 37. Garrod R. T., Wakelam V., Herbst E. Non-thermal desorption from interstellar dust grains via exothermic surface reactions // Astronomy & Astrophysics. — 2007. — т. 467, № 3. — с. 1103—1115.
- 38. DNC/HNC and N₂D⁺/N₂H⁺ ratios in high-mass star-forming cores / F. Fontani, T. Sakai, K. Furuya, N. Sakai, Y. Aikawa, S. Yamamoto // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. Vol. 440, no. 1. P. 448–456.
- Bergin E. A., Langer W. D. Chemical Evolution in Preprotostellar and Protostellar Cores // Astrophysical Journal. — 1997. — т. 486, № 1. — с. 316— 328.
- 40. A 'water spout' maser jet in S235AB-MIR / R. A. Burns, H. Imai, T. Handa, T. Omodaka, A. Nakagawa, T. Nagayama, Y. Ueno // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2015. T. 453, № 3. c. 3163-3173.
- Sharpless S. A Catalogue of H II Regions. // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1959. — Vol. 4. — P. 257.
- 42. Israel F. P., Felli M. Aperture synthesis observations of galactic H II regions. VIII. S106 and S235: regions of star formation. // Astronomy & Astrophysics. 1978. т. 63. с. 325—334.
- 43. Star formation in the S 235 A-B complex. / M. Felli, L. Testi, R. Valdettaro, J. .-J. Wang // Astronomy & Astrophysics. 1997. т. 320. с. 594—604.
- 44. New signposts of massive star formation in the S235A-B region / M. Felli, F. Massi, M. Robberto, R. Cesaroni // Astronomy & Astrophysics. 2006. T. 453, № 3. c. 911—922.
- 45. Star formation in the S233 region / D. A. Ladeyschikov, A. M. Sobolev, S. Y. Parfenov, S. A. Alexeeva, J. H. Bieging // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2015. т. 452, № 3. с. 2306—2317.
- 46. Fich M., Blitz L. Optical H II regions in the outer Galaxy. // Astrophysical Journal. 1984. т. 279. с. 125—135.

- 47. Georgelin Y. M., Georgelin Y. P., Roux S. Observations de nouvelles regions HII galactiques et d'etoiles excitatrices. // Astronomy & Astrophysics. — 1973. — т. 25. — с. 337—350.
- 48. Evans N. J. I., Blair G. N. The energetics of molecular clouds. III. The S235 molecular cloud. // Astrophysical Journal. 1981. т. 246. с. 394—408.
- Heyer M. H., Carpenter J. M., Ladd E. F. Giant Molecular Cloud Complexes with Optical H II Regions: 12CO and 13CO Observations and Global Cloud Properties // Astrophysical Journal. — 1996. — т. 463. — с. 630.
- 50. Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 / D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. P. Tsivilev, A. M. Sobolev // Astrophysical Bulletin. — 2016. — т. 71, № 2. — с. 208—224.
- Molecular gas in high-mass filament WB673 / M. S. Kirsanova, S. V. Salii,
 A. M. Sobolev, A. O. H. Olofsson, D. A. Ladeyschikov, M. Thomasson //
 Open Astronomy. 2017. т. 26, № 1. с. 99—105.
- 52. Wouterloot J. G. A., Brand J. IRAS sources beyond the solar circle. I. CO observations. // Astronomy and Astrophysics Supplement. 1989. т. 80. с. 149—187.
- 53. Interferometric multi-wavelength (sub)millimeter continuum study of the young high-mass protocluster IRAS 05358+3543 / Н. Beuther, S. Leurini, P. Schilke, F. Wyrowski, K. M. Menten, Q. Zhang // Astronomy & Astrophysics. 2007. т. 466, № 3. с. 1065—1076.
- 54. Multi-line (sub)millimetre observations of the high-mass proto cluster IRAS 05358+3543 / S. Leurini, H. Beuther, P. Schilke, F. Wyrowski, Q. Zhang, K. M. Menten // Astronomy & Astrophysics. 2007. т. 475, № 3. с. 925—939.
- 55. Massive and luminous YSO IRAS 05361+3539 and its environment. A study of star formation in the parent cloud - I / A. Chakraborty, D. K. Ojha, B. G. Anandarao, T. N. Rengarajan // Astronomy & Astrophysics. — 2000. — т. 364. — с. 683—688.
- 56. Star formation around the HII region Sh2-235 / , given=M. S., giveni=M. S. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2008. т. 388, № 2. с. 729–736.

- 57. Physical conditions in star-forming regions around S235 / M. S. Kirsanova,
 D. S. Wiebe, A. M. Sobolev, C. Henkel, A. P. Tsivilev // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. т. 437, № 2. с. 1593—1608.
- 58. A multiwavelength study of embedded clusters in W5-east, NGC 7538, S235, S252 and S254-S258 / L. Chavarria, L. Allen, C. Brunt, J. L. Hora, A. Muench, G. Fazio // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. T. 439, № 4. c. 3719—3754.
- 59. Outflows and Massive Stars in the Protocluster IRAS 05358+3543 / A. G. Ginsburg, J. Bally, C.-H. Yan, J. P. Williams // Astrophysical Journal. 2009. т. 707, № 1. с. 310–327.
- Camargo D., Bonatto C., Bica E. A possible sequential star formation in the giant molecular cloud G174+2.5 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2011. — т. 416, № 2. — с. 1522—1534.
- Dewangan L. K., Anandarao B. G. Infrared photometric study of the massive star-forming region S235 using Spitzer-Infrared Array Camera and JHK observations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2011. — Vol. 414, no. 2. — P. 1526–1544.
- 62. Thompson R. I., Thronson H. A. J., Campbell B. Infrared spectroscopy of the sources in S 235 and its implication for the line excess problem. // Astrophysical Journal. 1983. т. 266. с. 614—622.
- 63. S 235 B explained: an accreting Herbig Be star surrounded by reflection nebulosity / P. A. Boley, A. M. Sobolev, V. V. Krushinsky, R. van Boekel, T. Henning, A. V. Moiseev, M. V. Yushkin // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2009. T. 399, № 2. c. 778-782.
- 64. IRAS 05358+3543: Multiple outflows at the earliest stages of massive star formation / H. Beuther, P. Schilke, F. Gueth, M. McCaughrean, M. Andersen, T. K. Sridharan, K. M. Menten // Astronomy & Astrophysics. 2002. т. 387. с. 931-943.
- 65. Evolution of the OH and H₂O Maser Emission in the Active Star-Forming Region IRAS 05358+3543 (S231) / N. T. Ashimbaeva, P. Colom, V. V. Krasnov, E. E. Lekht, M. I. Pashchenko, G. M. Rudnitskii, A. M. Tolmachev // Astronomy Reports. — 2020. — т. 64, № 10. — с. 839—854.

- 66. First interferometric study of enhanced N-fractionation in N₂H⁺: the highmass star-forming region IRAS 05358+3543 / L. Colzi, F. Fontani, P. Caselli, S. Leurini, L. Bizzocchi, G. Quaia // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2019. т. 485, № 4. с. 5543—5558.
- 67. High-Mass Protostellar Candidates. I. The Sample and Initial Results / T. K. Sridharan, H. Beuther, P. Schilke, K. M. Menten, F. Wyrowski // Astrophysical Journal. — 2002. — т. 566, № 2. — с. 931—944.
- 68. Porras A., Cruz-González I., Salas L. Young stellar clusters and H_2 nebulosities in S233IR // Astronomy & Astrophysics. 2000. т. 361. с. 660—670.
- 69. Shepherd D. S., Churchwell E. Bipolar Molecular Outflows in Massive Star Formation Regions // The Astrophysical Journal. — 1996. — т. 472, № 1. с. 225—239.
- 70. VizieR Online Data Catalog: MSX6C Infrared Point Source Catalog. The Midcourse Space Experiment Point Source Catalog Version 2.3 (October 2003) / M. P. Egan, S. D. Price, K. E. Kraemer, D. R. Mizuno, S. J. Carey, C. O. Wright, C. W. Engelke, M. Cohen, M. G. Gugliotti // VizieR Online Data Catalog. 2003. c. V/114.
- 71. A catalogue of H2O maser sources north of delta = -30. / R. Cesaroni, F. Palagi, M. Felli, M. Catarzi, G. Comoretto, S. Di Franco, C. Giovanardi, F. Palla // Astronomy and Astrophysics Supplement. 1988. т. 76. с. 445—458.
- 72. Felli M., Palagi F., Tofani G. Molecular outflows and H2 O masers : what type of connection ? // Astronomy & Astrophysics. 1992. т. 255. с. 293—322.
- 73. Exploring the engines of molecular outflows. Radio continuum and H_2_O maser observations. / G. Tofani, M. Felli, G. B. Taylor, T. R. Hunter // Astronomy and Astrophysics Supplement. 1995. T. 112. c. 299.
- 74. Liechti S., Wilson T. L. Maps of the 36GHz methanol emission. // Astronomy & Astrophysics. 1996. т. 314. с. 615—624.

- 75. Linear Polarization of Class I Methanol Masers in Massive Star-forming Regions / J.-h. Kang, D.-Y. Byun, K.-T. Kim, J. Kim, A. .-R. Lyo, W. H. T. Vlemmings // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2016. — т. 227, № 2. — с. 17.
- 76. The Detection of New Methanol Masers in the 5₋₁-4₀E Line / S. V. Kalenskiĭ,
 V. I. Slysh, I. E. Val'tts, A. Winnberg, L. E. Johansson // Astronomy Reports. 2001. T. 45, № 1. c. 26-33.
- Nonequilibrium Excitation of Methanol in Galactic Molecular Clouds: Multitransitional Observations at 2 Millimeters / V. I. Slysh, S. V. Kalenskii,
 I. E. Val'TTS, V. V. Golubev, K. Mead // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1999. — т. 123, № 2. — с. 515—536.
- 78. The Red MSX Source survey: ammonia and water maser analysis of massive star-forming regions / J. S. Urquhart, L. K. Morgan, C. C. Figura, T. J. T. Moore, S. L. Lumsden, M. G. Hoare, R. D. Oudmaijer, J. C. Mottram, B. Davies, M. K. Dunham // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2011. T. 418, № 3. c. 1689—1706.
- Kim C.-H., Kim K.-T., Park Y.-S. Simultaneous Survey of Water and Class I Methanol Masers toward Red MSX Sources // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2018. т. 236, № 2. с. 31.
- Szymczak M., Hrynek G., Kus A. J. A survey of the 6.7 GHz methanol maser emission from IRAS sources. I. Data // Astronomy and Astrophysics Supplement. — 2000. — т. 143. — с. 269—301.
- 81. A 6.7 GHz Methanol Maser Survey at High Galactic Latitudes / К. Yang, X. Chen, Z.-Q. Shen, X.-Q. Li, J.-Z. Wang, D.-R. Jiang, J. Li, J. Dong, Y.-J. Wu, H.-H. Qiao, Z. Ren // Astrophysical Journal. 2017. т. 846, № 2. с. 160.
- Water Maser and Ammonia Survey toward IRAS Sources in the Galaxy I. H₂O Maser Data / K. Sunada, T. Nakazato, N. Ikeda, S. Hongo, Y. Kitamura, J. Yang // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2007. т. 59. с. 1185.

- 83. A search for 5_1-6_0 A⁺-methanol masers towards faint IRAS sources / D. J. van der Walt, S. J. P. Retief, M. J. Gaylard, G. C. MacLeod // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1996. т. 282, № 3. с. 1085—1095.
- Wouterloot J. G. A., Brand J., Fiegle K. IRAS sources beyond the solar circle. III. Observations of H2O, OH, CH3OH and CO. // Astronomy and Astrophysics Supplement. — 1993. — т. 98. — с. 589—636.
- Classification and statistical properties of galactic H2O masers. / F. Palagi, R. Cesaroni, G. Comoretto, M. Felli, V. Natale // Astronomy and Astrophysics Supplement. 1993. т. 101. с. 153—193.
- 86. A New 95 GHz Methanol Maser Catalog. I. Data / W. Yang, Y. Xu, X. Chen,
 S. P. Ellingsen, D. Lu, B. Ju, Y. Li // The Astrophysical Journal Supplement
 Series. 2017. T. 231, № 2. c. 20.
- 87. 44 GHz Methanol Masers: Observations toward 95 GHz Methanol Masers / W. Yang, Y. Xu, Y. K. Choi, S. P. Ellingsen, A. M. Sobolev, X. Chen, J. Li, D. Lu // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2020. т. 248, № 1. с. 18.
- A high-sensitivity 6.7 GHz methanol maser survey toward H2O sources / Y. Xu, J. J. Li, K. Hachisuka, J. D. Pandian, K. M. Menten, C. Henkel // Astronomy & Astrophysics. — 2008. — т. 485, № 3. — с. 729—734.
- 89. The catalogues and mid-infrared environment of interstellar OH masers / H. Qiao, J. Li, Z. Shen, X. Chen, X. Zheng // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — т. 441, № 4. — с. 3137—3147.
- 90. Wiesemeyer H., Thum C., Walmsley C. M. The polarization of mm methanol masers // Astronomy & Astrophysics. — 2004. — т. 428. — с. 479—495.
- 91. Vlemmings W. H. T. A new probe of magnetic fields during high-mass star formation. Zeeman splitting of 6.7 GHz methanol masers // Astronomy & Astrophysics. — 2008. — т. 484, № 3. — с. 773—781.
- 92. 37 GHz Methanol Masers : Horsemen of the Apocalypse for the Class II Methanol Maser Phase? / S. P. Ellingsen, S. L. Breen, A. M. Sobolev, M. A. Voronkov, J. L. Caswell, N. Lo // Astrophysical Journal. 2011. т. 742, № 2. с. 109.

- 93. The Medicina survey of methanol masers at 6.7 GHz / V. I. Slysh, I. E. Val'tts, S. V. Kalenskii, M. A. Voronkov, F. Palagi, G. Tofani, M. Catarzi // Astronomy and Astrophysics Supplement. 1999. т. 134. с. 115—128.
- 94. A new 3 mm band receiver for the Onsala 20 m antenna / V. Belitsky, I. Lapkin, M. Fredrixon, E. Sundin, L. Helldner, L. Pettersson, S. .-E. Ferm, M. Pantaleev, B. Billade, P. Bergman, A. O. H. Olofsson, M. S. Lerner, M. Strandberg, M. Whale, A. Pavolotsky, J. Flygare, H. Olofsson, J. Conway // Astronomy & Astrophysics. 2015. т. 580. А29.
- 95. The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS, in the Virtual Atomic and Molecular Data Centre, VAMDC / С. Р. Endres, S. Schlemmer, P. Schilke, J. Stutzki, H. S. P. Müller // Journal of Molecular Spectroscopy. — 2016. — т. 327. — с. 95—104.
- 96. An updated list of radio flux density calibrators. / M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, T. P. Krichbaum, K. J. Standke, C. J. Schalinski, C. A. Hummel // Astronomy & Astrophysics. — 1994. — т. 284. — с. 331—339.
- 97. The Bolocam Galactic Plane Survey: λ = 1.1 and 0.35 mm Dust Continuum Emission in the Galactic Center Region / J. Bally, J. Aguirre, C. Battersby, E. T. Bradley, C. Cyganowski, D. Dowell, M. Drosback, M. K. Dunham, I. Evans Neal J., A. Ginsburg, J. Glenn, P. Harvey, E. Mills, M. Merello, E. Rosolowsky, W. Schlingman, Y. L. Shirley, G. S. Stringfellow, J. Walawender, J. Williams // Astrophysical Journal. 2010. т. 721, № 1. с. 137—163.
- 98. The Bolocam Galactic Plane Survey. IX. Data Release 2 and Outer Galaxy Extension / A. Ginsburg, J. Glenn, E. Rosolowsky, T. P. Ellsworth-Bowers, C. Battersby, M. Dunham, M. Merello, Y. Shirley, J. Bally, N. J. Evans II [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2013. т. 208, № 2. с. 14.
- 99. The Arizona Radio Observatory CO Mapping Survey of Galactic Molecular Clouds. V. The Sh2-235 Cloud in CO J=2-1, ¹³CO J=2-1, and CO J=3-2 / J. H. Bieging, S. Patel, W. L. Peters, L. V. Toth, G. Marton, S. Zahorecz // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2016. т. 226, № 1. с. 13.
- 100. Weeds: a CLASS extension for the analysis of millimeter and sub-millimeter spectral surveys / S. Maret, P. Hily-Blant, J. Pety, S. Bardeau, E. Reynier //. — 2011. — т. 526. — А47.

- 101. Wannier P. G. Nuclear abundances and evolution of the interstellar medium // Annual review of astronomy and astrophysics. 1980. т. 18. с. 399—437.
- 102. Wilson T. L. Isotopes in the interstellar medium and circumstellar envelopes // Reports on Progress in Physics. — 1999. — т. 62, № 2. — с. 143— 185.
- 103. Mangum J. G., Shirley Y. L. How to Calculate Molecular Column Density // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2015. — т. 127, № 949. — с. 266.
- 104. Deuteration of ammonia in the starless core Ophiuchus/H-MM1 / J. Harju,
 F. Daniel, O. Sipilä, P. Caselli, J. E. Pineda, R. K. Friesen, A. Punanova,
 R. Güsten, L. Wiesenfeld, P. C. Myers, A. Faure, P. Hily-Blant, C. Rist, E.
 Rosolowsky, S. Schlemmer, Y. L. Shirley // Astronomy & Astrophysics. —
 2017. Vol. 600. A61.
- 105. Hyperfine structure of interstellar ammonia in dark clouds. / О. Е. Н. Rydbeck, A. Sume, A. Hjalmarson, J. Ellder, B. O. Ronnang, E. Kollberg // Astrophysical Journal. — 1977. — т. 215. — с. L35—L40.
- Mangum J. G., Wootten A., Mundy L. G. Synthesis Imaging of the DR 21 (OH) Cluster. II. Thermal Ammonia and Water Maser Emission //. 1992. T. 388. c. 467.
- 107. *Ho P. T. P.*, *Townes C. H.* Interstellar ammonia. //. 1983. т. 21. с. 239—270.
- 108. Walmsley C. M., Ungerechts H. Ammonia as a molecular cloud thermometer. $//. 1983. \tau$. 122. -c. 164-170.
- 109. On the internal structure of starless cores. I. Physical conditions and the distribution of CO, CS, N₂H⁺, and NH₃ in L1498 and L1517B / M. Tafalla, P. C. Myers, P. Caselli, C. M. Walmsley // Astronomy & Astrophysics. 2004. т. 416. с. 191—212.
- 110. An atomic and molecular database for analysis of submillimetre line observations / F. L. Schöier, F. F. S. van der Tak, E. F. van Dishoeck, J. H. Black // Astronomy & Astrophysics. — 2005. — т. 432, № 1. — с. 369—379.

- 111. Stutzki J., Winnewisser G. On the interpretation of hyperfine-structure intensity anomalies in the NH3 (J, K) = (1,1) inversion transition. // Astronomy & Astrophysics. 1985. T. 144. c. 13-26.
- 112. Park Y. .-S. Hyperfine anomalies in the ammonia (1,1) inversion transition: Can they be a tracer of systematic motion? // Astronomy & Astrophysics. — 2001. — т. 376. — с. 348—355.
- NH₃ (1,1) hyperfine intensity anomalies in the Orion A molecular cloud / D.-d. Zhou, G. Wu, J. Esimbek, C. Henkel, J.-j. Zhou, D.-l. Li, W.-g. Ji, X.-w. Zheng // Astronomy & Astrophysics. 2020. т. 640. А114.
- 114. Troitsky N. R., Lapinov A. V., Zamozdra S. N. Radiation-Transfer Modeling of the Cloud L1544 in the HCO⁺ and HC¹⁸O⁺ Emission Lines // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2004. — т. 47, № 2. — с. 77—84.
- Molecular Emission Line Formation in Prestellar Cores / Y. Pavlyuchenkov,
 D. S. Wiebe, B. Shustov, T. Henning, R. Launhardt, D. Semenov // Astrophysical Journal. — 2008. — т. 689, № 1. — с. 335—350.
- 116. Kalenskii S. V., Johansson L. E. Spectral scan of the star-forming region DR21(OH). Observations and LTE analysis // Astronomy Reports. 2010. T. 54, № 4. c. 295-316.
- 117. CH 3C 2H as a Temperature Probe in Dense Giant Molecular Cloud Cores / E. A. Bergin, P. F. Goldsmith, R. L. Snell, H. Ungerechts // Astrophysical Journal. 1994. т. 431. с. 674.
- 118. *Herzberg G.* Molecular spectra and molecular structure. Vol.2: Infrared and Raman spectra of polyatomic molecules. 1945.
- 119. Hildebrand R. H. The determination of cloud masses and dust characteristics from submillimetre thermal emission. // Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society. — 1983. — т. 24. — с. 267—282.
- 120. Ossenkopf V., Henning T. Dust opacities for protostellar cores. // Astronomy & Astrophysics. 1994. т. 291. с. 943—959.
- 121. Dust dynamics and evolution in expanding H II regions. I. Radiative drift of neutral and charged grains / V. V. Akimkin, M. S. Kirsanova, Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2015. — т. 449, № 1. — с. 440—450.

- 122. Dust dynamics and evolution in H II regions II. Effects of dynamical coupling between dust and gas / V. V. Akimkin, M. S. Kirsanova, Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2017. T. 469, № 1. c. 630-638.
- MAMBO mapping of Spitzer c2d small clouds and cores / J. Kauffmann,
 F. Bertoldi, T. L. Bourke, I. Evans N. J., C. W. Lee // Astronomy & Astrophysics. 2008. т. 487, № 3. с. 993-1017.
- 124. High-Mass Protostellar Candidates. II. Density Structure from Dust Continuum and CS Emission / H. Beuther, P. Schilke, K. M. Menten, F. Motte, T. K. Sridharan, F. Wyrowski // Astrophysical Journal. - 2002. -T. 566, № 2. - c. 945-965.
- 125. Shirley Y. L. The Critical Density and the Effective Excitation Density of Commonly Observed Molecular Dense Gas Tracers // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2015. — т. 127, № 949. — с. 299.
- 126. Semenov D., Wiebe D. S. Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2011. — т. 196, № 2. — с. 25.
- 127. Luminosity outburst chemistry in protoplanetary discs: going beyond standard tracers / D. S. Wiebe, T. S. Molyarova, V. V. Akimkin, E. I. Vorobyov, D. Semenov // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — т. 485, № 2. — с. 1843—1863.
- 128. Lee H. .-H., Bettens R. P. A., Herbst E. Fractional abundances of molecules in dense interstellar clouds: A compendium of recent model results. // Astronomy and Astrophysics Supplement. — 1996. — т. 119. — с. 111—114.
- 129. Spitzer Lyman J., Tomasko M. G. Heating of H i Regions by Energetic Particles // Astrophysical Journal. — 1968. — т. 152. — с. 971.
- 130. Myers P. C., Benson P. J. Dense cores in dark clouds. II. NH3 observations and star formation. // Astrophysical Journal. — 1983. — т. 266. — с. 309—320.
- 131. Molecular Evolution in Collapsing Prestellar Cores / Y. Aikawa, N. Ohashi,
 S.-i. Inutsuka, E. Herbst, S. Takakuwa // Astrophysical Journal. 2001. T. 552, № 2. c. 639-653.

- 132. A Coupled Dynamical and Chemical Model of Starless Cores of Magnetized Molecular Clouds. II. Chemical Differentiation / V. I. Shematovich, D. S. Wiebe, B. M. Shustov, Z.-Y. Li // Astrophysical Journal. — 2003. — т. 588, № 2. — с. 894—909.
- 133. Kang J.-h., Koo B.-C., Salter C. An Old Supernova Remnant within an H II Complex at l ≈ 173°: FVW 172.8+1.5 // The Astronomical Journal. – 2012. – т. 143, № 3. – с. 75.

Список рисунков

1.1	Изображение гигантского молекулярного облака G174+2.5,	
	составленное по ИК-данным WISE 22 μ м (красный), 12 μ м	
	(зеленый) и 3.4 μ м (синий). Бирюзовые эллипсы - исследуемые в	
	работе газовые сгустки, выделенные в работе [50] в линиях СО,	
	фиолетовые окружности - расширяющиеся области Н II	19
1.2	Схема, показывающая квадрупольное и магнитное сверхтонкое	
	расщепление спектра NH_3 (1,1) (взято из работы [105])	31
2.1	Интегральная интенсивность линий молекул $CS(2-1)$, $C^{18}O(1-0)$,	
	13 CO(1–0), N ₂ H ⁺ (1–0), HNC(1–0) и HCN(1–0) 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 отношения сигнал/шум $pprox 3,$ а	
	внутренние показывают $\sim 35\%$ и $\sim 65\%$ от максимальной	
	интенсивности, черный круг в левом нижнем углу - диаграмма	
	направленности телескопа	39
2.2	Лучевая концентрация молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN, H_2 в	
	центральном сгустке WB 673 и трех крайних. Обозначения как	
	на Рис. 2.2	40
2.3	Обилия молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN, H_2 в плотных	
	сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1	42
2.4	Спектры линий излучения молекул в направлении центрального	
	сгустка WB 673. Красной линией показано приближение	
	спектров гауссовыми функциями	43
2.5	Карты интегральной интенсивности линий NH_3 (1,1) и (2,2) в	
	сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 волокна	
	WB 673. Обозначения как на рис. 2.1	47
2.6	Карта лучевой скорости $V_{ m LSR}$ и ширины линии ΔV NH ₃ (1,1) в	
	плотных сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1	48

2.7	Линии аммиака в пиках излучения плотных сгустков WB 668,	
	WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Красные линии показывают	
	Гауссовы профили	49
2.8	Карты лучевой концентрации аммиака (сверху), кинетической	
	температуры газа (середина сверху), обилия NH_3 (середина	
	снизу) и плотности водорода (снизу) в сгустках волокна WB 673.	
	Обозначения как на рис. 2.1	51
2.9	Аномалии сверхтонкой структуры в плотных сгустках волокна	
	WB 673	53
2.10	Линии молекул NH ₂ D (1,1), N ₂ H ⁺ (1–0), N ₂ D ⁺ (1–0),	
	HCO ⁺ (1–0), DCO ⁺ (1–0), HCN (1–0), DCN (1–0), HNC (1–0),	
	DNC (1–0), ¹³ CS (2–1), SO (3–2), D ₂ CS (3–2), c – C ₃ H ₂ (2–1),	
	C ₂ H (1–0), HCS ⁺ (2–1), CH ₃ CCH (5–4) в направлении сгустков	
	AB и AB cluster	58
2.11	Линии для CE и CW	59
2.12	Линии для E1 и E2	60
2.13	Линии для G173.57 и WB 690	61
2.14	Линии для S233-IR и G173.17	62
2.15	Линии для WB 668 и WB 673	63
2.16	Линии CH $_3$ CCH, $J = 5$ –4, $K = 0, 1, 2, 3$ с гауссовой функцией,	
	вписанной в K -компоненты	65
2.17	Вращательные диаграммы CH ₃ CCH. $T_{\rm rot}$ и N показаны в правом	
	верхнем углу	66
2.18	Сравнение доли дейтерия в N_2H^+ , NH_3 , HNC и HCN, HCO ⁺ с	
	лучевой концентрацией и плотностью водорода	71
2.19	Сравнение доли дейтерия в N_2H^+ , NH_3 , HNC и HCN, HCO ⁺ в	
	разных сгустках	72

3.1	Распределение плотности водорода $n({ m H}_2),$ полученной по	
	данным излучения линий аммиака, лучевой концентрации	
	молекул N_2H^+ , CO, CS, NH_3 , HCN и HNC в сгустке WB 673	
	(черные линии с барами ошибок). Панель с $n({ m H}_2)$ так же	
	показывает вписанную степенную функцию. Цветные	
	сине-зелено-желтые линии на панелях с лучевыми	
	концентрациями показывают результаты модели Presta в разные	
	моменты времени.	78
3.2	Распределение плотности водорода $n({ m H}_2)$ и лучевой	
	концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS, NH_3 , в сгустке WB 668.	
	Обозначения как на Рис. 3.1	79
3.3	Распределение плотности водорода $n({ m H}_2)$ и лучевой	
	концентрации молекул CO, CS и NH_3 в сгустке S233-IR.	
	Обозначения как на Рис. 3.1	79
3 /	Распраделение плотности родорода $n(H_2)$ и луцерой	

3.4	Распределение плотности водорода $n({ m H}_2)$ и лучевой	
	концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS и NH_3 в сгустке	
	G173.57+2.43. Обозначения как на Рис. 3.1	80

3.5	Критерий	соответствия	моделей	Σ \downarrow	ĮЛЯ	сгустков	волокна	WB	673.	82
-----	----------	--------------	---------	-----------------------	-----	----------	---------	----	------	----

Список таблиц

1	IRAS-источники в направлении сгустков G174+2.5	21
2	Список линий, обнаруженных на телескопе Онсала в 2016-2017 г.	
	в направлении волокна WB 673	23
3	Координаты направлений на максимумы излучения холодной	
	пыли по данным Bolocam 1.1 мм, в которых велись наблюдения	
	на телескопе в Онсала в 2019 г	24
4	Список линий, обнаруженных на телескопе в Онсала в 2019 г	25
5	Частоты переходов, наблюдавшихся на телескопе в	
	Эффельсберге в 2019 г. в направлении волокна WB 673	26
6	Константы для вычисления лучевой концентрации	30
7	Частота и энергия уровней сверхтонкой структуры ${ m CH_3CCH}$ J $=$	
	5-4, K = 0, 1, 2, 3	34
8	Уровни лучевой концентрации водорода в сгустках волокна	
	WB 673, cm^{-2}	38
9	Обилия молекул, усредненные по сгусткам волокна WB 673	41
10	Линии, отождествленные в центральном сгустке WB 673	44
11	Лучевые концентрации и относительные обилия молекул СО,	
	N_2H^+ , HCN, HNC, CS, SO, HCCCN в направлении пика	
	излучения CS (2–1) в сгустке WB 673	45
12	Параметры линий в направлении на пики интегральной	
	интенсивности $NH_3(1,1)$	50
13	Интегральные интенсивности линий молекул NH_2D (1,1),	
	N_2H^+ (1–0), N_2D^+ (1–0), HCO ⁺ (1–0), DCO ⁺ (1–0), HCN (1–0),	
	DCN (1–0), HNC (1–0), DNC (1–0), 13 CS (2–1), SO (3–2),	
	D_2CS (3–2), c – C_3H_2 (2–1), C_2H (1–0), HCS^+ (2–1),	
	CH ₃ CCH (5–4), HN ¹³ C (1–0), HC ¹⁵ N (1–0) и H ¹³ CO ⁺ (1–0) в	
	направлении плотных сгустков облака G174+2.5, К км/с	56
14	Оптическая толщина линий HNC (1–0), HCN (1–0), HCO ⁺ (1–0),	
	N_2H^+ (1–0), NH_2D (1,1) в направлении центров 12-ти сгустков	64
15	Вращательные температуры линий CH ₃ CCH и кинетическая	
	температура газа из NH ₃ , (K)	67

16	Лучевые концентрации молекул NH_2D , N_2H^+ , N_2D^+ , HCO^+ ,	
	DCO^+ , HCN, DCN, HNC, DNC, ¹³ CS, SO, D ₂ CS, c - C ₃ H ₂ , C ₂ H и	
	$\rm HCS^+$ в направлении 12-ти сгустков (см $^{-2}$)	67
17	Доля дейтерия в направлении 12-ти сгустков	70
18	Начальные обилия компонент химической модели по отношению	
	к водороду	76
19	Параметры радиального распределения плотности водорода в	
	сгустках волокна WB 673	77